

Aus der
Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Tübingen
Abteilung Poliklinik für Zahnerhaltung
Sektion Endodontologie

**Effizienz der Patency-Technik
mit flexibler moderner Schallspitze**

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

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

**vorgelegt von
Petermann, Tatjana, geb. Popp
2024**

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. A. ElAyouti

2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. A. Badke

Tag der Disputation: 29.04.2024

Meinem Ehemann Kilian,
meinen Eltern und Schwiegereltern

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	5
AKRONYME UND ABKÜRZUNGEN	6
1. EINLEITUNG	8
1.1. Grundlagen der Wurzelkanalbehandlung	8
1.1.1. Endodontologie	8
1.1.2. Morphologie und Anatomie der einzelnen Wurzelkanäle	8
1.1.3. Anatomie und Topographie des Foramen apicale	11
1.1.4. Gekrümmte Wurzelkanäle	12
1.1.5. Indikationen und Kontraindikationen der Wurzelkanalbehandlung	15
1.1.6. Ziele der Wurzelkanalbehandlung	15
1.1.7. Fehler und Probleme bei der Wurzelkanalaufbereitung	17
1.1.8. Unter- und Überinstrumentierung des Wurzelkanals	22
1.2. Reinigung des Wurzelkanalsystems	22
1.2.1. Chemische Wurzelkanalreinigung	22
1.2.1.1. Natriumhypochlorit	23
1.2.1.2. Ethylendiamintetraacetat (EDTA)/Chelatoren	24
1.2.1.3. Chlorhexidin in 2%iger-Konzentration bei der Revision	24
1.2.2. Angewandte Spültechniken	25
1.2.2.1. Einfache, manuelle Spülung	26
1.2.2.2. Schallaktivierte Spülung	27
1.3. Patency-Technik	29
1.4. Zusammenfassung und Fragestellung	33
2. MATERIAL UND METHODEN	36
2.1. Vorbereitung der im Versuch verwendeten Zähne	36
2.1.1. Zahnauswahl	36
2.1.2. Erstellung der 3D-Datensätze	37

2.1.2.1. 3D-Slicer	37
2.1.2.2. Oberflächenbearbeitung	38
2.1.2.3. 3D-Processing	39
2.1.2.4. 3D-Druck der Zähne	40
2.2. Materialien	41
2.2.1. Endodontiemotor und Reinigungseinheit	41
2.2.2. Feilen	42
2.2.2.1. Manuelle Stahl- und Nickel-Titan-Instrumente	42
2.2.2.2. Maschinelle Aufbereitung mit rotierenden Instrumenten	45
2.2.2.3. Maschinelle Aufbereitung mit reziprozierenden Instrumenten	46
2.2.2.4. Extrem flexible Instrumente ohne Memory-Effekt	49
2.2.3. Flexible schallaktivierte Endo-Spülspitze	51
2.3. Versuchsdurchführung	53
2.3.1. Versuchsaufbau	53
2.3.2. Versuchsdurchführung	54
2.3.2.1. Überblick über die Versuchsdurchführung	54
2.3.3. Hochauflösende Videodokumentation	59
2.3.4. Erfassung der Versuchskriterien	59
2.3.4.1. Nachweis der Patency mittels gefärbter Spüllösung	59
2.3.4.2. Auswertung des zeitlichen Aufwandes	60
2.3.4.3. Darstellung der Videodokumentation	61
2.3.4.4. Statistische Auswertung	66
3. ERGEBNISSE	67
3.1. Aufbereitungstechnik im Hinblick auf die apikale Kanaldurchgängigkeit	67
3.2. Einfluss des Foramendurchmessers auf die apikale Kanaldurchgängigkeit	68
3.3. Zeitlicher Aufwand der Aufbereitung und Reinigung	70
3.4. Verwendete Feilensysteme im Vergleich	72
4. DISKUSSION	74
4.1. Diskussion der Methode	74
4.1.1. Auswahl der Präparate	74

4.1.2. Auswahl der Methode	75
4.1.3. Rolle des Behandlers	77
4.2. Erreichen der Patency	78
4.3. Zeitlicher Aspekt der Aufbereitung und Reinigung	85
4.4. Einschätzung Polyamidspülspitze	86
5. ZUSAMMENFASSUNG	87
6. LITERATURVERZEICHNIS	90
7. ERKLÄRUNG ZUM EIGENANTEIL	98
8. DANKSAGUNG	99
9. LEBENSLAUF	FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Klassifikation der Wurzelkanalanatomie nach Vertucci.....	10
Abb. 2: Anatomie und Topographie der Wurzelspitze.....	11
Abb. 3: Schaubild zur Bestimmung des Krümmungsradius des Wurzelkanals nach Pruett	14
Abb. 4: Stufenbildung während der Wurzelkanalaufbereitung	18
Abb. 5: Zip-Elbow-Effekt bei fehlerhafter Wurzelkanalaufbereitung	19
Abb. 6: Apikale und laterale Perforation bei der Wurzelkanalaufbereitung	20
Abb. 7: Apikale Blockade bei der Wurzelkanalaufbereitung.....	21
Abb. 8: Leichte und schwere Kanalanatomien im Vergleich	37
Abb. 9: Ausschnitt aus 3D-Slicer-Programm	38
Abb. 10: Erstellung einer digitalen Trepanationsöffnung.....	40
Abb. 11: Polyamidspülspitze von VDW (links) im Vergleich zu herkömmlicher Metallspitze (rechts)...	52
Abb. 12: Laborarbeitsplatz zur Aufbereitung der Zähne	54
Abb. 13: Schaubild des Versuchsablaufs.....	57
Abb. 14: Darstellung des Ergebnisses der Kanalaufbereitung anhand gefärbter Spüllösung ...	60
Abb. 15: Videodokument Teil 1 – Gleitpfaderstellung	62
Abb. 16: Videodokument Teil 2 – Initiale Spülung und erste Aufbereitung	62
Abb. 17: Videodokument Teil 3 – Spülung und zweite Aufbereitung mit RECIPROC® blue-Feile .	63
Abb. 18: Videodokument Teil 4 – Spülung und dritte Aufbereitung mit RECIPROC® blue-Feile..	63
Abb. 19: Videodokument Teil 5 – Spülung, Patency-Feile und Polyamidspülspitze	64
Abb. 20: Videodokument Teil 6 – Spülung, Patency-Feile und Polyamidspülspitze	64
Abb. 21: Videodokument Teil 7 – Spülung, Patency-Feile und Polyamidspülspitze.....	65
Abb. 22: Videodokument Teil 8 – Überprüfung der Patency mit gefärbter Spüllösung	65
Abb. 23: Ergebnisse der Patency in Prozent.....	68
Abb. 24: Ergebnisse der Patency in Prozent in Bezug zum Foramendurchmesser in ISO-Größe.	69
Abb. 25: Darstellung der zeitlichen Verteilung pro Aufbereitungsmethode in Sekunden	71
Abb. 26: Ergebnisse der Feilensysteme RECIPROC® blue #25, Mtwo®, HyFlex™ EDM	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der unterschiedlichen Paarkombinationen 72

Akronyme und Abkürzungen

Abb.	Abbildung
Bwg.	Bewegung
bzgl.	bezüglich
CM-Wire	Controlled Memory-Wire
DGZ	Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kiefer- heilkunde
EAL	Electronic Apex Locator
EDDY [®]	ultraschallaktivierte Spülspitze aus Polyamid
EDDY [®] _f	ultraschallaktivierte Spülspitze bis zum Foramen
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
et al.	et alii
gcm	Gramm Zentimeter
ggf.	gegebenenfalls
GPa	Gigapascal
Gr.	Größe
i.d.R.	in der Regel
ISO	International Organization for Standardization
M-Wire	Memory-Wire
m %	Masseprozent
Mean	Mittelwert
min ⁻¹	pro Minute
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
NaOCl	Natriumhypochlorid
Ncm	Newton Zentimeter
NiTi	Nickel-Titan

NiTINOL	Legierung aus Nickel und Titan, die im Naval Ordnance Laboratory in Silver Spring, USA, entwickelt wurde
P _f	Patency-Feile (Stahlfeile Größe 10) bis zum Foramen apicale
P _{f+1}	Patency-Feile 1 mm über das Foramen apicale hinaus
Polyamidspitze _f	Polyamidspülspitze bis zum Foramen apicale
RH	Rockwell Härte (international gebräuchliche Maßeinheit für die Härte technischer Werkstoffe)
rpm	rotation per minute/Umdrehung pro Minute
Sek.	Sekunde
Tab.	Tabelle
Wdh.	Wiederholung
WL	Working length/Arbeitslänge
WL _f	Working length bis zum Foramen apicale
WL _{f-0,5}	Working length bis 0,5 mm vor dem Foramen apicale
z.B.	zum Beispiel
#	ISO-Größe

1. Einleitung

1.1. Grundlagen der Wurzelkanalbehandlung

1.1.1. Endodontologie

Mit dem Begriff Endodont wird die funktionell und anatomisch zusammenhängende Struktur aus Zahnpulpa und umgebendem Dentin bezeichnet. Davon zu unterscheiden ist das den Zahn umgebende Gewebe, das Parodontium. Das Endodont steht mit dem Parodont über das Foramen apicale und zahlreichen akzessorischen Kanälen in direkter Verbindung. Erkrankungen des pulpalen Gewebes können daher auf die periapikale Region übergreifen und umgekehrt. Die Endodontologie beschäftigt sich mit der Form und Funktion des Endodonts sowie der Ätiologie, Epidemiologie, Pathologie, Prävention, Diagnose und Behandlung von Erkrankungen des Endodonts (E. Hellwig, 2013).

Als Hauptauslöser endodontischer Erkrankungen gelten kariöse Läsionen, Traumata und Parodontopathien. Aber auch iatrogen verursachte Maßnahmen können eine Erkrankung des Endodonts auslösen (López-Marcos, 2004).

1.1.2. Morphologie und Anatomie der einzelnen Wurzelkanäle

Wurzelkanäle sind aus einem komplexen Geflecht – bestehend aus Verzweigungen, Seitenkanälen, Ramifikationen – sowie unterschiedlich geformten Foramina zusammengesetzt, was bereits in einigen Studien beschrieben wird (Meyer, 1970, Davis et al., 1972). Die idealisierte Vorstellung von exakt konisch verlaufenden und sich nach apikal verjüngenden Kanälen mit rundem Querschnitt trifft in aller Regel nicht zu. Die Varianz der Kanalmorphologie ist dabei enorm unterschiedlich. Sie kann beispielsweise schlitzförmig, oval, nierenförmig oder c-förmig ausgeprägt und zusätzlich mit Ausbuchtungen und Seitenkanälen versehen sein. Dies erschwert die Präparation und Aufbereitung der einzelnen Kanäle immens und verdeutlicht, weshalb der Einsatz von Spüllösungen zur

chemischen Desinfektion einen hohen Stellenwert einnimmt (Marceliano-Alves et al., 2016, Ahir et al., 2014).

Es gibt eine Vielzahl von Untersuchungen, die sich mit der Morphologie und Anatomie der Zähne auseinandersetzen. Dabei sind die Zähne auf die Anzahl der Wurzeln, die Anzahl der Kanäle innerhalb einer Wurzel sowie auf ihre Besonderheiten hin verglichen worden. Im Folgenden wird auf die besonderen Merkmale unterer mittlerer Schneidezähne sowie oberer und unterer Prämolaren eingegangen, da diese Zähne für die vorliegende Studie betrachtet werden. Laut Trondstad und von Velzen weisen mittlere untere Schneidezähne in 100 % der Fälle eine Wurzel auf. Innerhalb der Wurzel verlaufen in 60 % der Fälle ein Kanal, in 40 % der Fälle zwei Kanäle. Als Besonderheit lässt sich zu unteren mittleren Schneidezähnen sagen, dass sie einen ovalen Querschnitt mit häufig im mittleren Wurzelbereich auftretender Einschnürung aufweisen. Obere erste Prämolaren weisen zu 19 % eine Wurzel, in 80 % der Fälle zwei und bei 1 % drei Wurzeln auf. Zu 95 % besitzen diese zwei Wurzelkanäle, in nur 4 % einen Kanal und nur zu 1 % drei Kanäle. Obere ersten Prämolaren haben sehr unterschiedliche Wurzelkanalkonfigurationen, weshalb die Aufbereitung häufig erschwert ist. Untere erste Prämolaren unterscheiden sich von oberen ersten Prämolaren dadurch, dass diese in 98 % der Fälle nur eine Wurzel aufweisen und nur in 2 % der Fälle zwei Wurzeln besitzen. In 94 % der Fälle befindet sich in der Wurzel ein Kanal, in 6 % der Fälle zwei Kanäle. Auch hier liegen sehr komplexe Kanalkonfigurationen vor, was die Aufbereitung erschwert (von Velzen SKT, 1988, Trondstad, 2003).

Da sich die Zähne des Unter- und Oberkiefers nicht nur in der Anzahl der Wurzeln und Kanäle unterscheiden, sondern vielmehr jeder Wurzelkanal eine ganz eigene Morphologie aufweist, erstellt Weine 1982 zur Vereinfachung und klinischen Orientierung eine Einteilung. Er beschreibt darin vier Kanalkonfigurationstypen (Kim et al., 2013, Klimm, 2003). 1984 veröffentlicht Vertucci eine neue Klassifikation zur Einteilung der unterschiedlichen Wurzelkanalmorphologien und untergliedert diese in acht verschiedene anatomische Verläufe.

Die Klassifikation stützt sich auf die Untersuchung von 2400 extrahierten Zähnen und ist bis heute anerkannt (Klimm, 2003, Vertucci, 1984).

Der Klassifikation nach Vertucci entsprechen einige der in der Studie verwendeten Zähne. Der in Abb. 1a gezeigte Zahn besitzt einen Wurzelkanal, der im apikalen Drittel eine Krümmung aufweist und die Wurzel an genau einem Foramen verlässt (Typ I nach Vertucci). Abb. 1b entspricht Typ III nach Vertucci. Der Zahn besitzt ein Pulpenkavum, von dem aus ein Wurzelkanal abgeht, der sich im oberen Wurzel Drittel in zwei Kanäle aufspaltet und sich im apikalen Verlauf wieder zu einem Kanal vereint und an einem Foramen den Zahn verlässt. Abb. 1c zeigt eine Kombination aus Typ VI und V. Der Zahn weist zwei Wurzeln auf, in die vom Pulpenkavum aus getrennt voneinander verlaufend sich jeweils ein Wurzelkanal absplattet. Der Wurzelkanal der bukkalen Wurzel spaltet sich kurz vor Erreichen des Apex in zwei Kanäle auf und verlässt den Zahn an zwei voneinander getrennten Foramina (Klimm, 2003).

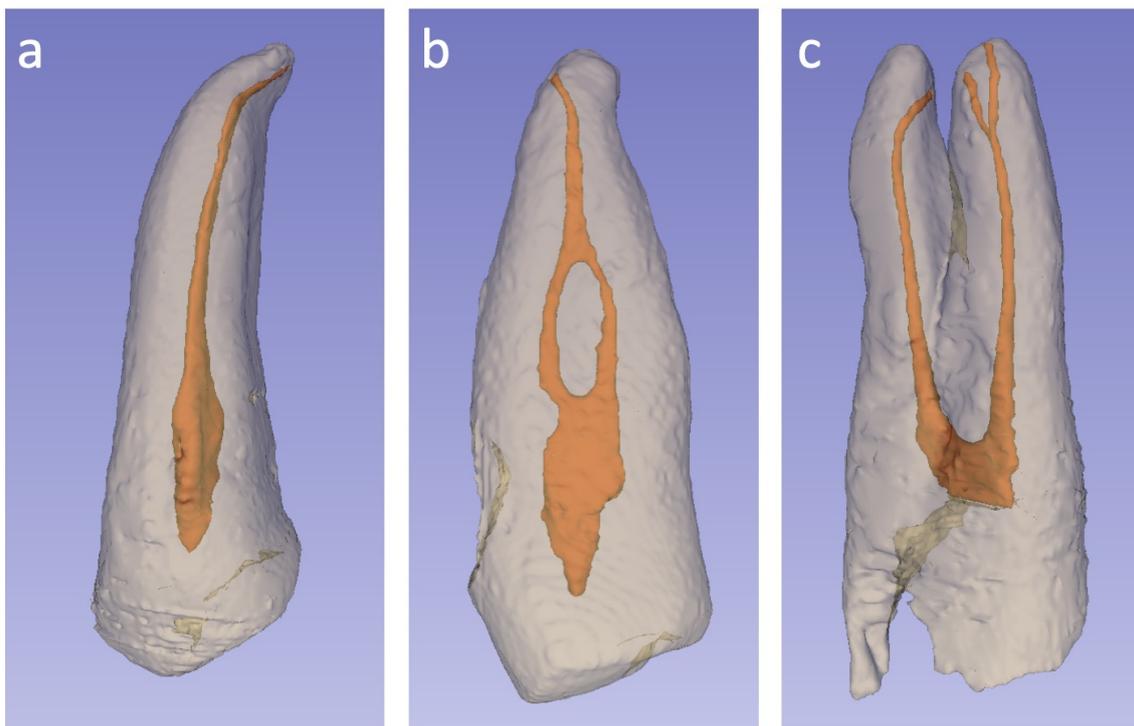


Abb. 1: Klassifikation der Wurzelkanalanatomie nach Vertucci

- a) ein Kanal mit einem Foramen
- b) zwei Kanäle, ein Kanal, ein Foramen
- c) links: ein Kanal, ein Foramen; rechts: ein Kanal, zwei Kanäle mit zwei Foramina

1.1.3. Anatomie und Topographie des Foramen apicale

Das Foramen apicale (Abb. 2) bildet den natürlichen Zugangsweg vom periapikalen Gewebe zur Pulpenhöhle des Zahns. Der apikale Anteil des Kanalsystems ist sehr individuell gestaltet. Häufig gibt der Hauptkanal dort akzessorische Kanäle ab, wodurch ein apikales Delta entsteht (Ahmed et al., 2018).

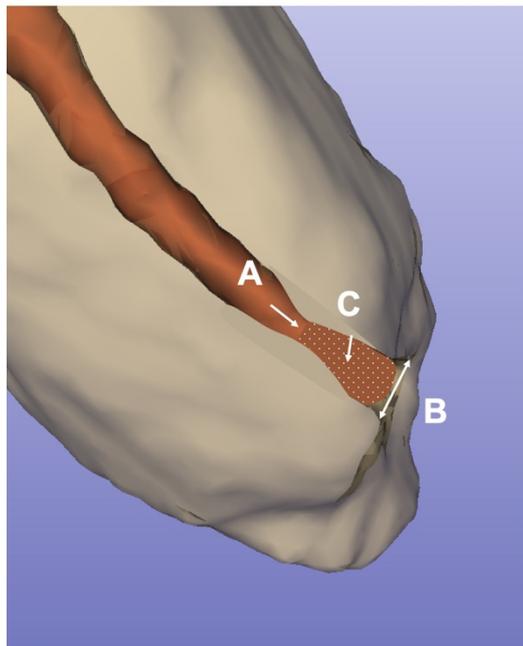


Abb. 2: Anatomie und Topographie der Wurzelspitze

Die Wurzelspitze gliedert sich anatomisch in A: Foramen physiologicum mit apikaler Konstriktion, B: Foramen apicale und C: pulpo-parodontales Mischgewebe.

Als physiologischer Apex oder auch als Foramen physiologicum wird die engste Stelle des Kanals bezeichnet (siehe Punkt A). An dieser Stelle misst der Wurzelkanal einen Durchmesser von etwa 0,15 - 0,25 mm, wobei sich die Konstriktion mit höherem Lebensalter weiter verengt. Am physiologischen Apex liegt die Zement-Dentin-Grenze. Hier beginnt nach peripher hin das Desmodont und das Pulpengewebe der Wurzel geht in ein pulpo-parodontales Mischgewebe über (E. Hellwig, 2013). Der physiologische Apex wird vom anatomischen Apex (Punkt B) differenziert. Die Distanz zwischen physiologischem und anatomischem Apex beträgt im Durchschnitt zwischen 0,5 - 1,0 mm (Strecke AB).

Zeitlebens findet eine Zementanlagerung statt, wodurch die angegebenen Streckenwerte variieren und sich vergrößern. Aufgrund dieses Phänomens ist eine genaue Vorhersage und Bestimmung der apikalen Konstriktion schwierig (Ahmed et al., 2018).

1.1.4. Gekrümmte Wurzelkanäle

Wurzelkanäle unterscheiden sich nicht nur in der Größe des Kanals und der Anzahl der Wurzelkanäle innerhalb einer Wurzel, sondern vor allem in ihrer anatomischen Varianz und den damit einhergehenden unterschiedlichen Kanalkrümmungen. Schneider führt bereits 1971 eine Einteilung der Wurzelkanalkrümmungen ein, die bis heute gültig ist und auf mathematischen Analysen basiert.

Schneider hat unter Zuhilfenahme von zweidimensionalen Röntgenbildern die Krümmung bestimmt. Er zeichnet hierfür eine Gerade ein, die von zervikal beginnend durch die Mitte der Kanalachse verläuft und eine zweite Gerade, die am Foramen apikale ansetzt und die erste Gerade in dem Punkt schneidet, an dem diese den Kanalverlauf verlässt. Der Winkel zwischen den beiden Geraden bildet die sogenannte primäre Wurzelkanalkrümmung (Schneider, 1971).

Schneider teilt die primären Wurzelkanalkrümmungen in drei Kategorien ein:

- 0° - 5° annähernd gerader Wurzelkanal
- 10° - 20° mäßige Wurzelkanalkrümmung
- 25° - 70° starke Wurzelkanalkrümmung

Wurzelkanäle weisen meist sogar mehrere Krümmungen innerhalb eines Kanals auf (Willershausen B, 2005, Nagy et al., 1995). Die wissenschaftliche Literatur belegt, dass 85 % der Kanäle Krümmungen aufweisen. Unterkiefermolaren weisen generell immer einen gekrümmten Wurzelkanalverlauf auf (Cunningham and Senia, 1992), Oberkieferprämolaren mindestens eine Kanalkrümmung, in 20 - 25 % der Fälle sogar bis zu zwei (Willershausen B, 2005).

Schneiders Einteilung wird von Cunningham und Senia (1992) und ebenso von Kartal und Cimilli im Jahre 1997 weiterentwickelt, sodass es auf dieselbe Art und Weise möglich ist, ebenso sekundäre und tertiäre Kanalkrümmungen zu bestimmen (Kartal and Cimilli, 1997, Cunningham and Senia, 1992).

1997 stellt das Team um Pruett fest, dass neben dem Krümmungswinkel auch dem Krümmungsradius eine entscheidende Bedeutung zukommt. Je kleiner der Krümmungsradius, desto schwieriger ist die Krümmung mit Instrumenten aufzubereiten und desto schneller kommt es zu Abnutzungs- und Ermüdungserscheinungen der Instrumente. Um den Krümmungsradius bestimmen zu können, werden nach Schneiders Methode die beiden Geraden eingezeichnet (Abb. 3). An dem Punkt, an dem die Geraden den Kanalverlauf verlassen, werden die Punkte A und B definiert. Zwischen den beiden Punkten befindet sich nun der gekrümmte Anteil des Wurzelkanals. Punkt A und B sind Teil eines Kreisbogens, dessen Mittelpunkt durch Anlegen eines Lotes durch die Geraden und die darauf befindlichen Punkte A und B bestimmt wird. Der Kreismittelpunkt befindet sich am Schnittpunkt der beiden Lote. Je kleiner der Radius ist, desto abrupter verläuft die Krümmung und desto schwieriger kann der Kanal aufbereitet werden (Pruett et al., 1997). Darüber hinaus trägt auch die Lage der Krümmung entscheidend zur Aufbereitungsschwierigkeit bei. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Aufbereiten von Kanälen dann am schwierigsten ist, wenn eine weit apikal einsetzende Krümmung, ein großer Krümmungswinkel sowie ein kleiner Krümmungsradius gegeben sind (Ruddle, 2002).

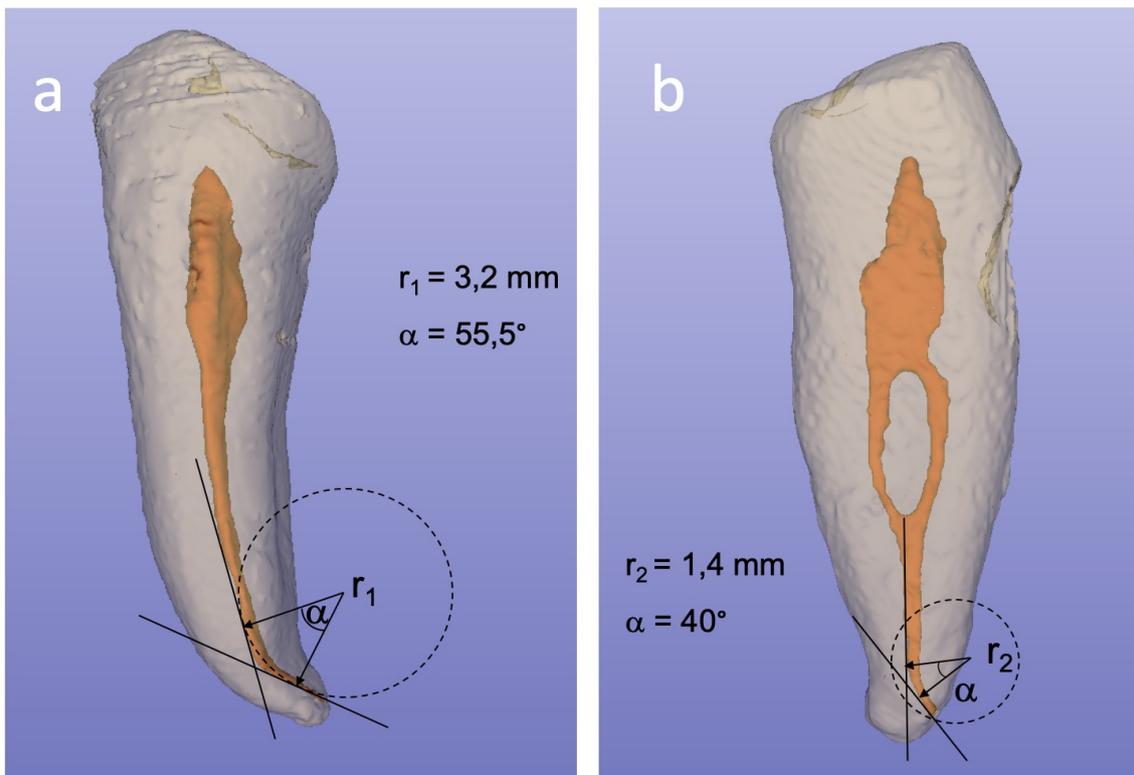


Abb. 3: Schaubild zur Bestimmung des Krümmungsradius' des Wurzelkanals nach Pruett

a) großer Krümmungsradius, damit leichter aufzubereiten

b) kleiner Krümmungsradius, damit schwerer aufzubereiten (r = Radius; α = Krümmungswinkel)

Nagy et al. teilt 1995 Wurzelkanäle nach ihrem Verlauf verschiedenen Formen zu. Er unterscheidet dabei zwischen einer

- I - Form: entspricht einem geraden Wurzelkanal
- J - Form: hier befindet sich die Wurzelkanalkrümmung im apikalen Kanaldrittel
- S - Form: es liegt eine Mehrfachkrümmung des Kanals vor
- C - Form: Krümmung des Kanals erstreckt sich über die gesamte Länge

1.1.5. Indikationen und Kontraindikationen der Wurzelkanalbehandlung

Die Hauptindikation zur Wurzelkanalbehandlung stellt die irreversible Schädigung der Pulpa, eine apikale Parodontitis oder Pulpanekrose dar. Eine weitere Indikationsstellung liegt bei fraglichem Pulpazustand vor prothetischer Versorgung vor oder wenn aus Gründen der Stabilität ein Wurzelstift verankert werden soll. Eine endodontische Behandlung muss ebenso erfolgen, wenn eine Hemisektion oder Wurzelspitzenresektion angestrebt wird (Maquin et al., 1984).

Kontraindiziert sind Wurzelkanalbehandlungen, wenn die parodontale Stabilität des Zahns nicht gewährleistet ist oder funktionell nicht wieder hergestellt werden kann, die Gesamtprognose schlecht ist oder der Zahn nicht sinnvoll in das prothetische Gesamtkonzept integriert werden kann (Maquin et al., 1984).

1.1.6. Ziele der Wurzelkanalbehandlung

Das primäre und erstrebenswerte Ziel der konservierenden zahnheilkundlichen Behandlung liegt darin, den Beschwerden bereitenden Zahn in seiner Vitalität – falls möglich – zu erhalten. Ist dies aufgrund der Diagnostik und klinischen Situation nicht zu erreichen, bietet die Endodontie eine Lösung. Hierbei liegt der Schwerpunkt darin, den irreparabel pulpitisches geschädigten Zahn als solchen langfristig zu erhalten, sodass die Kaufunktion für den Patienten weiter gesichert ist. Es soll sowohl die Schädigung als auch Erkrankung von umliegendem Gewebe, wie z.B. lateralem oder apikalem Parodont, sowie des Alveolarknochens verhindert werden. Bestehende und manifestierte Pathologien sollen durch eine effiziente Wurzelkanalbehandlung geheilt werden (Siqueira Junior et al., 2018). Das grundlegende Ziel ist es, dass der dreidimensionale Wurzelkanal in seinem gesamten Volumen aufbereitet und gereinigt wird, um so eine möglichst hohe Keimreduktion zu erzielen, sodass der Kanal für die spätere Wurzelfüllung optimal vorbereitet ist (Tepel, 2000, Löst K, 1992).

Bereits 1965 stellt Kakehashi (Kakehashi et al., 1965) in seiner Studie fest, dass das Vorhandensein von Mikroorganismen im pulpalen Gewebe eine entscheidende Rolle für die Pathologie des Wurzelkanalsystems spielt. Dies wird

anhand eines Tierversuchs an Ratten nachgewiesen. In der Testgruppe 1 befinden sich Ratten mit einer keimfreien oralen Flora, in Testgruppe 2 Ratten mit einer normalen Mikroflora. Im Versuch wird das Pulpengewebe der Ratten mit einem Bohrer von der Okklusalfäche her eröffnet. Nach unterschiedlichen Zeitintervallen werden die Tiere getötet und Gewebeschnitte der eröffneten Zähne erstellt. Es kann gezeigt werden, dass es bei den Ratten mit normaler oraler Bakterienflora zu Pulpanekrose mit Granulom und Abszessbildung kommt. Bei den keimfreien Tieren hingegen können keine Devitalisierung der Pulpa, kein apikales Granulom oder Abszessbildung festgestellt werden. Es kommt in dieser Testgruppe sogar zu Reparaturvorgängen im Sinne einer Dentinüberbrückung – unabhängig von der Schwere der Pulpenexposition. Die Studie zeigt deutlich auf, dass die Entfernung der Mikroorganismen aus dem Wurzelkanal ausschlaggebend für den späteren Therapieerfolg ist. Neben der gründlichen Reinigung und Desinfektion des Wurzelkanals stellt die damit verbundene Präparation eine weitere wichtige Säule dar (Peters and Wesselink, 2005). Ziel der Präparation ist es, eine konische, leicht trichterförmige Erweiterung des Kanals vom Apex bis zur koronalen Zugangskavität zu schaffen (Schilder, 1974). Der apikale Endpunkt soll dabei die schmalste Stelle des präparierten Kanals bilden (DGZMK, 2005).

Die so bearbeiteten Kanalwände sollen dem ursprünglichen Kanalverlauf entsprechen, sodass keine zusätzliche Schwächung der Wurzel stattfindet (Endodontology, 2006).

Um eine vollständige Reinigung gekrümmter Kanäle zu erreichen, wird den Behandlern viel Erfahrung und Können abverlangt (Mandel et al., 1999). Bei der Aufbereitung und Reinigung der Kanäle wird besonders dem apikalen Bereich ein hoher Einfluss auf den Therapieerfolg zugesprochen (Endodontology, 2006). Studien zeigen, dass die effiziente Aufbereitung und Reinigung des apikalen Bereichs begrenzt ist (Gambarini and Laszkiewicz, 2002, Foschi et al., 2004). Wu und Wesselink können 1995 darstellen, dass mit Hilfe der Balanced-force-Technik der apikale Bereich mit einer durchschnittlichen Kanalkrümmung von 25° effizienter gereinigt werden kann als mit Step-back- oder Crown-down-Technik (Wu and Wesselink, 1995). Die besten Ergebnisse lassen sich erzielen,

wenn die Arbeitslänge mit elektronischen und radiologischen Methoden so bestimmt wird, dass der Kanal möglichst bis an die apikale Konstriktion – entspricht der Zement-Dentin-Grenze – aufbereitet wird. Diese apikale Verengung befindet sich normalerweise zwischen 0,5 - 2 mm vor dem röntgenologischen Apex (Endodontology, 2006).

Wird der ursprüngliche Kanalverlauf beibehalten, die apikale Konstriktion nicht verlagert, der Kanal konisch (von koronal nach apikal verjüngend) ohne Stufenbildung und Verblockungen aufbereitet und die Dentinwand des Kanals nicht unnötig geschwächt, so liegen die Erfolgsraten der Wurzelkanalbehandlung abhängig vom Ausgangsbefund bei mehr als 75 - 80 % (Löst C, 1995).

1.1.7. Fehler und Probleme bei der Wurzelkanalaufbereitung

Bei der Aufbereitung von Wurzelkanälen unterschiedlichster Kanalmorphologien können sich diverse Präparationsfehler ergeben. Dies kann zum einen an der Verwendung von zu starren Feilen oder zum anderen an der falschen Handhabung und Arbeitsweise der Instrumente liegen. Präparationsfehler treten dabei häufiger bei gekrümmten Wurzelkanälen auf.

○ Stufenbildung („Ledge“)

Bei einer entstandenen Stufe kommt das Aufbereitungsinstrument vom eigentlichen Kanalverlauf ab. Das Problem hierbei besteht darin, dass die Feile stets in die Stufe hineingleitet und dort verhakt, sodass verhindert wird, dass der apikal der Stufe befindliche Kanalabschnitt aufbereitet und gereinigt werden kann.

Eine Stufe entsteht, wenn bei der Aufbereitung des Kanals zu starre Feilen verwendet werden oder der Kanal mit einer falschen Aufbereitungstechnik bearbeitet wird. Die Stufe bildet sich an der Außenkrümmung des gekrümmten Kanals (Abb. 4). Jede Feile besitzt eine Aufrichtungstendenz, die abhängig von der Materialbeschaffenheit unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Die Feilen verlassen dabei den zentralen Kanalverlauf und tragen vermehrt Dentin an der äußeren Krümmung ab. Hat sich eine

Stufe gebildet, so ist es schwierig bis unmöglich, die Instrumentenspitze in den ursprünglichen Kanalverlauf zurück zu verlagern. Besonders gefährdet für die Ausbildung einer Stufe sind gekrümmte Wurzeln mit ausgeprägter Kanalkurvatur. Kapalas und Lambrianidis stellen in ihrer Studie im Jahr 2000 fest, dass mesiobukcale, mesiolinguale und distobukcale Kanäle eine signifikant höhere Inzidenz von Stufen aufweisen, als palatinal oder distal gelegene (Kapalas and Lambrianidis, 2000, Greene and Krell, 1990). Mit Ausbildung einer Stufe geht der Verlust des Erreichens der vollständigen Arbeitslänge einher, wodurch der apikale Anteil der Wurzel inkomplett instrumentiert, gereinigt und obturiert bleibt (Jafarzadeh and Abbott, 2007).

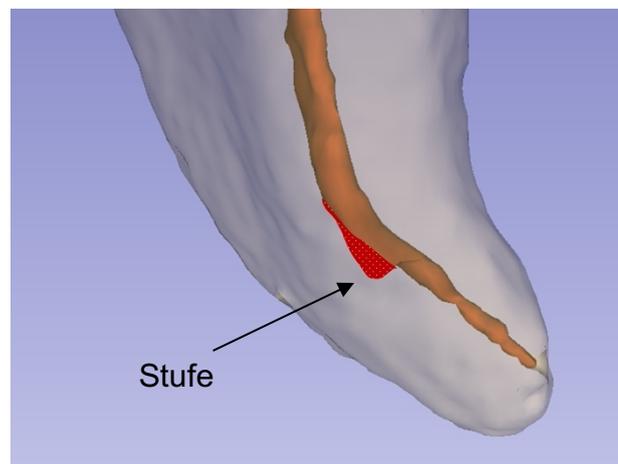


Abb. 4: Stufenbildung während der Wurzelkanalaufbereitung

Durch den Abtrag von Dentin an der Außenkurvatur im Bereich der Kanalkrümmung entsteht eine Stufe.

- Zip-Elbow-Effekt

Bei einem Zip-Elbow-Effekt wird die reguläre Kanalmorphologie durch die Aufbereitungsfeile dahingehend verändert, dass es an der Innenkurvatur sowie Außenkurvatur zu einer Aussackung kommt. Dadurch wird übermäßig Dentin abgetragen, was die Stabilität der Wurzel insgesamt schwächt. Bereiche des eigentlichen Kanalverlaufs werden mit der Feile eventuell nicht erreicht, sodass die mechanische Reinigung nicht vollständig garantiert werden kann. Durch die sich ergebende unregelmä-

ßige Konizität mit Aussackung und Verengung kann in Folge auch das Füllen des apikalen Wurzelkanalanteils gefährdet sein (Nagy et al., 1997).

Beim Zip-Elbow-Effekt kommt es durch die Rückstellkraft der Wurzelkanalfeile im apikalen Kanaldrittel zu einem übermäßigen Dentinabtrag an der Außenkrümmung und dadurch zur Bildung eines apikalen Trichters/ Aussackung (Zip) (Abb. 5).

Zeitgleich kommt es an der Stelle mit der maximalen Krümmung im koronalen und mittleren Kanaldrittel zum gegenläufigen Effekt an der Innenkrümmung, wodurch ein Isthmus (Elbow) entsteht. Die daraus resultierende Form des präparierten Kanals ähnelt einer Sanduhr und wird deshalb auch als „Sanduhreffekt“ bezeichnet.

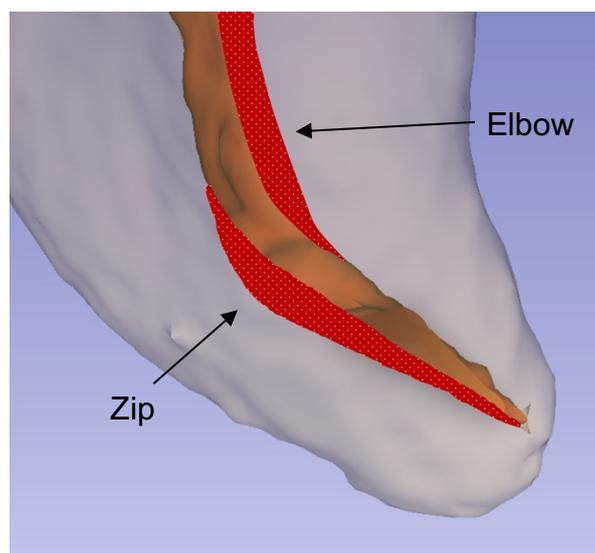


Abb. 5: Zip-Elbow-Effekt bei fehlerhafter Wurzelkanalaufbereitung

Unregelmäßiger Kanalabtrag außerhalb der regulären Kanalmorphologie durch die Feile führt zu einer Aussackung im apikalen Bereich (Zip), was durch die Rückstellkraft der Feile bei gleichzeitigem Dentinabtrag an der maximalen Krümmung des Kanals an der Innenkrümmung (Elbow) bedingt ist.

- Apikale und laterale Perforation

Bei der apikalen wie auch lateralen Perforation kommt die Feile während der Aufbereitung von der regulären Kanalmorphologie ab und dünnt die Dentinwand aus. Durch die Perforation verschlechtert sich zum einen die Prognose und Erhaltungswürdigkeit des Zahns stark, zum anderen kann

es im umliegenden Gewebe (Desmodont, Knochen) zu Infektionen kommen. Diese können durch Überpressen von Debris, Spülflüssigkeit oder Füllungsmaterial in den periradikulären Bereich verursacht werden (Froughreyhani et al., 2013). Es wird zwischen der apikalen und der lateralen Perforation unterschieden. Perforationen im apikalen Bereich entstehen durch Verwendung von zu starren Feilen, deren Instrumentenspitzen schneidend sind und rotierend verwendet werden.

Bei der apikalen Perforation verfolgt die Feilenspitze die Krümmung des Kanals nicht korrekt und arbeitet sich am Krümmungsbeginn des Kanals geradeaus weiter Richtung Zahnaußenwand (AlRahabi, 2017) (Abb. 6a). Eine laterale Perforation – auch als „Strip Perforation“ bezeichnet – entsteht in gekrümmten Kanälen durch das Aufrichten der Feile innerhalb des Kanals, was die Innenkurvatur des mittleren Kanalabschnitts betrifft (Abb. 6b). Dadurch kommt es zum übermäßigen Abtrag der Dentinwand, wodurch diese geschwächt und ausgedünnt wird, bis es zu einer länglichen Perforation kommt (Khanna et al., 2017). Die Prognose des Zahns verschlechtert sich deutlich, da diese Instabilisierung zu einem Bruch der Wurzel führen kann.

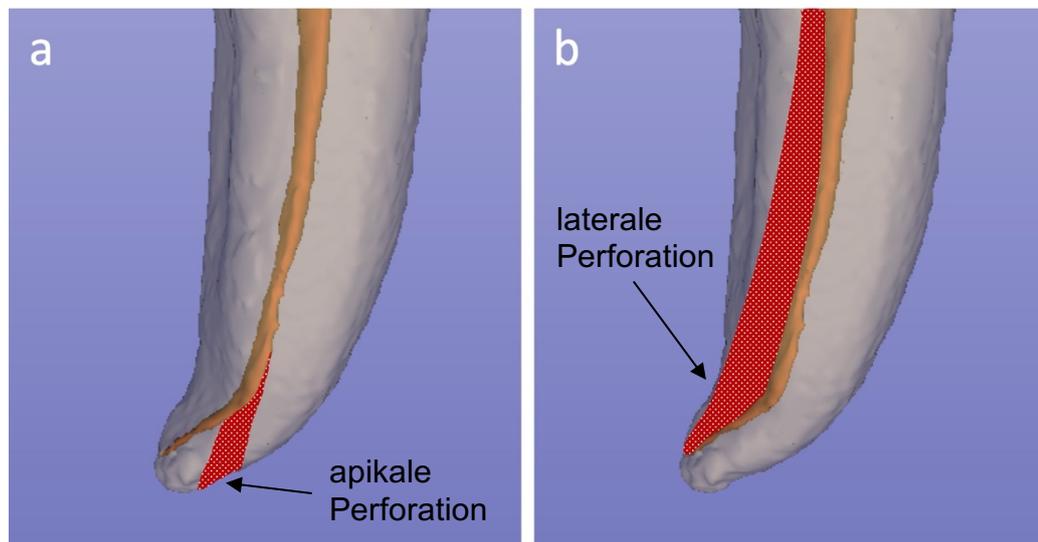


Abb. 6: Apikale und laterale Perforation bei der Wurzelkanalaufbereitung

- a) apikale Perforation, verursacht durch zu starre Feilen, die in rotierender Bewegung mit schneidender Spitze angewendet werden
- b) laterale Perforation, verursacht durch Aufrichten der Feile in gekrümmten Kanälen
Bei beiden Perforationen verlässt die Feile den regulären Kanalverlauf, sodass es in Folge zu einer via falsa kommt.

- Apikale Blockade

Bei der apikalen Blockade kommt es zur irreversiblen Verblockung des apikalen Bereichs durch verdichtete und nach apikal transportierte Dentinspäne, avitales Gewebe, frakturierte Instrumente oder Wurzelfüllmaterial. Die apikale Blockade spielt für die vorliegende Studie die wichtigste Rolle, da am Ende jedes Aufbereitungsprotokolls kontrolliert wird, ob eine Kanaldurchgängigkeit erreicht werden kann oder nicht.

Aufgrund der apikalen Blockade kann die gewünschte Arbeitslänge meist nicht erreicht werden. Es kommt dadurch zu einer unvollständigen Aufbereitung, Reinigung und Desinfektion sowie später zu mangelnder apikaler Abdichtung der Wurzelfüllung (Machado et al., 2016).

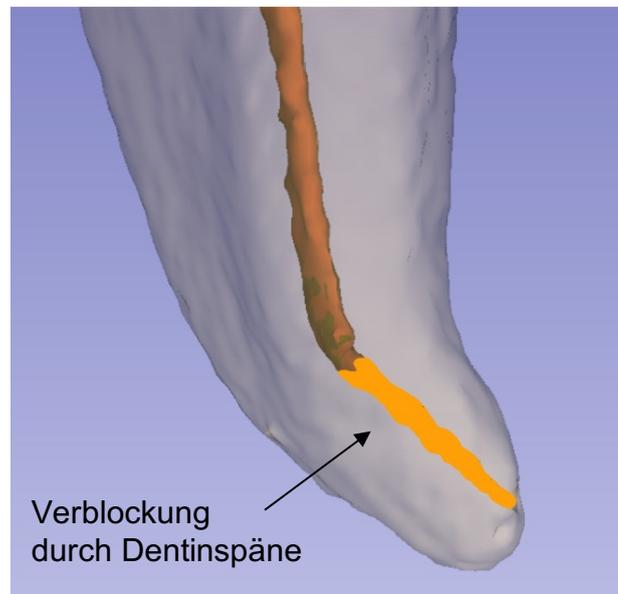


Abb. 7: Apikale Blockade bei der Wurzelkanalaufbereitung

Der apikale Kanalbereich wird durch Abrieb verstopft, was verhindert, dass eine vollständige Aufbereitung und Desinfektion des Wurzelkanalsystems erreicht werden.

1.1.8. Unter- und Überinstrumentierung des Wurzelkanals

Wenn es beim Aufbereiten des Kanals zur Überinstrumentierung kommt, wird das physiologische Foramen unerwünschterweise erweitert, an der Wurzelkurvatur begradigt oder weiter Richtung Foramen apicale verlagert. Dadurch kann es zu Verschiebungen von Bakterien in den periapikalen Bereich durch überpresste Debris kommen (Tanalp and Güngör, 2014). Der Begriff „Debris“ lässt sich mit „Trümmer, Überbleibsel, Rest, Abfall, Schutt, Geröll“ übersetzen. In der Endodontie versteht man unter diesem Begriff eine Mischung aus vitalen und avitalen Pulpenresten, sowie Dentinspänen, die während der Kanalpräparation entstehen.

Wird Material über den Apex Richtung umgebendes periapikales Gewebe überpresst, kann es zu Schwellungen und Schmerzen führen (Harrington and Natkin, 1992). Überexpandiertes Wurzelfüllmaterial kann eine erschwerte und verzögerte Heilung zur Folge haben (Klayman and Brilliant, 1975, Torabinejad and Walton, 1991). Bei der Unterinstrumentierung des Wurzelkanals hingegen wird im Kanal infiziertes Gewebe durch die unzureichende Aufbereitung belassen. Daraus resultiert eine mangelnde Reinigung und Desinfektion des Wurzelkanalsystems, wodurch der apikale Verschluss limitiert ist (Siqueira Junior et al., 2018).

1.2. Reinigung des Wurzelkanalsystems

1.2.1. Chemische Wurzelkanalreinigung

Das Hauptaugenmerk der Wurzelkanalaufbereitung liegt darin, die Bakterien-, Toxin- und Keimanzahl im Kanal möglichst vollständig zu eliminieren (Sundqvist et al., 1998). Bereits 1992 stellt Lin et al. fest, dass der Hauptgrund für einen Behandlungsmisserfolg im Verbleib von Mikroorganismen im Kanal begründet liegt (Lin et al., 1992, Sakamoto et al., 2007).

Es treten vor allem gramnegative anaerobe Stäbchen, grampositive anaerobe Kokken, fakultative und grampositive anaerobe Stäbchen, grampositive fakultative Streptokokken sowie Laktobazillen auf (Waltimo et al., 2003). Je nach vorliegendem Krankheitsbild unterscheidet sich die Bakterienzusammensetzung im Wurzelkanal. So liegen andere Bakterien bei einer symptomatischen als bei einer asymptomatischen endodontischen Infektion vor. Diese Gesetzmäßigkeit trifft ebenso auch bei einer Erstinfektion bzw. Reinfektion des Zahns zu (Sakamoto et al., 2006). Es kann durch Peters 2001 nachgewiesen werden, dass die reine Instrumentierung des Kanals zwar zu einer Bakterienreduzierung führt, jedoch keine vollständige Bakterienfreiheit erreicht werden kann (Peters et al., 2001). Durch die rein instrumentelle Aufbereitung wird nur ca. 1/3 der Oberfläche erreicht und gereinigt (Pérez et al., 2020). Aus diesem Grund erfolgt als Erweiterung zur mechanischen Aufbereitung die chemische Reinigung mittels antibakterieller Spüllösungen. Durch Kombination beider Techniken kann eine Reduktion der Bakterien um bis zu 95 % erzielt werden (Blome et al., 2008). Spüllösungen sollen den Abtransport von Debris aus dem Kanal gewährleisten und eine eventuelle Blockade verhindern, desinfizierend wirken und die Keimanzahl reduzieren, organisches und anorganisches Gewebe auflösen, den entstehenden Smear Layer entfernen, als Gleitmittel für die Instrumente während der Präparation und Aufbereitung dienen und Endotoxine (Lypopolysaccharide) entfernen. Dabei dürfen sie keine zytotoxische Wirkung auf das umliegende Gewebe ausüben (Rossi-Fedele et al., 2012).

Zu den am häufigsten verwendeten Spüllösungen zählen das Natriumhypochlorit, EDTA (Ethyldiamintetraacetat) sowie Chlorhexamed bei Revisionen.

1.2.1.1. Natriumhypochlorit

Seit den 1920er Jahren zählt Natriumhypochlorit (NaOCl) zu der in der endodontischen Behandlung am meisten angewendeten Spüllösung und gilt bis heute als Desinfektionslösung der ersten Wahl (Zehnder et al., 2003). So findet NaOCl in den Konzentrationen zwischen 1 % und 5 % seine Anwendung und ist in der Lage, Membranen von Mikroorganismen zu zerstören und den Biofilm zu

entfernen. Dazu zählen beispielsweise *Enterococcus faecalis*, *Streptococcus gordonii*, *Streptococcus anginosus* und *Lactobacillus paracasei* (Chávez de Paz et al., 2010). Es kann zudem sowohl vitales als auch nekrotisches pulpaes Gewebe sowie die sich im Smear Layer befindlichen organischen Anteile auflösen. Für die Feilen dient es zeitgleich während der Aufbereitung als Gleitmittel und erleichtert die Führung der Feilen (Baumgartner and Cuenin, 1992, Naenni et al., 2004, Mohammadi, 2008).

Boutsioukis kann 2010 in seiner Studie zeigen, dass NaOCl zudem eine hohe Effektivität bei der Entfernung der Debris zukommt, wobei diese auch von dem Faktor der Eindringtiefe der Nadel während der Spülung abhängig ist (Boutsioukis et al., 2010).

1.2.1.2. Ethylendiamintetraacetat (EDTA)/Chelatoren

EDTA wird vor allem dazu verwendet, um den Smear Layer im Kanal zu entfernen. Es ist in flüssiger oder gelartiger Form erhältlich. Die empfohlene Konzentration liegt zwischen 15 - 20 %. Das flüssige EDTA setzt sich meist aus 15 - 17 % EDTA und Natriumhydroxid zusammen, während das gelartige Präparat aus 15 % EDTA und 10 % Harnstoffperoxid besteht. EDTA ist in der Lage, aus dem Dentin Kalzium herauszulösen, den Smear Layer, der während der Präparation entsteht, aufzulösen und ermöglicht so den Zutritt der Spüllösung in die Dentintubuli (Nygaard-Ostby, 1962). Der gewebeauflösende Effekt ist bei EDTA im Vergleich zu NaOCl deutlich geringer (Grawehr et al., 2003). Aus diesem Grund wird die Verwendung beider Spüllösungen während der Aufbereitung und Reinigung des Wurzelkanals empfohlen (Bystrom and Sundqvist, 1985).

1.2.1.3. Chlorhexidin in 2%iger-Konzentration bei der Revision

Chlorhexidin kann in der Endodontologie als Spülflüssigkeit oder als medikamentöse Einlage angewendet werden. Es weist eine hohe antimikrobielle Aktivität auf, ist geruchlos, in seiner chemischen Struktur stabil, in Wasser lös-

lich und färbt nicht. Es besitzt dabei eine niedrigere Zytotoxizität als NaOCl. Es hemmt Metallproteinasen und kann in Gelform die Debris innerhalb des Kanals in einer Suspension halten (rheologischer Effekt) (Gomes et al., 2013).

Chlorhexidin in 2%iger Konzentration wird in der Endodontologie als Spüllösung vor allem bei Revisionen eingesetzt, um den Mikroorganismus *Enterococcus faecalis* erfolgreich aus dem Kanallinneren zu beseitigen. Dieser kann vermehrt – zwischen 24 % bis 77 % – bei persistierenden, asymptomatisch verlaufenden Infektionen nachgewiesen werden. Das gehäufte Auftreten lässt sich auf verschiedene Faktoren zurückführen. *Enterococcus faecalis* setzt sich durch unterschiedlichste Überlebens- und Virulenzfaktoren im Vergleich zu seinen Antagonisten durch. Es gelingt ihm beispielsweise sich in die Dentintubuli einzunistet und ohne Nahrungszufuhr zu überleben (Stuart et al., 2006). Es wird zur erfolgreichen Entfernung des Mikroorganismus angeraten, den apikalen Bereich manuell durch die Anwendung von größeren Feilen stärker zu bearbeiten und zusätzlich soll eine chemische Reinigung mittels Kombination aus Chlorhexidin und Natriumhypochlorid erfolgen (Stuart et al., 2006). Chlorhexidin kann alternativ zu NaOCl bei Resorptionsvorgängen, erweiterten Foramina oder bei offenen Apices und Perforationen sowie bei Vorliegen einer Allergie gegen bleichende Lösungen verwendet werden (Gomes et al., 2013).

1.2.2. Angewandte Spültechniken

Spüllösungen können auf verschiedene Weise in den Kanal eingebracht werden. Die Effektivität kann durch unterschiedliche Spültechniken und Aktivierungsmöglichkeiten variieren. Moorers und Wesselink stellen 1982 bereits fest, dass ein optimales Ergebnis vor allem durch einen regelmäßigen Austausch der Spüllösung und ein möglichst großes Lösungsvolumen im Kanal bestimmt wird (Moorers and Wesselink, 1982, van der Sluis et al., 2006, van der Sluis et al., 2007a, van der Sluis et al., 2007b). Zudem spielen für den Wirkungserfolg mehrere Faktoren, beispielsweise wie lange die Lösung im Kanal einwirkt und wie weit die Lösung über eine Spülkanüle in den Kanal eindringen kann, eine entscheidende Rolle (Sedgley et al., 2005, Abou-Rass and Piccinino, 1982). Es

werden möglichst feine Spülkanülen empfohlen, da diese am weitesten in Richtung apikal in den Kanal vordringen können. Dies tiefe Vordringen ist notwendig, da die Spüllösung nur ein geringes Wirkungsspektrum um die Kanülenspitze herum entfalten kann (Kahn et al., 1995). Dünne Kanülenspitzen bringen jedoch ein höheres Frakturrisiko mit sich, und die Flüssigkeit muss mit einem höheren Druck durch die feine Öffnung in den Kanal appliziert werden mit der Gefahr der Überpressung über das Foramen apicale hinaus. (Abou-Rass and Piccinino, 1982, Kahn et al., 1995).

Die Wirksamkeit der Spüllösungen kann auf unterschiedlichste Arten verbessert werden. Es besteht beispielsweise die Möglichkeit der photodynamischen Therapie, bei der durch Einsatz eines Lasers die Spüllösung – mittels in den Kanal eingebrachter Glas- oder Lichtleiterfaserspitze – bestrahlt und dadurch aktiviert wird (Xhevdet et al., 2014, Arslan et al., 2015, Li et al., 2015). Weitere Möglichkeiten die Spülwirkung zu optimieren, liegt in der Nutzung von schall- und ultraschallgestützten Spülungen (Plotino et al., 2019).

Im Folgenden wird auf die in der vorliegenden Studie angewendeten Spültechniken eingegangen.

1.2.2.1. Einfache, manuelle Spülung

Die einfache, manuelle Spülung spielt bei der Reinigung und Aufbereitung des Kanals eine entscheidende Rolle, um Debris schrittweise aus dem Kanal zu befördern und das Risiko einer apikalen Blockade zu minimieren.

Hierbei wird die Spülflüssigkeit mittels Einmalspritze und einer feinen Kanüle appliziert. Die manuelle Spülung erfolgt während der Versuche nach jedem Aufbereitungsschritt. In der durchgeführten Studie wird H₂O als Spülmedium verwendet. Bei der regulären Aufbereitung eines natürlichen Zahnes wird auf die oben bereits genannten Spülflüssigkeiten zurückgegriffen (siehe 1.2.1.). Die Kanüle wird soweit wie möglich Richtung apikal – also bis zum Kontakt mit der Wurzelwandung – in den Kanal eingebracht und dann leicht zurückgezogen, sodass die Kanüle wieder kontaktlos im Kanal liegt. Dadurch kann das Risiko des Überpressens der Spüllösung in das periapikale Gewebe minimiert werden.

Bei Vorliegen eines gekrümmten Kanals bietet es sich an, die Kanüle leicht vorzubiegen, um möglichst weit nach apikal vordringen zu können (Gu et al., 2009). Die Spülflüssigkeit sollte durch die Behandler drucklos und langsam appliziert werden (Hülsmann and Hahn, 2000). Laut Empfehlung von van der Sluis soll die Kanülenspitze bis 1 mm vor die zuvor bestimmte Arbeitslänge eingebracht und erst dann die Spülung begonnen werden (van der Sluis et al., 2006). Kanülen unterscheiden sich zum einen im Durchmesser, zum andern in der Gestaltung der Spitze und der damit einhergehenden Lokalisation der Öffnung, aus der das Spülmedium in den Kanal fließt. Meist liegt die Öffnung an der Kanülenspitze, es gibt aber auch seitlich gelegene Öffnungen, mit dem Vorteil, die Gefahr des apikalen Überpressens zu minimieren (Marroquin, 2012, Hauser et al., 2007, Kahn et al., 1995). Die manuelle Spülung kann durch die Behandler unkompliziert umgesetzt werden. Die Eindringtiefe der Nadel ist dabei gut steuerbar und die Mengenabgabe der Flüssigkeit leicht zu kontrollieren (van der Sluis et al., 2006). Jedoch ist nachgewiesenermaßen die Spülwirkung im Vergleich zur mechanisch aktivierten Spülung geringer. Eine Vielzahl von Studien belegt, dass mit der einfachen, manuellen Spülung Seitenkanäle und Ausbuchtungen innerhalb des Kanals nur unzureichend erreicht werden können (Goodman et al., 1985, Weller et al., 1980, Lee et al., 2004).

1.2.2.2. Schallaktivierte Spülung

Seit 2015 ist die schallaktivierte Endospülspitze EDDY® der Firma VDW auf dem Markt erhältlich. Es handelt sich um eine Polyamidspitze, die auf das Gewinde des Airscalers aufgeschraubt wird. Laut Herstellerangaben soll der Airscaler auf maximaler Leistungsstufe bei 5000 - 6000 Hertz und einem Druck von maximal 3 bar betrieben werden. Wie auch die Endofeilen weist EDDY® Längenmarkierungen auf, um die Eindringtiefe in den Kanal leichter bestimmen zu können. Die Spitze misst in der Gesamtlänge 28 mm und hat an der Spitze einen Durchmesser von 0,2 mm (GmbH, 2014, T., 2009). Es handelt sich bei der Spülspitze um ein Einmalprodukt, das nach Verwendung verworfen wird. Zeppenfeld, wie auch Neuhaus, stellen fest, dass einer der großen Vorteile ge-

genüber den bei der passiven ultraschallaktivierten Spülung (PUI) verwendeten Metallspitzen und -drähten darin liegt, dass es beim Kontakt mit der Kanalwand zu keinem Abtrag des Dentins kommt, da die Spitzen wesentlich weicher und flexibler sind. Zudem sind sie genau aus diesem Grund auch optimal einsetzbar bei schwierigen, gekrümmten Kanalverläufen (Zeppenfeld, 2015, Neuhaus et al., 2016). Der Energieverlust von der Schallerzeugung bis hin zur gewünschten Aktivierung der Instrumentenspitze kann durch die Kombination der niederfrequenten Aktivierung und dem verwendeten Polyamidmaterial möglichst gering gehalten werden (Zeppenfeld, 2015). VDW empfiehlt, dass die Spülspitze bei geschlossenem Apex bis auf die bestimmte Arbeitslänge in den Kanal eingeführt werden soll. Aus Sicherheitsgründen sollte bei einem offenen Apex EDDY® mit der Spitze 1 mm vor der Arbeitslänge enden (Zeppenfeld, 2015). Die Polyamidspülspitze EDDY® sollte erst nach Einbringen in den Kanal aktiviert werden. Dies ist laut Hersteller wichtig, da die Spitze ohne Widerstand der Spüllösung frakturieren könnte. Während der Spülzyklen von bis zu 30 Sekunden soll EDDY® ohne Druck in kleinen Amplituden vertikal bewegt werden (GmbH, 2014).

Aufgrund der erst im Jahr 2015 erfolgten Markteinführung des EDDY® liegen bis dato wenige Studien vor. Bisher können folgende Erkenntnisse gewonnen werden: Im Vergleich zur passiven Ultraschallspülung kann bei Verwendung der Polyamidspülspitze in Kombination mit NaOCl als Spülmedium – sowohl in geraden, als auch gekrümmten Kanälen – mindestens dieselbe Reduktion von Mikroorganismen nachgewiesen werden (Neuhaus et al., 2016). Einige Studien weisen nach, dass die schallaktivierte Spülung der Effizienz der manuellen Spülung deutlich überlegen ist. So können PUI als auch EDDY® Smear Layer und Debris besser entfernen als die rein manuell ausgeführte Spülung (Neuhaus et al., 2016, Urban et al., 2017). Dies können Hergt et al. und auch Donnemeyer in Bezug auf die Entfernung von Ca(OH)_2 aus dem Kanal ebenfalls bestätigen (HERGT, 2017, Donnemeyer et al., 2019). Zeng et al. halten in ihrer Studie dagegen fest, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen der schallakti-

vierten Spülung und der manuellen Spülung in Bezug auf die antibakterielle Wirkung feststellbar sind (Zeng et al., 2018).

1.3. Patency-Technik

Eine spezielle Art der Aufbereitung des Wurzelkanals stellt die „Patency-Technik“ dar (Englisch: Patency = Durchgängigkeit), die von H. Schilder 1974 entwickelt und im Jahre 1989 von Buchanan überarbeitet und detaillierter beschrieben wird. Bei diesem Konzept wird vor allem der Aufbereitung der apikalen Region des Wurzelkanals eine große Bedeutung für den späteren Therapieerfolg zugesprochen. Das Patency-Konzept sieht vor, dass während der Aufbereitung mit einer Zwischenhandfeile – Buchanan empfiehlt die Verwendung einer kleinen und flexiblen K-Feile (Stahl-Handfeile) – etwa 0,5 bis 1 mm über die apikale Konstriktion hinaus instrumentiert wird. Dadurch soll die Ansammlung von Debris, also Pulpafragmenten, Dentinchips und anderen Rückständen, im apikalen Bereich unterbunden und die Wirkung der verwendeten Spüllösung verbessert werden. Das Foramen selbst soll dabei nicht erweitert werden (Buchanan, 1989).

Bei der Literaturrecherche ergeben sich unterschiedliche Angaben zur Größe der zu verwendenden Patency-Feile zwischen ISO-Größe 10 - 20 (Cailleateau and Mullaney, 1997). Die Feilen werden unter 2.2.2. im Einzelnen beschrieben. Masson und Goldberg finden heraus, dass bei Verwendung einer Patency-Feile der Größe #20, der Transport des Debris über das apikale Foramen einen prozentualen Wert von 56,6 % erreicht (Goldberg and Massone, 2002). Aufgrund der großen Menge sollte auf kleinere Feilen zurückgegriffen werden. Kritiker sehen in der Verwendung von zu großen Patency-Feilen auch die Gefahr, dass im Fall einer Bindung der Feile an das Foramen eine embolische Wirkung entsteht und so die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, dass Debris über das Foramen extrudiert wird (Souza, 2003). Die Patency-Feile sollte deshalb laut Souza zwei Größen kleiner sein, als das Instrument, das an das Foramen bindet.

Es ist wichtig zu verstehen, dass die Beibehaltung der apikalen Patency nicht gleichzeitig die Reinigung des Foramens bedeutet, sondern lediglich eine apikale Blockade durch beispielsweise eingeklemmte Dentinchips vermeidet. Die apikale Reinigung und die apikale Durchgängigkeit müssen als zwei verschiedene Aspekte angesehen werden (Souza, 2003). Die apikale Patency dient dem mechanischen Ziel und wird während der Aufbereitung hergestellt, um den Zugang zum Foramen und die Arbeitslänge beizubehalten. Die mechanische Reinigung stellt die Voraussetzung für das zweite Ziel dar, nämlich das biologische, die apikale Reinigung. Der apikale Bereich soll am Ende keimarm gereinigt sein, was z.B. durch Spüllösungen erreicht wird (Souza, 2006).

Laut Richtlinien der European Society of Endodontology soll der präparierte Wurzelkanal dem Umfang des nicht aufbereiteten Kanals entsprechen (Endodontology, 2001). Goldberg und Massone untersuchen in ihrer Studie 2002, ob eine Patency-Feile am apikalen Foramen einen Transport verursacht (Goldberg and Massone, 2002). Wenn bei der Präparation eine Abweichung vom natürlichen Kanalverlauf erfolgt, wird von einem sogenannten Transport gesprochen (Peters, 2004). Die Wurzelkanäle werden dabei dreimal hintereinander mit einer Patency-Feile um einen Millimeter über das Foramen bearbeitet. Es werden unterschiedlich große Patency-Feilen eingesetzt (#10 - #25 aus Stahl, sowie NiTi #15 - #25). Fotografisch werden die Foramina jeweils im Ausgangszustand sowie auch nach jedem Instrumenteneinsatz dokumentiert. Für die Auswertung werden die Bilder übereinander projiziert und verglichen, ob ein Transport vorliegt oder nicht (Goldberg and Massone, 2002). In 60 % der Fälle kann ein Transport festgestellt werden, wobei es unabhängig davon ist, ob eine Stahl- oder NiTi-Feile benutzt wird. In 33,3 % der Fälle kommt es bereits bei Einsatz einer #10 K-Feile zu einer Veränderung des Durchmessers am Foramen. Diese nimmt mit steigender Instrumentengröße proportional zu (Goldberg and Massone, 2002).

In der Wissenschaft wird bis heute kontrovers diskutiert, bis zu welchem Punkt der Kanal aufbereitet und abgefüllt werden sollte, um die besten Therapieer-

gebnisse zu erzielen. Viele Autoren bevorzugen die Aufbereitung bis zur apikalen Konstriktion (Kuttler, 1955, Ricucci, 1998, Ricucci and Langeland, 1998). Souza beispielsweise schlägt vor, dass bei marktoten Zähnen der Zementkanal mit in die Präparation einbezogen werden solle (Souza, 1998). Laut Schilder soll unabhängig des Befundes – vitale oder nekrotische Pulpa – die Aufbereitung am radiologischen Apex enden (Schilder, 1974). Alleine der Zementkanal eines Zahnes fasst laut Souza und Cohen bei einer Länge von 1 mm Lebensraum Platz für rund 80.000 Mikroorganismen (Souza, 2006, Cohen S, 1994). Dabei handelt es sich ausschließlich um Anaerobier (Leonardi et al., 2007).

Befürworter sehen in der Aufbereitung bis zum radiologischen Apex die einzige Möglichkeit, den gesamten Kanal mechanisch aufzuarbeiten und alle bakteriellen und sonstigen organischen Bestandteile zu entfernen. Gleichzeitig werden laut Buchanan, Souza und Flanders Aufbereitungsfehler (Perforation, Stufenbildung, Verlust der Arbeitslänge) reduziert (Souza, 2006, Buchanan, 1989, Flanders, 2002).

Gegner hingegen befürchten, dass es dabei zum Transport von infiziertem Gewebe über den Apex hinaus und zur mechanischen Traumatisierung des periapikalen Gewebes kommt (Ricucci and Langeland, 1998). Lambrianidis et al. versuchen 2001 genau diese Frage in ihrer Studie zu klären. Sie erforschen, ob der Erhalt der Patency während der Aufbereitung einen signifikanten Einfluss auf die Menge des über den Apex beförderten Debris nimmt.

In den *in vitro* durchgeführten Versuchsreihen der genannten Arbeit werden Frontzähne mit Step-back-Technik aufbereitet und die Menge des über den Apex extrudierten Materials gewogen. Vor Beginn der Aufbereitung werden die Zähne auf ihre Durchgängigkeit geprüft. Das Foramen wird während der Aufbereitung bewusst nicht mehr instrumentiert. Am Ende der Aufbereitung wird mit einer Feile #30 das Material 3 mm über den Apex und über die Konstriktion hinausgeschoben und gewogen. Gleichzeitig entsteht eine neue Konstriktion, die sich nun 1,5 mm Richtung koronal der alten Konstriktion befindet. Dieselben Kanäle werden nun erneut in Step-back-Technik aufbereitet. Auch hier wird

wieder das extrudierte Material gewogen. Die Menge des extrudierten Debris unterscheidet sich dabei signifikant vor und nach Konstriktionserweiterung. Es wird in den Proben mit intakter Konstriktion insgesamt mehr Material extrudiert. Lambrianidis vergleicht die gewonnenen Ergebnisse mit Voruntersuchungen, die genau denselben Versuchsaufbau nutzen, wobei die Aufbereitung unter Erhalt der Patency erfolgt. Er kommt zu der Schlussfolgerung, dass es in den Fällen, in denen die Patency gewahrt wird, keine signifikanten Unterschiede vor und nach Erweiterung des Foramendurchmessers gibt (Lambrianidis et al., 2001).

Aufgrund der Traumatisierung des periapikalen Gewebes gehen einige Autoren davon aus, dass die postoperativen Schmerzen höher sind ohne Einhaltung der Patency während der Aufbereitung. Marwa E. Sharaan widerlegt dies jedoch in seiner Untersuchung. Er lässt die Patienten ihre Schmerzen vor der Behandlung sowie 6, 12, 18, 24 und 48 Stunden nach der Wurzelkanalbehandlung aufzeichnen. Dabei lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Testgruppen feststellen (Gruppe I: mit apikaler Durchgängigkeit; Gruppe II: ohne apikale Durchgängigkeit) (Marwa E Sharaan, 2012;1).

Auch Izu et al. beschäftigen sich 2004 mit der Frage, ob mit Hilfe von Spülflüssigkeiten – in diesem Fall Natriumhypochlorid – die Kontamination des periapikalen Gewebes über die kontaminierte Patency-Feile zu verhindern ist (Izu et al., 2004). Auf dem Weg von koronal nach apikal durchdringt die Patency-Feile Kanalabschnitte, die eventuell noch nicht vollständig gereinigt und aufbereitet sind, und wird dabei kontaminiert. Wird die Patency-Feile über das Foramen instrumentiert, besteht nun die Gefahr der Keimverschleppung. Izu et al. untersuchen in ihrer Studie die Wirkung von 5,25%iger Natriumhypochloridlösung. Es kann gezeigt werden, dass bei Einsatz von NaOCl keine Verschleppung von Bakterien in das periapikale Gewebe stattfindet. In den Gegenproben wird hingegen kein NaOCl eingesetzt. Hier zeigen die Proben, dass es zu 100%igem Bakterienwachstum durch die infizierte Feile kommt (Izu et al., 2004).

Dr. Raphael Bellamy erklärt in einem Beitrag der *Irish Dentist* 2003, warum es wichtig ist, die apikale Durchgängigkeit einzuhalten und sich dabei nicht nur auf den Wurzelkanal zu beschränken (Bellamy, 2003). Er führt darin an, dass die Befürchtung unnötig sei, dass es zu einem Überfüllen des Wurzelkanals durch den apikalen Austritt der Feile während der Aufbereitung kommt. Ein Überfüllen des Kanals über den Apex hinaus sollte zweifelsfrei vermieden werden, ist jedoch klinisch nicht mit einem Versagen der Therapie gleichzusetzen. Diese Aussagen stützt er mit radiologischen Aufnahmen. Darin ist deutlich die knöcherne Regeneration über einen 20-monatigen Verlauf erkennbar. Im Vergleich dazu führt er einen insuffizient aufbereiteten Kanal mit Unterfüllung an, was im Verlauf als Misserfolg gewertet werden kann. Er ist daher der Ansicht, dass der Zahn bis zu dem Punkt zu füllen ist, an dem der Wurzelkanal in das parodontale Ligament übergeht, um später eine ideale Abdichtung des Kanals erzielen zu können. Er ist ebenso davon überzeugt, dass es durch eine vollständige Aufbereitung des Kanals und Einhaltung der Patency zu einer Eliminierung der postoperativen „Flare-ups“ kommt (Bellamy, 2003).

1.4. Zusammenfassung und Fragestellung

Bei vorliegender Studie soll herausgearbeitet werden, ob mit einer „modifizierten Patency-Technik“, d.h. mit einer Aufbereitung ausschließlich bis zum Foramen apicale, eine vollständige mechanische und chemische Reinigung des Kanals unter Zuhilfenahme moderner Polyamidspülspitzen erreicht werden kann. Wie unter 1.4. bereits ausgeführt, soll der Wurzelkanal bis zum Foramen aufbereitet und so für eine dichte Wurzelfüllung optimal vorbereitet werden. Die Nachteile, die sich bei der konventionellen Patency-Technik (durch Verwendung der Patency-Feile, die 1 mm über das Foramen apicale hinaus in das periapikale Gewebe geschoben wird) durch mehrfache Überinstrumentierung während eines Aufbereitungszyklus ergeben, sollen vermieden werden. Dazu gehören z.B. Traumatisierung des umliegenden Gewebes und damit einhergehender verzögerter Regeneration sowie häufiger auftretende postendodontische

Schmerzen, Verschleppung von Bakterien über das Foramen und Überpresung von Wurzelfüllmaterialien, die mit einer schlechteren Prognose für den Zahnerhalt verbunden sind. Die Vorteile der mechanischen und chemischen Reinigung hingegen sollen von der Patency-Technik genutzt werden.

In dieser Studie soll mittels einer Versuchsreihe aufgezeigt werden, dass die Anwendung der Patency-Technik grundsätzlich vorteilhaft, es aber nicht notwendig ist, 1 mm über das Foramen hinaus zu instrumentieren. Ohne diese Überinstrumentierung, also mit einer „modifizierten Patency-Technik“, soll ebenso eine vollständige Reinigung und Desinfektion des Kanals erreicht werden, aber mit Instrumenteneinsatz, der genau am Foramen apicale endet.

Beim Versuchsaufbau werden vier Versuchsabläufe durchgeführt; folgende Fragen sollen damit beantwortet werden:

- Kann die Patency bei Anwendung der wissenschaftlich standardisierten Patency-Technik erreicht werden, wenn dabei mit der Patency-Feile ausschließlich bis zum Foramen instrumentiert und nicht 1 mm überinstrumentiert wird, um das periapikale Gewebe nicht zu traumatisieren?
- Kann die Patency leichter erreicht werden, wenn zusätzlich zum modifizierten Vorgehen (ohne Überinstrumentierung) am Ende eine schallaktivierte Spülung bis zum Foramen zum Einsatz kommt?
- Kann die Patency auch erreicht werden, wenn ausschließlich am Ende der Aufbereitung eine schallaktivierte Spülung mittels Polyamidspülspitze bis zum Foramen erfolgt?
- Kann die Patency ebenso erzielt werden, wenn am Ende der Aufbereitung ausschließlich eine Patency-Feile (K-Feile #10) verwendet wird?
- Sind Unterschiede bei den Möglichkeiten der Aufbereitung von verschiedenen Kanalanatomien erkennbar?

- Welche Aufbereitungstechnik und welches Feilensystem ist bezüglich der Durchgängigkeit und des Zeitmanagements am sinnvollsten?

Die Ergebnisse der Studie sollen dabei helfen, eine Empfehlung für den klinische Einsatz der gewählten Aufbereitungstechnik bei der Kanaldurchgängigkeit von unterschiedlich komplexen Wurzelkanalanatomien mit unterschiedlichen Verfahren zu geben.

Ziel der Arbeit ist es, die Effizienz und prozentuale Häufigkeit der Kanaldurchgängigkeit unter Anwendung der modifizierten Patency-Technik mit modernen Polyamidschallspitzen im Vergleich zum Vorgehen bei der standardisierten Patency-Technik mit Handfeilen zu bestimmen. Es wird mittels Realtime Video verglichen, mit welchen Instrumenten und welcher Aufbereitungstechnik die Arbeitslänge sowie eine apikale Kanaldurchgängigkeit (Patency) am effektivsten, schonendsten und schnellsten erreicht werden kann und ob sich moderne Schallspitzen aus Polyamid von herkömmlichen Spitzen und Feilen aus Metall abgrenzen und sich diese durch ihre Flexibilität in gekrümmten Kanälen besser eignen als metallische Feilen.

Diese Fragestellungen sollen an 3D-gedruckten Zähnen mit aufsteigender Komplexität der Kanal Anatomie beantwortet werden.

2. Material und Methoden

2.1. Vorbereitung der im Versuch verwendeten Zähne

2.1.1. Zahnauswahl

Von 12 ausgewählten extrahierten Zähnen wurden Micro-CT-Datensätze angefertigt. Für die durchzuführende Studie werden die Micro-CTs am Computer bearbeitet (siehe unten), sodass am Ende die Zähne mit einem 3D-Drucker hergestellt werden können. Der große Vorteil der 3D-gedruckten Zähne liegt darin, dass derselbe Zahn als Ausgangslage für verschiedene Versuchsreihen herangezogen werden kann. Dadurch ist ein optimaler Vergleich zwischen den einzelnen Versuchsgruppen gewährleistet. Aus der Datenbank wurden elf unterschiedliche Kanal anatomien ausgewählt, um eine möglichst breit gestreute Aussage über Erfolg/Misserfolg der jeweiligen Aufbereitungstechnik, sowie Erreichen/Nichterreichen der Patency treffen zu können. Die ausgewählten Zähne wurden entsprechend des Krümmungswinkels in die entsprechenden Schweregrade nach Schneider eingeteilt.

Es werden insgesamt drei Kategorien festgelegt. Die Einteilung erfolgt nach zuvor (siehe Seite 12) beschriebener Zuteilung nach Schneider. So soll die erste Kategorie leichte Kanal anatomien, die zweite Kategorie mittelschwere und die dritte Kategorie schwere Kanal anatomien aufweisen. Bei der Auswahl der Zähne ist darauf zu achten, dass die Wurzeln ein abgeschlossenes Wurzelwachstum aufweisen, keine Resorptionsvorgänge am Apex erkennbar sind, die Kanäle bis zum Foramen apicale durchgängig sind und der Kanalverlauf keine Veränderung zeigt. Eine Veränderung könnte beispielsweise eine bereits durchgeführte Wurzelkanalbehandlung darstellen. Somit wäre dieser Zahn für den Versuch unbrauchbar.

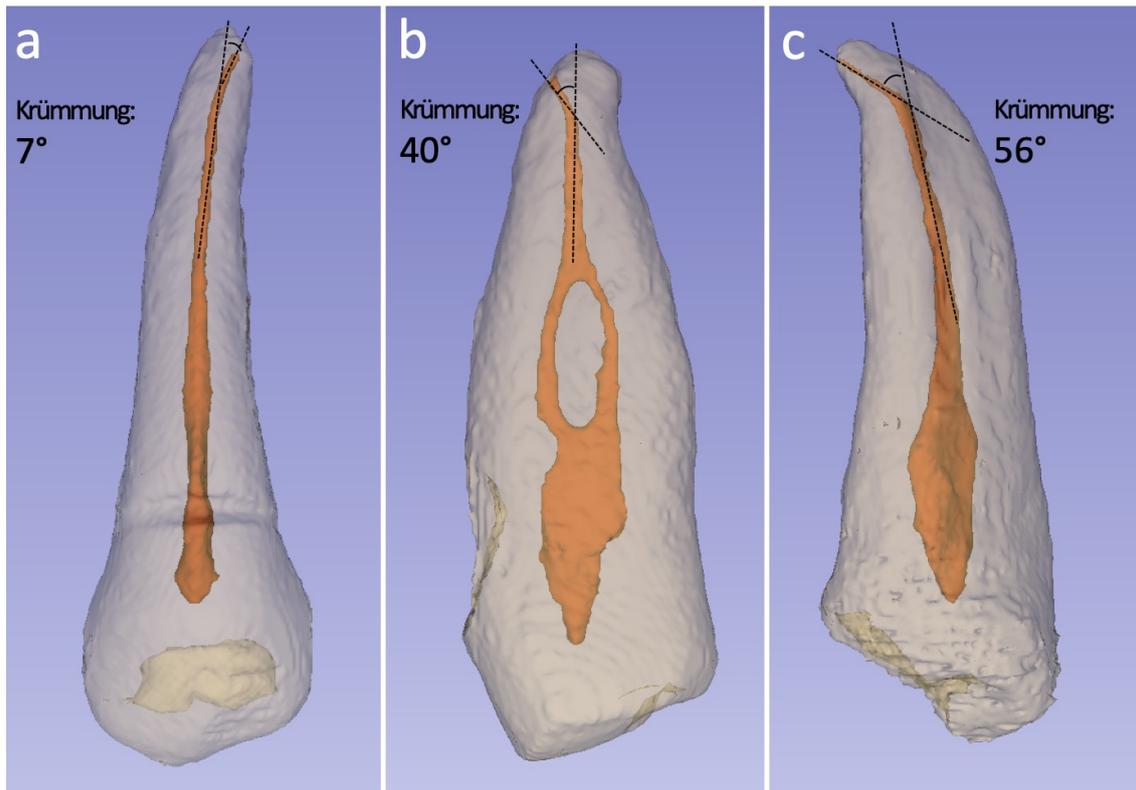


Abb. 8: Leichte und schwere Kanalanatomien im Vergleich

- a) leichte Kanalanatomie mit einer Krümmung von 7° (siehe 1.1.4.)
- b) schwierige Kanalkrümmung 40° nach Schneider
- c) schwierige Kanalkrümmung 56°

2.1.2. Erstellung der 3D-Datensätze

2.1.2.1. 3D-Slicer

Im 3D-Slicer-Programm kann der Zahn in allen Schichtebenen wiedergegeben werden (koronal, sagittal und transversal). Ziel ist es, den Kanalverlauf und die Außenkontur des Zahnes exakt nachzuvollziehen und bei Bedarf zu korrigieren. Im 3D-Slicer wird für den späteren 3D-Druck festgelegt, welches Volumen als Festkörper und welches als Hohlraum definiert wird. Die entstehenden Hohlräume werden im späteren Druckverfahren mit sogenanntem Stützmaterial gefüllt, um darauf wieder festes Material drucken zu können. Das Stützmaterial nimmt hierbei den Raum des Pulpengewebes im Wurzelkanal ein und imitiert dieses. Bei der Aufbereitung wird untersucht, wie effektiv das Stützmaterial

durch die Feilen und Spülvorgänge aus dem Kanal entfernt werden kann und diese Erkenntnisse zur Beurteilung der Reinigungseffizienz herangezogen. Das sich im Wurzelkanal befindliche Stützmaterial ähnelt dabei dem natürlichen Pulpengewebe in seiner Konsistenz, während hingegen die Zahnhartsubstanz (Schmelz- und Dentinbereich) mit härterem Kunststoffmaterial gedruckt wird.

2.1.2.2. Oberflächenbearbeitung

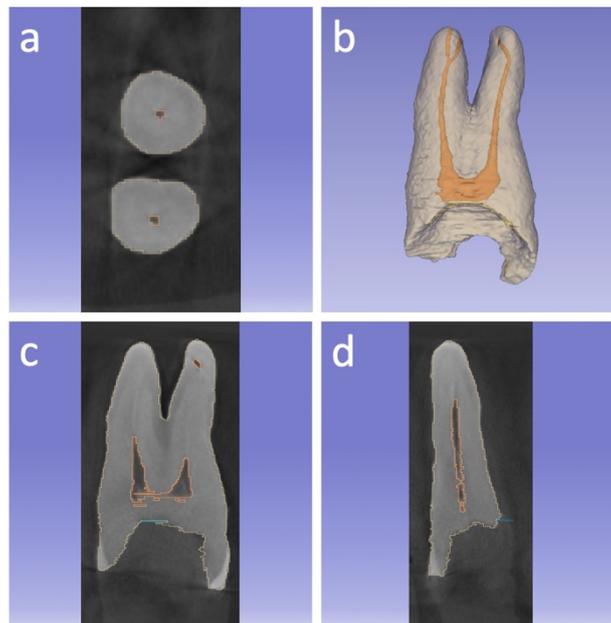


Abb. 9: Ausschnitt aus 3D-Slicer-Programm

- a) transaxiale Schnittführung
- b) 3D-Darstellung des Zahns und Kanalverlaufs
- c) koronale Schnittführung in bucco-palatinaler Ausrichtung
- d) sagittale Schnittführung in mesio-distaler Ausrichtung

Die im 3D-Slicer entstandene Datei wird in den Meshmixer exportiert. Dieses Programm wird benötigt, damit die Größe der Datei reduziert werden kann. Die Reduzierung des Datenvolumens kann an den oberflächlichen Strukturen vorgenommen werden, die für den Versuch bedeutungslos sind.

Die Oberfläche des Zahns wird dabei aus einzelnen Triangle Meshes zusammengesetzt. Um die Speicherkapazität zu reduzieren, werden einzelne Triangle Meshes miteinander verschmolzen, wobei eine Glättung der Oberfläche entsteht. Diese Glättung erfolgt an allen Oberflächenstrukturen – außer im Bereich

des Foramen apicale. Dort soll die ursprüngliche Form unter keinen Umständen verändert werden, um auf das Ergebnis keinen Einfluss zu nehmen.

2.1.2.3. 3D-Processing

Die Daten werden aus dem Meshmixer in das 123D-Designprogramm importiert. Der Zahn wird nun so geschnitten, dass der für den Versuch relevante Teil, also der Wurzelkanalverlauf, gut dargestellt und erkennbar ist. Die Schnitte werden so gewählt, dass parallel zum Kanalverlauf ca. 1 mm Schichtstärke auf beiden Seiten verbleibt. Durch den verwendeten transparenten Kunststoff kann die Aufbereitung im Video ideal nachvollzogen werden (Abb. 10a). Im letzten Schritt wird von okklusal eine zylinderförmige Trepanationsöffnung bis zu den Kanaleingängen angelegt (Abb. 10b).

Hierfür muss ein Zylinder eingefügt werden („insert a Cylinder“), der dann in seiner Größe der gewünschten Trepanationsöffnung angepasst wird (durch Smart Scale möglich). Durch Betätigen des Fensters „move“ kann der Zylinder hin zur gewünschten Position verschoben werden. Da an der Stelle des Zylinders später ein Hohlraum – und kein Festkörper – entstehen soll, muss im folgenden Schritt das Volumen des Zylinders vom Zahn entfernt werden. Über die Funktion „subtract“ kann das Volumen des Zylinders vom Volumen des Zahnes subtrahiert werden. An der Stelle des Zylinders entsteht ein Hohlraum, der beim 3D-Druck ebenso mit Stützmaterial, gleich dem Kanalinhalt, ausgefüllt wird.

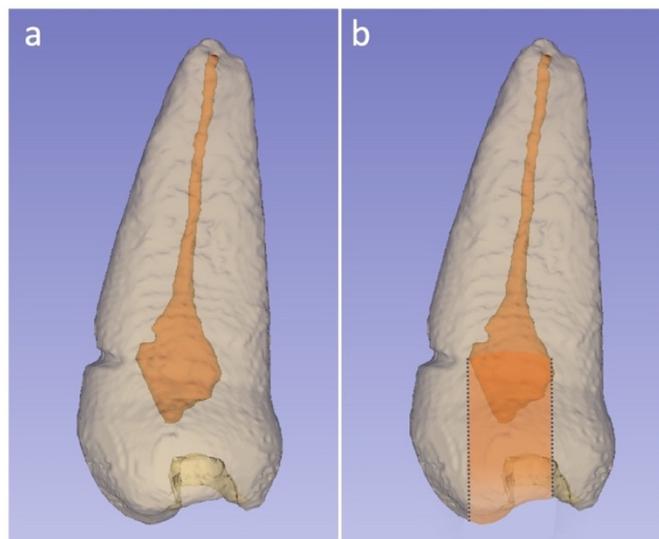


Abb. 10: Erstellung einer digitalen Trepanationsöffnung

- a) 3D-Datensatz des Zahns vor Erstellung einer Trepanationsöffnung
- b) Zahn nach Erstellung einer Trepanationsöffnung zur Erleichterung der späteren Aufbereitung

2.1.2.4. 3D-Druck der Zähne

Die entstanden Datensätze werden in den Meshmixer exportiert und als STL-Datei gespeichert. Die STL-Datei kann dann an den 3D-Drucker mit der Produktbezeichnung „Stratasys Object 30 Ortho Desk“ übermittelt und für den Druck verwendet werden.

Beim Stratasys Object 30 Ortho Desk handelt es sich um einen Drucker, der die Slices mittels Polyjet-Verfahren herstellt. Hierbei tragen mehrere Druckköpfe sehr feine Tröpfchen eines Photopolymers auf eine Basisplatte auf, die sofort nach dem Auftragen mit Hilfe eines UV-Lichts ausgehärtet werden und so Schicht für Schicht den gewünschten Körper entstehen lassen. Vorteilhaft bei diesem Druckverfahren ist, dass eine sehr hohe Detailgenauigkeit sowie eine sehr glatte Oberfläche erzielt werden können. Schichtstärken liegen hier zwischen 16 und 32 μm bei einer Genauigkeit von 0,1 mm. Im Vergleich zu anderen Druckverfahren ist es zudem möglich, Materialien zu mischen. Dies ist im Falle der durchgeführten Studie notwendig, um zwischen Dentin und Pulpenmaterial unterscheiden zu können. Das Dentin wird mit transparentem und medizinisch zugelassenem Kunststoffmaterial (Polyjet-Photopolymer) mit der Produktbezeichnung MED610 gedruckt. Als Stützmaterial wird das Material Support SUP705 verwendet, das innerhalb des Wurzelkanals das Pulpengewebe simuliert.

Zu den physikalischen Eigenschaften des Dentins nach Klimm 2003 wird eine Knoop-Härte von 68 KHN, eine Scherfestigkeit von 45 - 140 MPa, eine Zugfestigkeit von 40 - 95 MPa und ein E-Modul von 11 - 19 GPa angegeben (Hülsmann, 2008). Im Falle des 3D-gedruckten Zahns gibt der Hersteller des Photopolymers MED610 für die Rockwell-Härte 73 - 76 HR an, eine Biegefestigkeit von 75 - 110 GPa, für die Zugfestigkeit einen Wert von 50 - 65 MPa sowie ein E-Modul von 10 - 25 MPa an.

2.2. Materialien

2.2.1. Endodontiemotor und Reinigungseinheit

Für die Versuche wird der Endodontiemotor VDW.GOLD® RECIPROC® mit dem dazugehörigen Winkelstück verwendet. Das Winkelstück der Firma Dentsply Sirona weist die vom Hersteller geforderte Übersetzung 6:1 auf. Der VDW.GOLD® RECIPROC® Motor ist in der Lage, sowohl kontinuierliche Rotationen als auch alternierende Bewegungen mit Drehmomentkontrolle durchzuführen. Je nach verwendetem Feilensystem kann die passende Bewegung im Menü ausgewählt werden. So gibt es im Menü für reziprok arbeitende Feilensysteme, wie z.B. das RECIPROC® blue-System oder R-Pilot-Feile als auch für alternierende Feilensysteme, zu denen das Mtwo®-System zählt, bereits vorinstallierte Parameter. Es besteht die Möglichkeit, im Rotationsmodus die Parameter für Drehmoment (gcm) und Drehzahl (rpm) individuell einzuspeichern, sodass jede Feile den Herstellerangaben entsprechend verwendet werden kann.

Der Endodontiemotor verfügt über einen Apex-Lokalisator. Anhand einer LED-Anzeige und einem akustischen Signal wird den Behandlern während der Aufbereitung signalisiert, wo sich die Feile intrakanalikulär befindet. Die drei blauen LEDs zeigen die Position der Feilenspitze im median-koronalen Kanalabschnitt an. Im Bereich der drei grünen LEDs ist das Aufbereitungsinstrument in den apikalen Bereich des Kanals vorgedrungen. Bei Aufleuchten der orangefarbenen LED ist der Bereich der apikalen Verengung bis zum Foramen apicale erreicht. Es ertönt ein dauerhafter hoher Ton. Bei Aufleuchten der roten LED wurde überinstrumentiert und das apikale Foramen überschritten.

Die Reinigungseinheit, die auch als Interim-Stand bezeichnet wird, besteht aus einem Behältnis, das mit einer Schaumstoffscheibe verschlossen ist. Sie dient dazu, dass der Spanraum der Feilen von Dentinspänen und Pulpenmaterial zwischen den einzelnen Arbeitsgängen gereinigt werden kann.

2.2.2. Feilen

Sämtliche folgende Instrumenteninformationen sind den Anwendungsbroschüren der Hersteller entnommen.

2.2.2.1. Manuelle Stahl- und Nickel-Titan-Instrumente

Manuelle Wurzelkanalaufbereitungsinstrumente werden von vielen Herstellern in den unterschiedlichsten Ausführungen vertrieben. 1972 wurde eine Standardisierung der Feilen in der „International Organisation for Standardization“ (ISO) ausgearbeitet, die einheitlich gültige Werte bezüglich des Instrumentendurchmessers, der Farbkodierung, der Beschriftung sowie der Fertigungstoleranz festgelegt hat. Festgehalten wurde dies in der ISO-Norm 3630. Die Feilen unterscheiden sich weiterhin in der Gestaltung der Schneidekanten, der damit einhergehenden Schneidleistung und der verwendeten Legierung (Schäfer, 1998b).

Wurzelkanalinstrumente bestehen im Allgemeinen aus einem schneidenden Arbeitsbereich, einem Schaft und dem sich daran anschließenden Handgriff.

Arbeitsteil und Schaft:

Der Arbeitsteil der Feile hat eine Länge von 16 mm, was in der ISO-Norm 3630 ebenso festgelegt wurde. Die Länge des Schafts ist variabel. Die Gesamtlänge des Instruments berechnet sich aus der Addition der Länge des Arbeitsteils, sowie der Länge des Schafts. Feilen sind in der Länge 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich.

Instrumentenspitze:

Durchmesser d_1

Der Durchmesser an der Instrumentenspitze gibt die Größe des Instruments an. Eine Feile der Größe #10 misst somit an der Spitze 0,01 mm. Als optische Erleichterung dient den Behandlern eine Farbcodierung am Griff.

Durchmesser d_2

Jede Feile besitzt eine Konizität, was auch als Taper bezeichnet wird. Bei ISO-Instrumenten liegt der Taper bei 02. Dies beschreibt die Zunahme des Durchmessers pro Millimeter Länge des Arbeitsbereiches. Das entspricht bei einem Taper von 02 einer Durchmesserzunahme von 0,02 mm pro Millimeter Längenzuwachs (Weber, 2010).

K-Feilen:

Für die Versuchsreihe kommen die K-Feilen der ISO-Größe 10 zum Einsatz. Diese werden als Zwischenfeilen während des Standardvorgehens sowie am Ende der Versuchsreihe allein oder in Kombination mit der schallaktivierten Spülspitze angewendet. Das Instrument wird während der Aufbereitung auf Abnutzungserscheinungen kontrolliert und im Interimsstand gereinigt.

K-Feilen werden aus Dreikant- oder Vierkantstahlrohlingen hergestellt. Bei kleineren Instrumentengrößen (bis #40) kommen viereckige, bei größeren Instrumenten dreieckige Querschnitte zum Einsatz. Bei kleineren Instrumentengrößen wird auf einen Vierkantstahl zurückgegriffen, da so die Bruchgefahr deutlich reduziert werden kann. Dies lässt sich anhand der Belastungsverteilung bei auftretender Krafteinwirkung erklären, welche sich dann auf vier, statt auf drei Schneiden umverteilen lässt. Nachteilig daran ist jedoch, dass die Feile selbst weniger flexibel ist, als bei einem Dreikantprofil. Dies verdeutlicht auch, weshalb es bei höheren Instrumentengrößen wichtig ist, auf einen Dreikantrohling zu wechseln. Hier steht die Flexibilität im Vordergrund, um den Kanalverlauf bei gekrümmten Kanälen einhalten zu können (R. Beer, 1994). K-Feilen besitzen pro Millimeter Arbeitsteil 1,5 - 2,5 Windungen (R. Beer, 1997). Der Tangentenwinkel, welcher durch die Instrumentenlängsachse und die Schneiden gebildet wird, beträgt 25° - 40° . Mithilfe des Tangentenwinkels können Aussagen bezüglich ihrer Anwendung getroffen werden. Bei einem Neigungswinkel unter 45° sind beispielsweise drehende und schabende Bewegungen angezeigt, um einen guten Materialabtrag zu erzielen (Tepel, 2000).

NiTi #15 Feilen:

Für die Studie werden NiTi-Feilen der ISO-Größe 15 verwendet. Diese werden zur Gleitfaderstellung in der Balanced-force-Technik in Zusammenhang mit der daran anschließenden Aufbereitung mit dem Mtwo[®]-Feilensystem eingesetzt.

In den 1970er Jahren hält die Legierung, die sich zum Großteil aus Nickel und Titan zusammensetzt und unter dem Namen NiTiNOL bekannt wird, Einzug in der Zahnmedizin (Schäfer, 1998a). Zunächst wird NiTi in der Kieferorthopädie eingesetzt, später gewinnt dieses Material immer mehr Bedeutung im Bereich der Endodontie. Ein Grund dafür ist sein pseudoelastisches Verhalten, wodurch das Elastizitätsmodul auf nur 1/5 des Wertes im Vergleich zu konventionellen Chrom-Nickel-Stahl-Legierungen abgesenkt werden kann und der Feile so ein besonders hohes Maß an Flexibilität verleiht. Durch den sogenannten „Memory-Effekt“ kann die Feile nach Krafteinwirkung und Verformung in die ursprüngliche Form zurückkehren und eignet sich so besonders gut für die Aufbereitung gekrümmter Kanäle (WJ Buehler, 1968, Glossen et al., 1995, MARTIN and BLAŠKOVIĆ-G-ŠUBAT, 1997). Aufgrund der höheren Flexibilität können Kim et al. zeigen, dass sich NiTi-Instrumente besser für die Gleitfaderstellung eignen als Edelmetallinstrumente (Kim et al., 2017).

Die Pseudoelastizität kommt durch eine Kristallgitterumwandlung zustande. Bei Belastung geht die Legierung von der Austenitphase in die Martensitphase über und kehrt nach Entlastung wieder in die ursprüngliche Phase zurück (Zupanc and Schäfer, 2017). Im Zuge der höheren Flexibilität der Feile können verschiedene Autoren die Minimierung von Präparationsfehlern feststellen, wie z.B. Perforationen und Stufenbildung bei schwierigen Kanalanatomien (Craig et al., 1968, Viana et al., 2010).

Im Gegensatz zu Edelmetallinstrumenten, die durch Verdrillung oder Fräsung hergestellt werden können, ist dies bei Nickel-Titan-Instrumenten ausschließlich per Fräsung möglich (G. Gressmann, 2001, Schäfer, 1995). NiTi-Legierungen setzen sich aus den Metallen Nickel, Titan, Eisen und Kobalt zusammen. Es wird zwischen 55-Nitinol (bestehend aus 55 % Nickel und 45 % Titan), 60-Nitinol (bestehend aus 60 % Nickel und 40 % Titan) sowie der Titan-Aluminium-

Legierung mit bis zu 17m% Aluminiumanteil unterschieden (G. Gressmann, 2001).

2.2.2.2. Maschinelle Aufbereitung mit rotierenden Instrumenten

Bei vorliegender Arbeit kommen die Mtwo[®]-Feilen der ISO-Größen 10 - 25 als Aufbereitungsinstrumente sowie als Gleitpfadfeile die VDW.ROTATE[™] der ISO-Größe 15 zum Einsatz. Beide Feilen werden in rotierender Bewegung angewendet und während der Aufbereitung stetig auf Abnutzungserscheinungen per Sichtkontrolle überprüft und im Interim-Stand gereinigt.

ROTATE[™] – Feile:

Bei der VDW.ROTATE[™] handelt es sich um eine Feile aus einer Nickel-Titan-Legierung mit s-förmigem Querschnitt. Durch eine spezielle Wärmebehandlung des Nickel-Titan Materials kann die Gefahr eines Feilenbruchs reduziert werden. Der s-förmige Querschnitt des Instruments erlaubt es, dass Dentinspäne und Nervengewebe während der Anwendung aus dem Kanal effizient nach koronal gearbeitet werden können bei gleichzeitig sicherer Feilenführung im Zentrum des Kanals. Dies wird laut Herstellerangaben durch die Verbesserung der Flexibilität des Materials unterstützt. Dadurch sollen Abweichungen vom ursprünglichen Wurzelkanalverlauf verringert werden. Aus dem Sortiment der VDW.ROTATE[™]-Feilen wurde in der Studie die Gleitpfadfeile der ISO-Größe 15 mit einem konstanten Taper von 04 verwendet. Die Feile kann in den Längen 21 mm, 25 mm, sowie 31 mm erworben werden. VDW. ROTATE[™]-Feilen werden bis zur ISO-Größe 60 mit variierenden Tapern zwischen 04 - 06 auch für die Aufbereitung des Kanals angeboten.

Laut Hersteller können die Instrumente aufbereitet werden. Aus hygienischen Gründen und der Gefahr einer Kreuzkontamination sollte das Instrument nur zum Einmalgebrauch genutzt werden (VDW-GmbH, 2019).

Mtwo® #10 - #25 Feilen:

Hierbei handelt es sich um Nickel-Titan-Feilen der Firma VDW, die in rotierender Bewegung angewendet werden. Der s-förmige Instrumentenquerschnitt weist zwei aktive Schneidekanten mit einem kleinen Instrumentenkern auf, wodurch eine hohe Flexibilität gewährleistet wird (VDW-GmbH, 2022). Die Instrumente sind in den Längen 21 mm und 25 mm, bei einem Arbeitsteil von 16 mm, sowie in der Länge 31 mm, bei einem Arbeitsteil von 21 mm, erhältlich.

Mtwo®-Feilen sollen laut Herstellerangaben in einer bürstenden Feilenbewegung eingesetzt werden. Hierbei wird jedes Instrument auf die vollständige Arbeitslänge in den Kanal eingebracht, wobei die jeweils zuletzt verwendete Feilengröße den Gleitpfad für die folgende ISO-Größe darstellt. So soll ein substanzschonender Dentinabtrag bei sicherer Aufbereitung in allen Kanal-anatomien ermöglicht werden (VDW-GmbH, 2022). Laut der vergleichenden Studie von E. Schäfer sind die Mtwo®-Feilen im Vergleich zu K3- und RaCe-Feilen überlegen, indem sie gekrümmte Kanäle schneller, sicherer und unter genauerer Beibehaltung der Kanalanatomie aufbereiten (Schäfer et al., 2006). In der *in vitro* Studie von F. Foschi 2004 kann anhand von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gezeigt werden, dass Mtwo®-Feilen in der Lage sind, eine debrisfreie Dentinoberfläche im koronalen und mittleren Kanalabschnitt zu hinterlassen, im apikalen Kanaldrittel jedoch Mängel aufweisen. Auf den Aufnahmen wird sichtbar, dass die Feilen Vertiefungen und Rillen an den Dentinwänden hinterlassen und nicht alle Bereiche aufbereitet werden können (Foschi et al., 2004).

2.2.2.3. Maschinelle Aufbereitung mit reziprozierenden Instrumenten

In den durchgeführten Versuchen kommt die R-Pilot-Feile der ISO-Größe 12,5 sowie die RECIPROC® blue-Feile der ISO-Größe 25 zum Einsatz. Beide Feilen werden mit reziproken Bewegungen in den Kanal eingebracht, während der Aufbereitung auf Abnutzungserscheinungen geprüft sowie im Interim-Stand nach Verwendung gereinigt.

R-Pilot-Feile:

Es handelt sich hierbei um eine Gleitpfadfeile der Firma VDW aus einer Nickel-Titan-Legierung (M-Wire-Legierung) mit einem s-förmigen Querschnitt. Die Instrumentenspitze ist dabei nichtschneidend, was als „Batt“-Spitze bezeichnet wird. Die abgerundete, nichtschneidende Spitze soll dafür sorgen, dass die Feile besser zentriert im Kanal verläuft und so Präparationsfehler und Formveränderungen verringert. Durch ein thermomechanisches Bearbeitungsverfahren entsteht aus der NiTi-Legierung eine M-Wire-Legierung. Letztere ist damit gegen zyklische Biegeermüdungserscheinungen resistenter und weist zudem eine höhere Flexibilität im Vergleich zu konventionellen NiTi-Legierungen auf (Pereira et al., 2012).

R-Pilot-Feilen sind Einmalinstrumente, die steril verpackt in Blistern erhältlich sind. Diese sollen für die Verwendung an maximal einem Molaren angewendet werden. Die R-Pilot-Feile ist in der Einheitsgröße ISO 12,5 erhältlich und hat einen konstanten Taper von 04. Die Feile ist in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich.

Während der Aufbereitung müssen die Feilen auf Abnutzungserscheinungen, wie z.B. Verbiegungen, aufgedrehte Windungen oder beschädigte Schneidkanten kontrolliert werden. Die Feile dient dazu, einen Gleitpfad im Wurzelkanalsystem zu erstellen. Dies wird mit reziproken Bewegungen erreicht. Nach max. drei Pecks – entspricht einer Auf- und Abwärtsbewegung von ca. 2 - 3 mm – muss das Instrument in einem Interim-Stand gereinigt und auf Verschleißerscheinungen kontrolliert werden.

Es ist darauf zu achten, dass nur mit leichtem Druck im Kanal gearbeitet wird. Die Firma VDW empfiehlt vor Verwendung der R-Pilot-Feile die Kanaldurchgängigkeit mit einer C-Pilot-Feile ISO-Größe 08 zu überprüfen.

Die R-Pilot-Feile ist zum Einmalgebrauch vorgesehen und kann nicht erneut sterilisiert werden. Bei Wiederverwendung steigt das Kreuzkontaminations- und Frakturrisiko.

RECIPROC® blue #25 Feile:

Beim RECIPROC® blue-Feilensystem handelt es sich um eine Weiterentwicklung des RECIPROC®-Systems, das 2011 auf den Markt kommt. Es ist in den ISO-Größen 25, 40 und 50 erhältlich. Die RECIPROC®-Feile der ISO-Größe 25 weist dabei in den ersten apikalen Millimetern einen Taper von 08, R40 einen Taper von 06 sowie R50 einen Taper von 05 auf. Die Feilen sind in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Die Feilen sind mit einer Farbcodierung versehen, die den Behandlern die ISO-Größe optisch vereinfacht anzeigt. Um die zuvor bestimmte Arbeitslänge auf die Feile übertragen zu können, ist diese mit einem Silikonstopper ausgestattet, der auf die gewünschte Länge adaptiert werden kann. Die Feile verfügt über einen s-förmigen Querschnitt sowie eine nichtschneidende Spitze, die verhindern soll, dass sich das Instrument in die Kanalwand einarbeitet und so nicht mehr der eigentlichen Kanal Anatomie folgt. So kann es beispielsweise dazu kommen, dass sich eine Stufe, Elbow-Zip oder Perforation bildet und die Feile außerhalb des eigentlichen Kanalverlaufs im Dentin verläuft.

Die RECIPROC® blue-Feile besteht aus einer blue-Wire-Legierung und wird zur Gruppe der Shape Memory Legierungen gezählt. Das NiTi wird während der Herstellung der Feile hitzebehandelt, was eine Änderung der molekularen Struktur zur Folge hat. Die Feilen bestehen bei Raumtemperatur zum größten Teil aus Martensit und besitzen eine in zwei Stufen gesplittete Phasentransformation. Dadurch sind die Feilen gegen zyklische Ermüdung resistenter, sie besitzen einen kontrollierten Rückstelleffekt, haben ein Formgedächtnisverhalten und sind beweglicher als es die Feilen des herkömmlichen RECIPROC®-Systems sind (Zupanc and Schäfer, 2017). Durch verbesserte Flexibilität des Instruments besteht zudem die Möglichkeit, dass es um bis zu 10° vorgebogen werden kann und so den Zugang zu Kanälen mit Krümmung erleichtert (Zupanc and Schäfer, 2017). Durch das Zusammenspiel der reziproken Bewegung, der Geometrie der Schneidekanten sowie der Materialeigenschaften ist es möglich, dass sich die Feile sicher im Kanal zentriert. Dadurch können die meisten Kanäle, auch ohne zuvor erfolgte Gleitpfaderstellung, direkt aufbereitet werden. Laut Mitentwickler Prof. Ghassan Yared aus Ontario (Kanada) gilt dies auch für

kalzifizierte oder stark gekrümmte Kanalverläufe sowie für Revisionen. Die reziproke Arbeitsweise ahmt das Balanced-force-Konzept nach, welches von Roane 1985 entwickelt wird. Hierbei wird die Feile um eine Vierteldrehung im Uhrzeigersinn in den Kanal Richtung apikal bewegt und dann unter leichtem Druck um 360° gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Bei dieser Bewegung schneidet die Feile und ein typisches „Klickgeräusch“ ist hörbar. Um die Feile aus dem Kanal zu befördern, wird eine passive Rotation im Uhrzeigersinn durchgeführt. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die Feile auf die volle Arbeitslänge gebracht werden kann (Roane et al., 1985).

Laut Herstellerangaben wird bei der Reziprok-Technik von VDW die Feile im ersten Schritt in rotierender Weise in Schneidrichtung in den Kanal bewegt und anschließend mit entgegengesetzter Drehrichtung wieder freigegeben. Die Bewegung setzt sich dabei aus mehreren solcher reziproken Bewegungen zusammen, bis eine gesamte Umdrehung von 360° erreicht werden kann. Dabei ist die schneidende Bewegungsrichtung länger als die Bewegung in die nichtschneidende Gegenrichtung. Somit kann das Instrument konstant nach apikal vordringen.

Die Feilen sind in Blistern sterilisiert erhältlich. Es handelt sich um Einmalinstrumente, die für die Anwendung an maximal einem Molaren vorgesehen sind, was der Aufbereitung von maximal vier Wurzelkanälen entspricht.

2.2.2.4. Extrem flexible Instrumente ohne Memory-Effekt

In der Versuchsreihe kommen die Feilen HyFlex™ EDM Glidepath File der ISO-Größe 15, sowie die HyFlex™ EDM der ISO-Größe 20 zum Einsatz. Beide Feilen werden reziprok im Kanal verwendet.

HyFlex™ EDM-Feilen werden mit ihrer CM-Wire-Legierung der Gruppe der Shape-Memory-Legierungen zugeordnet. Diese Feilen werden per Funkenerosion hergestellt, was die Instrumentenoberfläche robuster macht und das Frakturrisiko senkt.

HyFlex™ EDM-Feilen zeichnen sich durch eine extrem hohe Flexibilität, Bruch-sicherheit und der Möglichkeit einer zentrierten Kanalaufbereitung aus (Han et al., 2018, Yilmaz et al., 2017, Kaval et al., 2016).

HyFlex™ EDM-Instrumente haben laut Hersteller eine um bis zu 700 % höhere Bruchfestigkeit als herkömmliche NiTi-Instrumente (COLTENE, 2022). Dies liegt zum einen am Formgedächtnisverhalten des Materials, zum anderen am sich durchweg ändernden Feilenquerschnitt und an der Instrumenten Härte an der Oberfläche der Feile. Hierbei wird die kristallografische Phase bei Zimmertemperatur von Austenit nach Martensit verschoben. Auch HyFlex™ EDM-Feilen besitzen neben der Martensit- und Austenitphase eine R-Phase (Zwischenphase) und somit auch eine zweistufige Phasentransformation.

Bei Krafteinwirkung verändert die Feile ihre Oberflächenform und kann sich verlängern. Dadurch findet keine Verkeilung des Instruments im Kanal statt und es sinkt dadurch das Instrumentenfrakturrisiko. Die Feilen können vorgebogen werden, was einer Stufenbildung in gekrümmt verlaufenden Wurzelkanälen vorbeugt. Die Besonderheit ist dabei, dass das Material unter Hitzeeinwirkung, z.B. durch Autoklavieren, in die Ursprungsform zurückgeführt werden kann. Während der Aufbereitung muss die Feile auf Formänderungen und Verschleißerscheinungen kontrolliert werden.

HyFlex™ EDM Gleitpfadfeile #15:

Die Gleitpfadfeile ist in den ISO-Größen 10 mit einem Taper von 05 und seit 2019 in der ISO-Größe 15 mit einem Taper von 03, jeweils in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm, erhältlich und besitzt eine nichtschneidende Instrumentenspitze. Die Feilen können mit einem reduzierten Winkelstück bei 300 Umdrehungen pro Minute und einem Torque von 1,8 Ncm angewendet werden.

HyFlex™ EDM #20:

Die HyFlex™ EDM-Präparationsfeile ist in der ISO-Größe 20 und einem Taper von 05 in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Durch die Konizität ist die Feile für die Aufbereitung in aller Regel ausreichend. Die Instrumentenspitze ist nichtschneidend. Der Hersteller empfiehlt vor Verwendung der HyFlex™ EDM eine maschinelle Gleitpfaderstellung. Die Feilen können mit einem reduzierten Winkelstück bei 400 Umdrehungen pro Minute und einem Torque von 2,5 Ncm eingesetzt werden.

HyFlex™ EDM-Feilen können nach der ISO 17664 aufbereitet und sterilisiert werden. Der Hersteller gibt an, dass die Feile bei abgeschaltetem Motor in den Kanal eingeführt werden soll. Sobald man auf einen Widerstand stößt, soll das Instrument 1 mm zurückgezogen werden. Nun wird der Motor gestartet und der Kanal Richtung apikal mit tippenden Bewegungen und drucklos aufbereitet. Nach einer Amplitude von 2 - 3 mm soll die Feile aus dem Kanal entfernt und im Interim-Stand gereinigt und auf Abnutzungserscheinungen kontrolliert werden.

2.2.3. Flexible schallaktivierte Endo-Spülspritze

Bei der in den Versuchen verwendeten Endo-Spülspritze handelt es sich um ein Medizinprodukt aus Polyamid der Firma VDW mit der Bezeichnung EDDY® (Abb. 11). Dieses wird vom Hersteller in steril verpackten Blistern mit je 2 Endo-Spülspritzen vertrieben. Die Polyamidspülspritze dient der Verbesserung der Wurzelkanalreinigung und soll die Effektivität zur herkömmlichen Spülung mittels Spritze und Kanüle erhöhen. EDDY® wird mit einem luftdruckbetriebenen Schallgerät eingesetzt. Die Polyamidspitze wird auf das Airscalgewinde aufgeschraubt. Der Airscaler soll dabei auf höchste Leistungsstufe eingestellt werden. Die Obergrenze von 6000 Hz sowie der Luftdruck von 0,3 MPa/3 bar darf nicht überschritten werden.

Die Spülspritze soll erst nach dem Einführen in den Wurzelkanal aktiviert werden. Hierfür füllt man die Pulpakammer mit einer Spüllösung (beispielsweise NaOCl; EDTA) – im durchgeführten Versuchsaufbau mit H₂O. Der Airscaler

kann dann bis zu 30 Sekunden aktiviert werden. Es darf während der Anwendung kein zusätzlicher Druck auf die Spülspitze ausgeübt werden. Der Spülvorgang kann nach jedem Präparationsschritt wiederholt werden. Bei Aktivierung des Airscalers wird die Polyamidspitze in eine oszillierende Bewegung mit hoher Amplitudenauslenkung versetzt. Die in Schwingung versetzte Spitze löst zwei für die Reinigung wichtige Effekte aus: Sie führt zum einen zur Verwirbelung der Spülflüssigkeit und zum anderen zur Kavitation innerhalb des Kanals und erreicht so effektiv alle Bereiche der Kanalwand, einschließlich Isthmen und lateralen Kanälen. Laut Hersteller erfolgt dadurch eine erheblich bessere Entfernung von Geweberesten und des Smear Layer, als es bei der rein manuell durchgeführten Spülung der Fall ist. Besonders positiv wirkt sich die Flexibilität der Spülspitze aus; sie kann deshalb ohne Schwierigkeiten in Kanalkrümmungen eingeführt werden. Im Vergleich zu Metallspitzen kann sich EDDY® besser an den Apex annähern. Vom Material geht nur ein geringes Risiko des Bruchs der Spitze oder einer Dentinschädigung aus. Bei der Spülspitze handelt es sich um ein steriles Einmalprodukt, welches nicht autoklavierbar oder desinfizierbar ist. Die Spitze misst einen Durchmesser von 0,2 mm und eine Gesamtlänge von 28 mm. Es muss mindestens auf die ISO-Größe 25 mit einem Taper von 06 aufbereitet werden. Es sind Markierungen auf den Längen 18, 19, 20, 22, 24, 25, 26 sowie 28 mm angebracht. Der Gewindedurchmesser beträgt 3 mm und ist dadurch mit einer Vielzahl von Airscalern kompatibel.

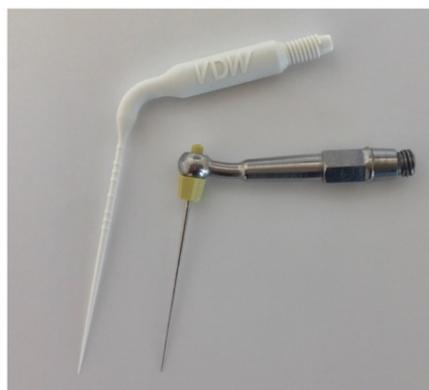


Abb. 11: Polyamidspülspitze von VDW (links) im Vergleich zu herkömmlicher Metallspitze (rechts)

Die druckluftbetriebene, hochflexible Polyamidspülspitze von VDW sowie die herkömmliche starrere Metallspitze für den Airscaler im Vergleich, die beide bei Aktivierung eine oszillierende Bewegung ausführen und so zur Verbesserung der Spülwirkung im Wurzelkanal durch Aufwirbelung des Debris dienen.

2.3. Versuchsdurchführung

2.3.1. Versuchsaufbau

Für den Versuchsaufbau ist es wichtig, dass die Bedingungen möglichst der klinischen Situation entsprechen, um die Umsetzbarkeit für den konkreten Behandlungsfall zu gewährleisten. Daher muss der 3D-gedruckte Zahn in einer Spannvorrichtung fixiert werden (4), was ermöglicht, dass der Zahn während der Aufbereitung in derselben Position – wie es dem Zahnhalteapparat entsprechen würde – gehalten wird. Auch ist dies unabdingbar für die Videodokumentation, die mittels Canon EOS 760d erfolgt (1). Bei wechselnden Abständen des Zahns zur Kamera würde die auf manuell eingestellte Fokussierung nicht gelingen und die einzelnen Schritte könnten im Anschluss nicht analysiert werden, da das Bild unscharf würde.

Der Zahn wird in einem gläsernen Behältnis in Wasser gelagert (3). Die Lagerung in Wasser erfolgt deshalb, weil sich so am Ende der Aufbereitung am besten darstellen lässt, ob die gefärbte Spüllösung, die als Kontrollflüssigkeit eingesetzt wird, über das Foramen apicale abfließt oder nicht. Dies ist entscheidend, da die Patency nur dann vorliegt, wenn am Ende die Lösung über das Foramen austritt. Das Behältnis wurde im Hintergrund zur Erzielung eines besseren Kontrastes mit einer orangenen Folie beklebt.

Die Aufbereitung erfolgt mit dem Endodontiemotor von VDW (5). In einem Reinigungsstand befinden sich die benötigten Feilen (2). Befüllte 10 ml Spritzen mit passenden Spülkanülen liegen für die Zwischenreinigungsschritte bereit. Für die schallaktivierte Spülung wird die Polyamidspitze von VDW eingesetzt (6).

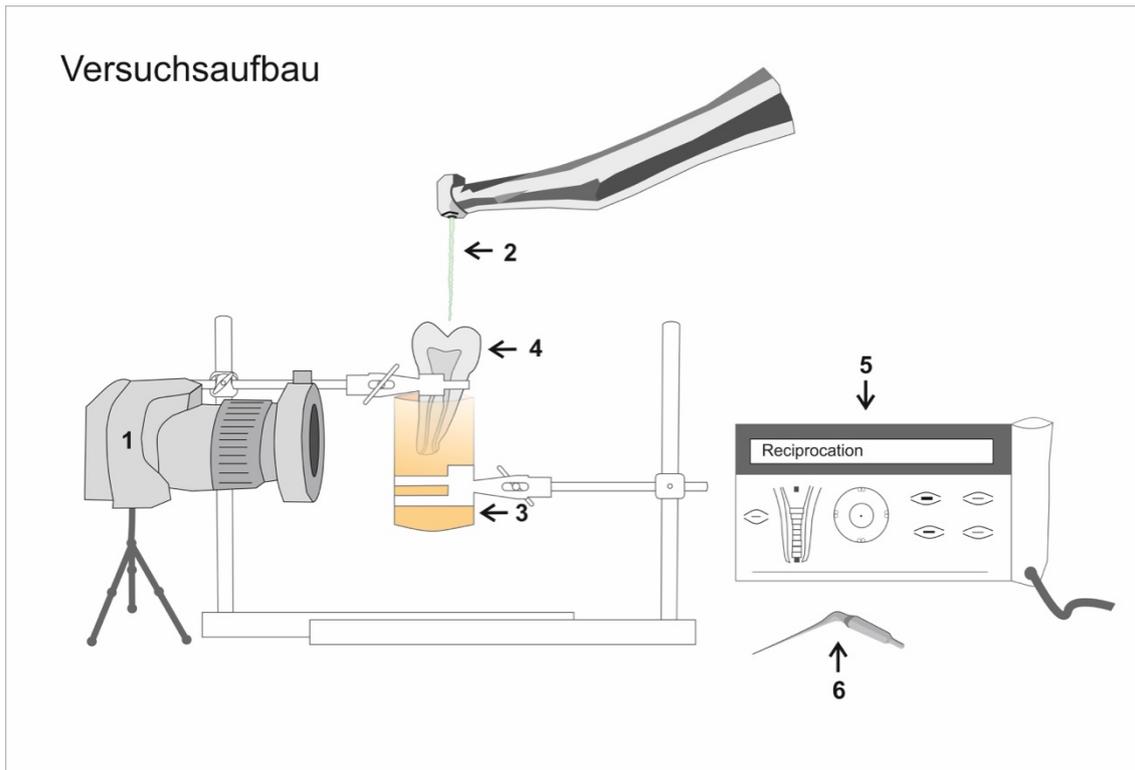


Abb. 12: Laborarbeitsplatz zur Aufbereitung der Zähne

Der Laborplatz zur Aufbereitung und Reinigung der Zähne entspricht dem im Foto dargestellten Aufbau mit 1) Canon EOS 760d für die Videodokumentation der Versuche, 2) Winkelstück mit Aufbereitungsfeile, 3) Halterung mit Behälter zur Aufnahme des Zahns, 4) Zahn, 5) Endodontiemotor VDW.GOLD® RECIPROC® und 6) Polyamidspitze.

2.3.2. Versuchsdurchführung

2.3.2.1. Überblick über die Versuchsdurchführung

In der Studie geht es darum, aufzuzeigen, mit welcher Aufbereitungstechnik und mit welchem Feilensystem das gleichmäßigste und zuverlässigste Ergebnis hinsichtlich der Kanaldurchgängigkeit zu erzielen ist.

Um eine möglichst exakte Aussage treffen zu können, ist es für den Versuchsaufbau daher entscheidend, dies an möglichst vielen unterschiedlichen Kanal anatomien mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden zu testen, um später Abweichungen und Besonderheiten analysieren zu können. Aus diesem Grund werden für den Versuch 12 unterschiedliche Kanal anatomien ausgewählt und aufbereitet. Wie eingangs in der Einleitung beschrieben, können Wurzelkanäle

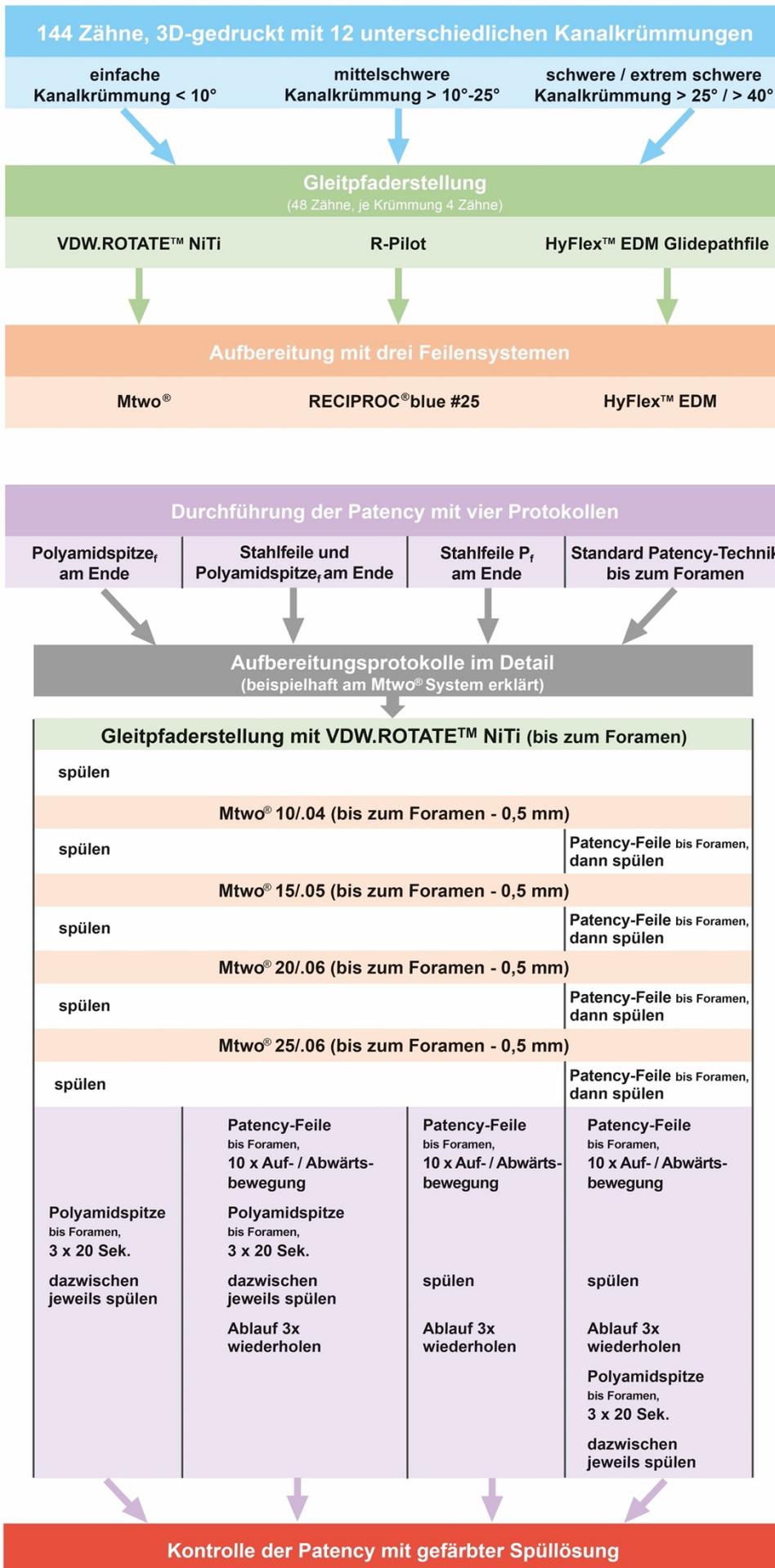
in unterschiedliche Schwierigkeitsgrade eingeteilt werden. So soll jede Kategorie exemplarisch vertreten sein. Kanäle mit einer Krümmung $< 10^\circ$ zählen zur „leichten“ Kategorie, Kanäle mit einer Krümmung $> 10^\circ - 25^\circ$ werden der „mittelschweren“ Kategorie zugerechnet, Kanalverläufe mit einer Krümmung $> 25^\circ$ gelten als schwer aufzubereiten, Krümmungen $> 40^\circ$ werden als „extrem schwer“ in ihrer Aufbereitung bewertet.

In der durchgeführten Studie werden insgesamt 144 3D-gedruckte Zähne aufbereitet. Die Gesamtsumme der Zähne ergibt sich aus 12 unterschiedlichen Kanalkrümmungen. Pro Krümmung wird die Anzahl von 12 Zähnen gedruckt. Diese jeweiligen zwölf identischen Zähne einer Krümmungsanatomie werden nun drei Feilensystemen zugeordnet. Pro Feilensystem werden also 4 gleiche Zähne aufbereitet. In Summe werden so 48 Zähne je Feilensystem bearbeitet.

Im ersten Schritt wird bei allen 144 Zähnen ein Gleitpfad erstellt, aufgrund dessen die weiteren Feilen dem Kanalverlauf leichter folgen und diesen erhalten können. Die Gleitpfaderstellung erfolgt mittels VDW ROTATE™-, NiTi-, R-Pilot-Feile und HyFlex™ EDM Glidepathfile.

Im Anschluss beginnt die eigentliche Aufbereitung und Reinigung der Kanäle mit dem zur Gleitpfadfeile passenden Feilensystem. Der VDW ROTATE™ NiTi Feile folgt das Mtwo® #10 - 25 System, der R-Pilot-Feile die RECIPROC® blue #25 Feile sowie der HyFlex EDM Glidepathfile die HyFlex EDM-Feile.

Die Durchführung der Patency geschieht mit vier Protokollen. Pro identischer Kanal Anatomie und gleichem Feilensystem wird jedes Protokoll einmal durchgeführt.



Videoaufnahme

Abb. 13: Schaubild des Versuchsablaufs

Der Versuchsablauf wird mit drei unterschiedlichen, im Schaubild bezeichneten, Feilensystemen an 3D-gedruckten Zähnen durchgeführt. Insgesamt wird das Erreichen einer Kanaldurchgängigkeit durch vier Aufbereitungsprotokolle und 12 unterschiedliche Kanalanatomien verglichen und analysiert. Der detaillierte Ablauf der Aufbereitung wird beispielhaft anhand des Mtwo®-Systems 10/04 - 25/06 gezeigt. Es erfolgt bei allen vier Aufbereitungsvorgehen zunächst die Gleitpfaderstellung mittels VDW.ROTATE™. Anschließend erfolgt die Aufbereitung des Kanals mit Instrumentenwechseln von ISO-Größe 10 - 25 bis 0,5 mm vor das Foramen. Die jeweiligen Protokolle bei der Durchführung der Patency werden streng eingehalten. Am Ende der Aufbereitung erfolgt die Ergebnisüberprüfung per gefärbter Spüllösung.

Die vier Aufbereitungsprotokolle sind im Schaubild exemplarisch am Mtwo®-System erklärt.

Beim ersten Protokoll „Polyamidspitze_f am Ende“ wird zunächst der Gleitpfad bis zum Foramen erstellt. Danach erfolgt die Spülung des Kanals mit einer Spülkanüle. Im Anschluss wird der Kanal bis 0,5 mm vor das Foramen schrittweise mit aufsteigenden ISO-Größen des Mtwo®-Systems aufbereitet. Zwischen jeder Feilengröße erfolgt erneut ein Spülvorgang. Die Aufbereitung erfolgt bis zur ISO-Größe 25. Ist diese abgeschlossen, kommt nun die Polyamidspitze bis zum Foramen zum Einsatz. Beim Spülzyklus wird die Polyamidspitze 3 x à 20 Sekunden in Schwingung versetzt. Dazwischen erfolgt jeweils ein Spülvorgang, um das gelockerte Debris aus dem Kanal zu befördern.

Beim zweiten Protokoll „Stahlfeile_f und Polyamidspitze_f am Ende“ erfolgt die Aufbereitung des Kanals bis zur ISO-Größe 25 identisch zum ersten Protokoll. Danach wird vor Einsatz der Polyamidspitze jeweils mit einer Handfeile der ISO-Größe 10, der sogenannten Patency-Feile, mit zehn Auf- und Abwärtsbewegungen bis zum Foramen das verbliebene Material im Kanal gelockert und erst im Anschluss mit der Polyamidspitze (ebenfalls bis zum Foramen) nachgearbeitet. Zwischen den beiden Instrumenteneinsätzen erfolgt eine Spülung. Dieser Ablauf wird dreimal wiederholt.

Beim dritten Protokoll „Stahlfeile P_f am Ende“ erfolgt der Ablauf bis zur Aufbereitung der ISO-Größe 25 ebenfalls identisch zu den vorausgegangenen Protokollen. Am Ende der Aufbereitung wird auf den Einsatz der Polyamidspitze

verzichtet. Der Kanal wird abschließend mit der Patency-Feile bis zum Foramen mit kurzen Auf- und Abwärtsbewegungen bearbeitet. Danach erfolgt eine Spülung des Kanals. Dieser Vorgang wiederholt sich dreimal.

Beim vierten Protokoll „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ kommt nach jeder ISO-Größe die Patency-Feile bis zum Foramen zum Einsatz. Erst danach wird der Kanal gespült. Nach Aufbereitung des Kanals mit der nächst größeren ISO-Größe geht erneut die Patency-Feile bis zum Foramen der Kanalspülung voraus. Nach vollständiger Aufbereitung des Kanals wiederholt sich der nachfolgend erklärte Ablauf dreimal. Zunächst wird der verbliebene Inhalt im Kanal mit der Patency-Feile mit zehn Auf- und Abwärtsbewegungen gelockert, dann gespült (dreimal hintereinander durchgeführt). Dies entspricht dem letzten Schritt des dritten Protokolls. Als Änderung kommt nun hinzu, dass nach diesem Ablauf die Polyamidspitze bis zum Foramen für drei Zyklen à 20 Sekunden eingesetzt wird. Dazwischen erfolgt jeweils eine Spülung des Kanals.

Dasselbe Procedere gilt auch bei der Verwendung von reziprozierenden Instrumenten (RECIPROC® blue #25) sowie beim Einsatz von extrem flexiblen Instrumenten ohne Memory-Effekt (HyFlex™ EDM). Der Kanal wird bei der RECIPROC® blue Aufbereitung mit der R-Pilot-Feile erschlossen. Bei der Aufbereitung mit der HyFlex™ EDM erfolgt diese mit der HyFlex™ EDM Glidepath-file. Da hierbei der Kanal in beiden Fällen mit nur einer Feile aufbereitet wird, findet kein Instrumentenwechsel wie bei den Mtwo®-Feilen statt, sondern nach jeweils drei Pecks eine Spülung des Kanals. Damit kann losgelöstes Nerv-Dentin-Gewebe aus dem Kanal gespült werden, womit eine Verblockung durch verdichtetes Material vermieden werden soll.

Ob in der Versuchsreihe eine Patency erreicht wird oder nicht, wird am Ende der Aufbereitung anhand eines Spülvorgangs mit gefärbter Spülflüssigkeit nachgewiesen. Kann die gefärbte Spüllösung über das Foramen apicale abfließen, so ist die Kanaldurchgängigkeit bewiesen. Fließt keine gefärbte Spülflüs-

sigkeit über das Foramen apicale, liegt eine Blockade vor und eine Patency ist nicht erzielt.

Der gesamte Aufbereitungsvorgang wird mittels Videokamera dokumentiert.

2.3.3. Hochauflösende Videodokumentation

Zur wissenschaftlichen Dokumentation und zur lückenlos nachvollziehbaren Einhaltung der Versuchsdurchführung werden alle Aufbereitungsprotokolle per Video festgehalten. Die Videos werden mit der Canon Spiegelreflexkamera EOS 760D aufgezeichnet. Dadurch können sowohl die exakte Einhaltung der Aufbereitung als auch eventuelle Abweichungen oder Fehler bei der Aufbereitung (wie z.B. eine Stufenbildung bei der Wurzelkanalaufbereitung) visuell festgehalten und für die spätere Auswertung herangezogen werden.

Zu allen per Video festgehaltenen Aufbereitungsschritten gehören die von koral nach apikal verlaufende Gleitfaderstellung, die Aufbereitung des Kanals mit jedem einzelnen Instrument (mit insgesamt drei unterschiedlichen Feilen-systemen), die Spülung des Kanals, der Einsatz und die Wirkungsweise der Polyamidspülspitze und abschließend der Nachweis per gefärbter Spüllösung, ob die Patency erreicht werden kann oder nicht.

In Summe entsteht hierbei Videomaterial von über 19 Stunden, das im Anschluss angeschaut, analysiert und bewertet wird.

2.3.4. Erfassung der Versuchskriterien

2.3.4.1. Nachweis der Patency mittels gefärbter Spüllösung

Um nachzuweisen, ob die Durchgängigkeit am Foramen apicale erreicht wird, wird am Ende der Aufbereitung – nach dem letzten Spülgang – eine in einer Spritze aufgezugene Lösung aus Tinte und Wasser von okklusal in den Kanal gespritzt. Sofern die gefärbte Spüllösung über das Foramen apicale nach außen abfließt, ist die Patency erreicht. Wenn die Tinte ausschließlich im Kanal

verbleibt und nicht über das Foramen apicale abfließen kann, liegt keine Kanaldurchgängigkeit vor. In diesem Falle verstopft ein Gemisch aus Dentinspänen und Pulpengewebe das Foramen und verhindert den Abfluss und die apikale Durchgängigkeit kann nicht erreicht werden. Um das Ergebnis deutlicher darstellen zu können, wird der Zahn in einem mit Wasser gefüllten Behältnis gelagert und zur zusätzlichen Kontrastverstärkung die Rückseite des Bechers mit einer orangefarbenen Folie beklebt.

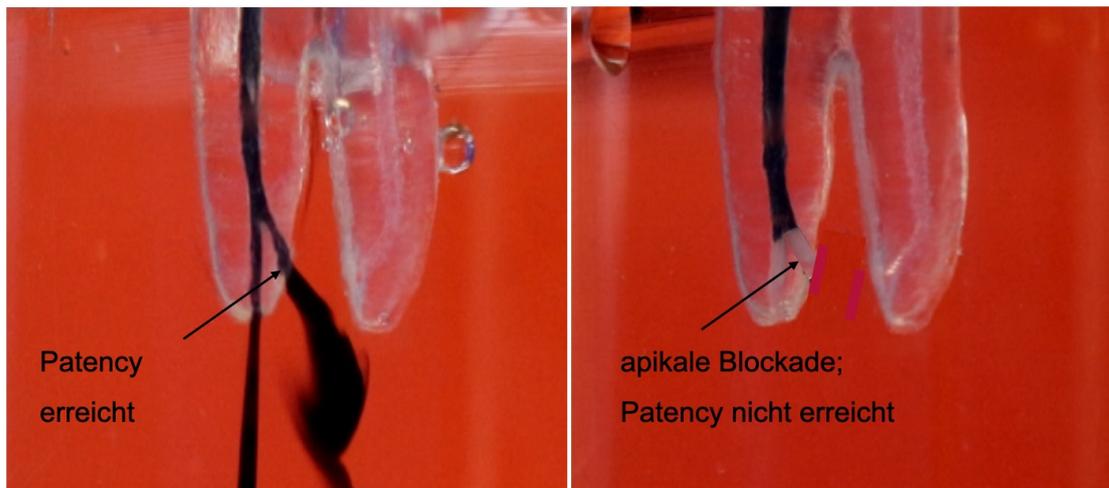


Abb. 14: Darstellung des Ergebnisses der Kanalaufbereitung anhand gefärbter Spüllösung

Am Ende der Aufbereitung erfolgt die Überprüfung der Kanaldurchgängigkeit mittels gefärbter Spüllösung. Fließt die Flüssigkeit durch das Foramen in das Behältnis, ist der Kanal im apikalen Bereich vollständig von Debris befreit und gereinigt (siehe linkes Bild). Fließt die Spüllösung nicht über das Foramen hinaus, ist keine Kanaldurchgängigkeit erreicht. Es liegt eine apikale Blockade vor (siehe rechtes Bild).

2.3.4.2. Auswertung des zeitlichen Aufwandes

Anhand der aufgezeichneten Videos kann der zeitliche Aufwand sehr genau ausgewertet werden.

Es wird die Zeit gemessen, die für die vollständige Aufbereitung des Kanals in der jeweils vorgesehenen Versuchsreihe benötigt wird. Dabei erfolgt die Messung in Sekunden und wird mit dem Eindringen des Instruments in den Kanal begonnen. Die Zeiterfassung endet jeweils nach Entfernen des Instruments aus dem Kanal. Dasselbe gilt sowohl für die Anwendung der Spülflüssigkeit als auch für den Einsatz mit EDDY®. Instrumentenwechsel sowie die Spülung mit

der gefärbten Spüllösung am Ende jeden Versuchs werden nicht in der Zeiterfassung notiert. Auf diese Weise kann der zeitliche Aufwand innerhalb der vier Versuchsreihen (Stahlfeile P_f am Ende, Standard Patency-Technik bis zum Foramen, Stahlfeile P_f + Polyamidspitze e_f am Ende, nur Patency-Feile P_f am Ende) verglichen werden, wobei die unterschiedlichen Schwierigkeitsgrade der Kanal anatomien nicht einbezogen werden.

2.3.4.3. Darstellung der Videodokumentation

Ein wesentlicher Teil der Arbeit beinhaltet die Aufzeichnung der einzelnen Zähne während der mechanischen Aufbereitung, chemischen und schallaktivierten Spülung und Überprüfung der Patency mittels gefärbter Spüllösung.

Nachfolgend werden zur Verdeutlichung und besseren Visualisierung die einzelnen Schritte fotografisch dargestellt, die für die „standardisierte Patency-Technik bis zum Foramen“ notwendig sind. Die Fotos stammen aus dem aufgezeichneten Videomaterial, das für jeden einzelnen Zahn während der Aufbereitung erstellt wurde. Die Aufbereitung erfolgte mit dem RECIPROC® blue-Feilensystem.

Gleitfaderstellung

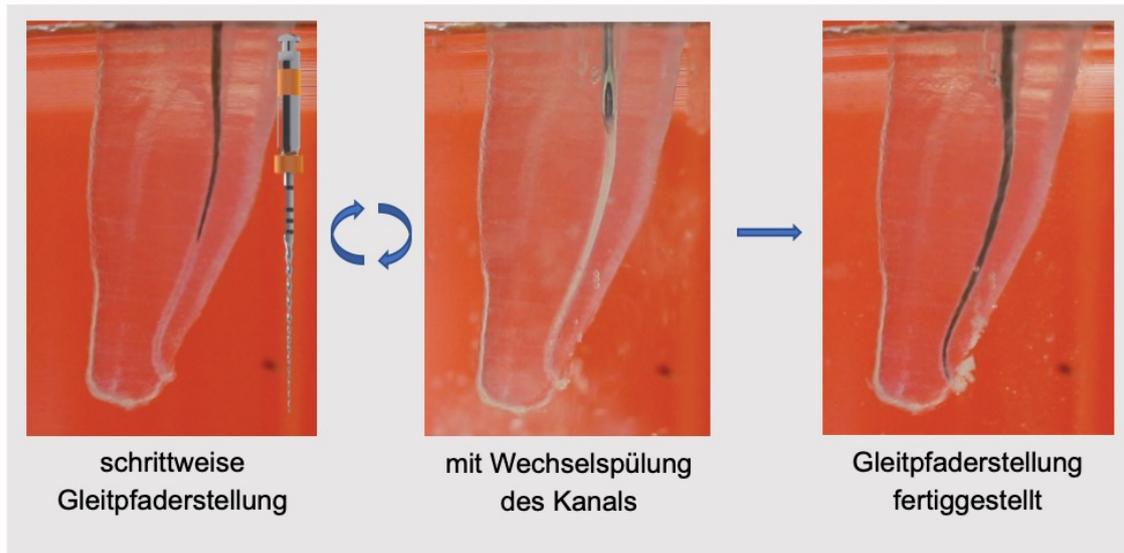


Abb. 15: Videodokument Teil 1 – Gleitfaderstellung

Die Gleitfaderstellung erfolgt mit der R-Pilot-Feile in mehreren Zyklen. Nach 3 Pecks schließt die Reinigung der Feile in einem Interim-Stand an. Das im Kanal befindliche Debris wird mit Hilfe der Spülflüssigkeit nach außen gearbeitet. Dieser Vorgang erfolgt so lange, bis die Gleitpfadfeile das Foramen erreicht hat.

Spülung und erste Aufbereitung

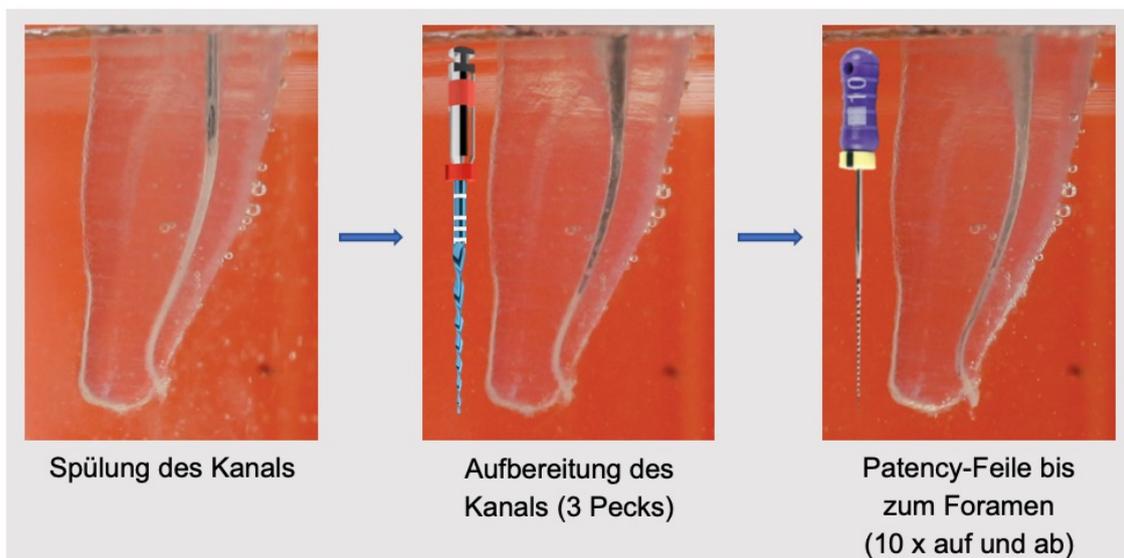


Abb. 16: Videodokument Teil 2 – Initiale Spülung und erste Aufbereitung

Nach der Gleitfaderstellung erfolgt eine weitere Spülung des Kanals, bevor die Aufbereitung mit der RECIPROCB® blue-Feile beginnt. Die Feile wird in einer Auf- und Abwärtsbewegung von 2 - 3 mm und jeweils 3 Pecks in den Kanal eingeführt (siehe mittleres Bild). Danach geschieht die Reinigung der Feile im Interim-Stand. Anschließend wird mit der Zwischenhandfeile/Patency-Feile bis zum Foramen instrumentiert (siehe rechtes Bild).

Spülung und zweite Aufbereitung

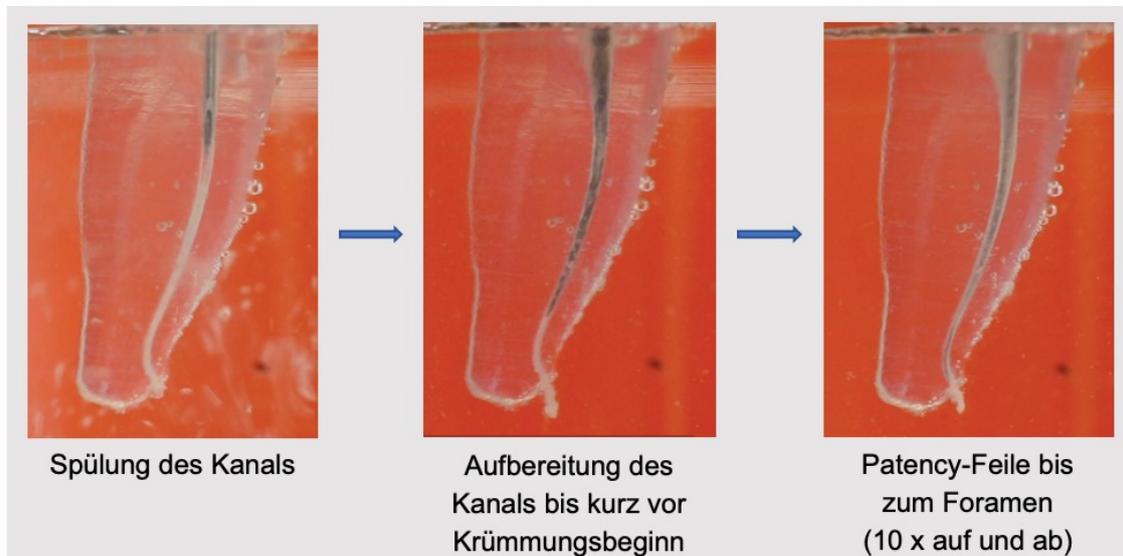


Abb. 17: Videodokument Teil 3 – Spülung und zweite Aufbereitung mit RECIPROC® blue-Feile

Danach erfolgt die Spülung des Kanals zur Entfernung des entstandenen Debris. Im Anschluss wird das Aufbereitungsvorgehen, wie unter Abb.16 beschrieben, wiederholt. Es ist bereits erkennbar, dass die RECIPROC® blue-Feile weiter nach apikal vorgedrungen ist, als beim ersten Aufbereitungsgang. Die Feile arbeitet sich dabei exakt innerhalb des Kanallumens Richtung apikal vor.

Spülung und dritte Aufbereitung

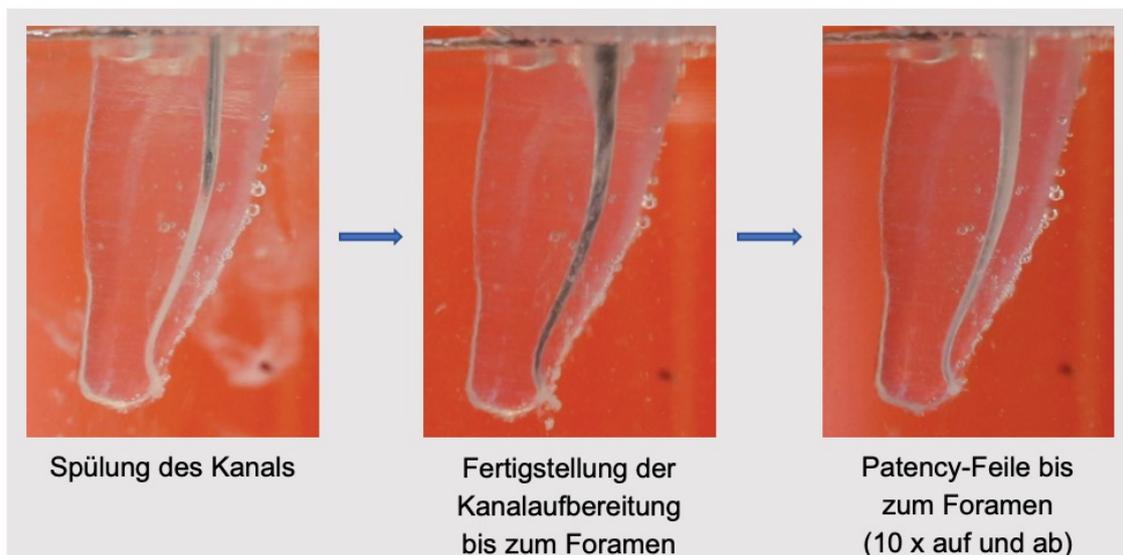


Abb. 18: Videodokument Teil 4 – Spülung und dritte Aufbereitung mit RECIPROC® blue-Feile

Beim vierten Aufbereitungsgang erreicht die RECIPROC® blue-Feile die gewünschte Arbeitslänge und endet exakt 0,5 mm vor dem Foramen apicale. Auch hier wird der Reinigungszyklus mit der Zwischenhandfeile beendet.

Spülung, Patency-Feile und erster Einsatz der Polyamidspülspitze

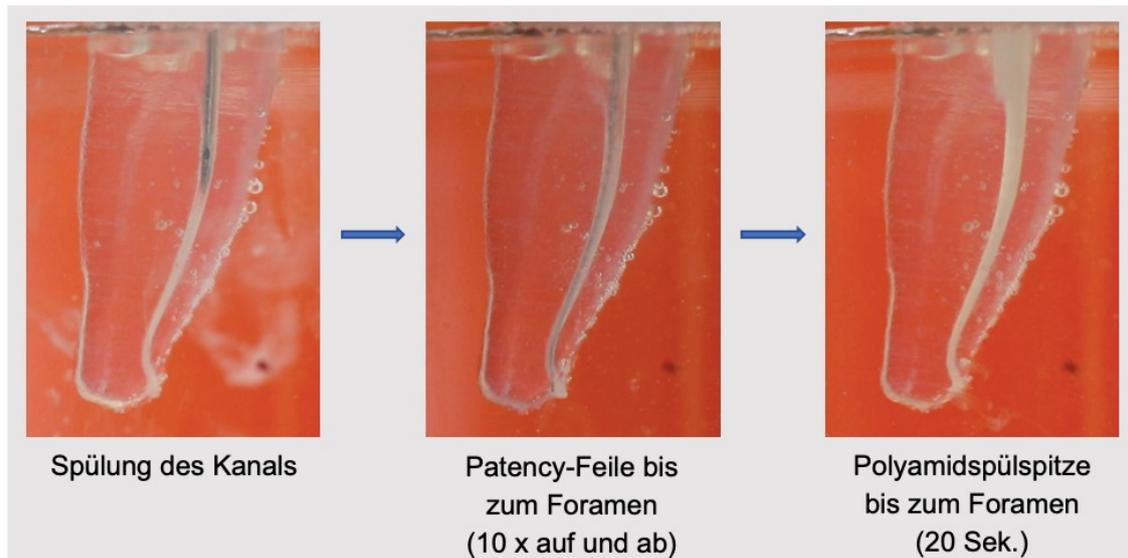


Abb. 19: Videodokument Teil 5 – Spülung, Patency-Feile und Polyamidspülspitze

Im Anschluss an die Kanalaufbereitung mittels maschinell geführter Feile erfolgt ein sich dreimal wiederholender Spülzyklus. Zunächst wird der Kanal mit H₂O gespült. Danach kommt erneut die Stahlfeile #10 für zehn Auf- und Abbewegungen zum Einsatz. Im letzten Schritt wird die Polyamidspülspitze bis zum Foramen in den Kanal eingebracht und für 20 Sekunden aktiviert. Durch die oszillierende Schwingung werden Dentinspäne und Pulpenreste gelockert und können so mit der nächsten Spülung nach koronal abtransportiert werden.

Spülung, Patency-Feile und zweiter Einsatz der Polyamidspülspitze

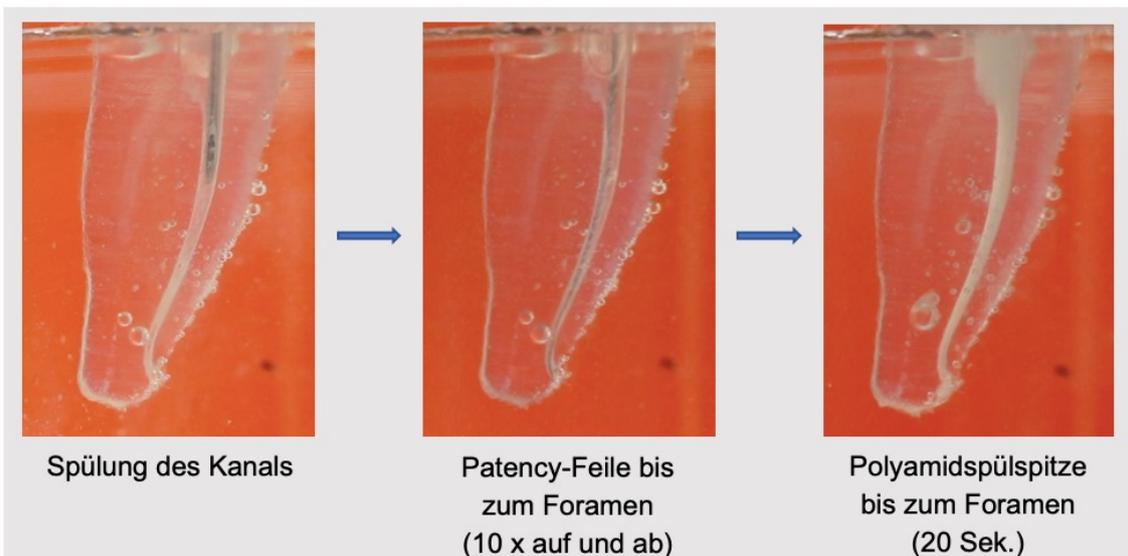


Abb. 20: Videodokument Teil 6 – Spülung, Patency-Feile und Polyamidspülspitze

Der Ablauf wird wie unter Abb. 19 beschrieben erneut wiederholt. Es ist bereits deutlich erkennbar, dass das Kanallumen einen Farbumschwung aufweist und deutlich transparenter wird. Dies ist ein Beleg für die effiziente Reinigung des Kanals.

Spülung, Patency-Feile und dritter Einsatz der Polyamidspülspitze

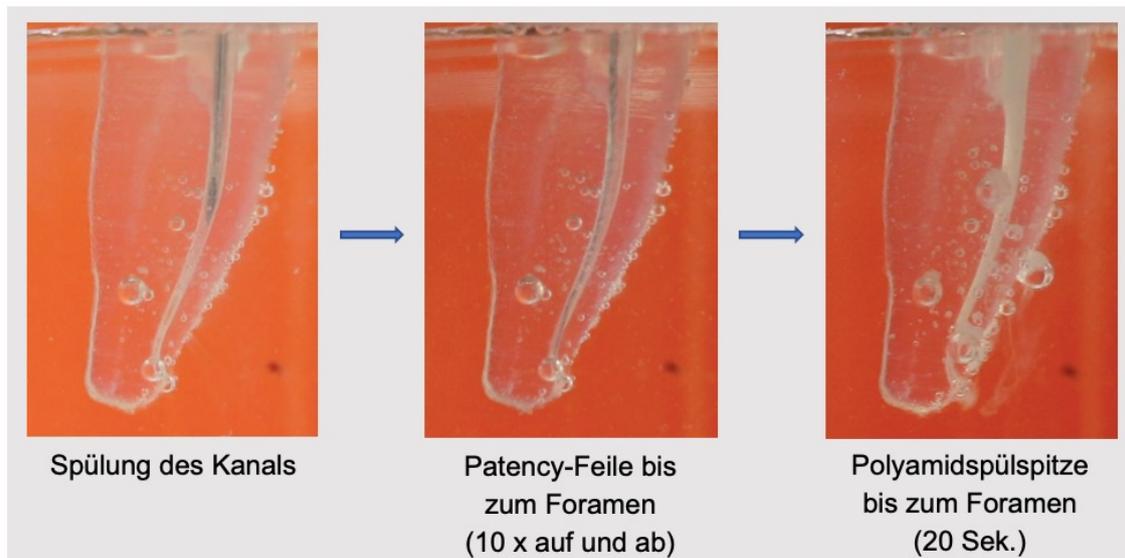


Abb. 21: Videodokument Teil 7 – Spülung, Patency-Feile und Polyamidspülspitze

Dieser Zyklus wird ein drittes Mal wiederholt. Vergleicht man die „Spülung des Kanals“ in Abb. 20/21/22 miteinander, so fällt auf, dass der Farbumschlag von milchig zu transparent stetig Richtung apikal zunimmt. Dies wird auch an der steigenden Anzahl an Luftbläschen deutlich, die durch Luftverschiebungen über das apikale Foramen zustandekommen. Dies ist ein weiterer Indikator für die Patency.

Abschlussspülung und Überprüfung der Patency mit gefärbter Spüllösung

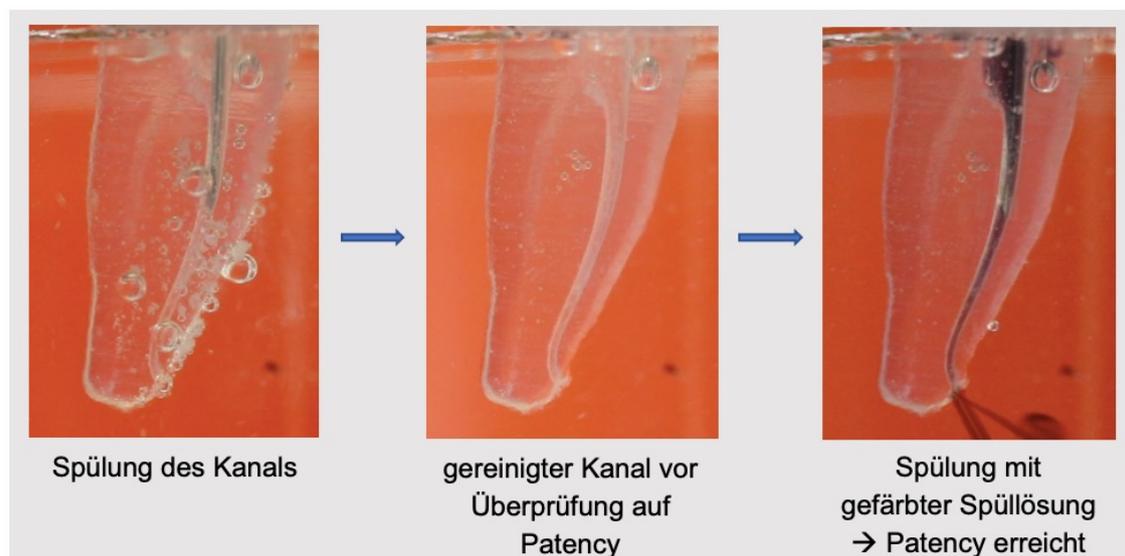


Abb. 22: Videodokument Teil 8 – Überprüfung der Patency mit gefärbter Spüllösung

Zur besseren Visualisierung erfolgt die Überprüfung der Patency mittels gefärbter Spüllösung per Spritze und Kanüle. Anstelle von Wasser wird die gefärbte Lösung als Spülflüssigkeit verwendet. Die Durchgängigkeit ist erzielt, sofern die Lösung über das apikale Foramen Richtung Auffangbehältnis abläuft (siehe rechtes Bild).

2.3.4.4. Statistische Auswertung

Die bei dieser Studie erhobenen Daten der 144 Testzähne werden in einer Excel Tabelle festgehalten und mit Hilfe des Statistikprogramms JMP ausgewertet. Die Auswertung der Fragestellung zur Wirksamkeit der unterschiedlichen Aufbereitungstechniken erfolgt mittels eines Likelihood Ratio Modellvergleichs. Die Ergebnisauswertung im Hinblick auf das Aufbereitungsvorgehen, das Zeitmanagement sowie die Instrumentenwahl werden durch Regression analysiert. Das Signifikanzniveau wird mit 5 %, d.h. $p < 0,05$ festgelegt.

Es werden keine Wurzelkanäle aus den Berechnungen ausgeschlossen.

3. Ergebnisse

3.1. Aufbereitungstechnik im Hinblick auf die apikale Kanaldurchgängigkeit

In der Studie werden folgende Aufbereitungstechniken bei der apikalen Wurzelkanalbehandlung miteinander verglichen:

1. Polyamidspitze_f am Ende
2. Stahlfeile P_f und Polyamidspitze_f am Ende
3. Standard Patency-Technik bis zum Foramen
4. Stahlfeile P_f am Ende

Es zeigt sich, dass das Aufbereitungs- und Reinigungsvorgehen keinen signifikanten Einfluss auf die Patency nehmen. Mit jeder der durchgeführten Techniken kann in den meisten Fällen eine Kanaldurchgängigkeit erreicht werden. Unter den vier Versuchsreihen schneidet im Hinblick auf die Patency die Testreihe „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ mit 94,4 % am besten ab. In 5,6 % der Durchläufe wird die Patency nicht erreicht. Platz zwei belegt die Versuchsreihe „Stahlfeile P_f und Polyamidspitze_f am Ende“, die in 91,7 % der Fälle eine Patency hervorbringt. In 8,3 % der Fälle entsteht hierbei keine Durchgängigkeit am Ende der Reinigung. Die ausschließliche Anwendung „Polyamidspitze_f am Ende“ der Aufbereitung verzeichnet in 86,1 % der Fälle eine Patency, während die Testreihe „Stahlfeile P_f am Ende“ mit 72,2 % die schlechtesten Werte aufzeigt. Hier kann in 27,8 % der Fälle keine Kanaldurchgängigkeit erreicht werden.

Es werden insgesamt 144 Zähne aufbereitet. Es wurde ein R²-Wert von 0,0723 (*df* = 3) ermittelt. Dies bedeutet, dass die Unterschiedlichkeit der Verfahren beim Aufbereitungs- und Reinigungsvorgehen sich in 7,2 % der Fälle auf die apikale Kanaldurchgängigkeit auswirkt. Diese Erkenntnisse decken sich mit dem Ergebnis des Likelihood Ratio Testes ($\chi^2 = 0,0385 > 0,05$) und unterstützen

die Hypothese dahingehend, dass angenommen werden kann, dass die Hochrechnungen zu einem ähnlichen Ergebnis führen.

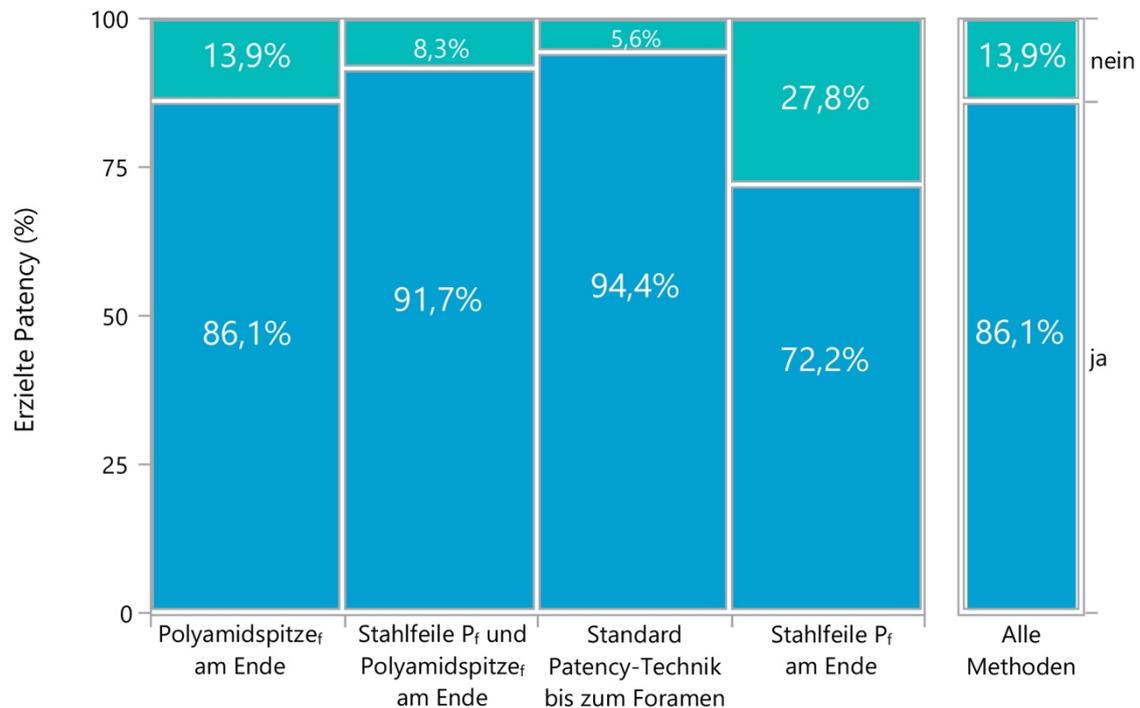


Abb. 23: Ergebnisse der Patency in Prozent

Die „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ erzielt mit 94,4 % das beste Ergebnis. Am schlechtesten schneidet das Aufbereitungsverfahren „Stahlfeile am Ende“ mit 72,2 % ab.

3.2. Einfluss des Foramendurchmessers auf die apikale Kanaldurchgängigkeit

Für jeden Zahn wird der Durchmesser des Foramens bestimmt. Es ist erkennbar, dass ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Erfolg der Kanaldurchgängigkeit und dem Durchmesser des Foramens vorliegt.

Es wurde ein R^2 -Wert von 0,124 ($df = 6$) ermittelt. Dies bedeutet, dass die Foramengröße zu 12,5 % relevant zum Ergebnis der apikalen Kanaldurchgängigkeit beiträgt. Der Likelihood Ratio Test ($\chi^2 = 0,0249, < 0,05$) unterstützt die Hypothese, dass die Aufbereitung bei gleichen Durchmessern zu ähnlichen Ergebnissen führt.

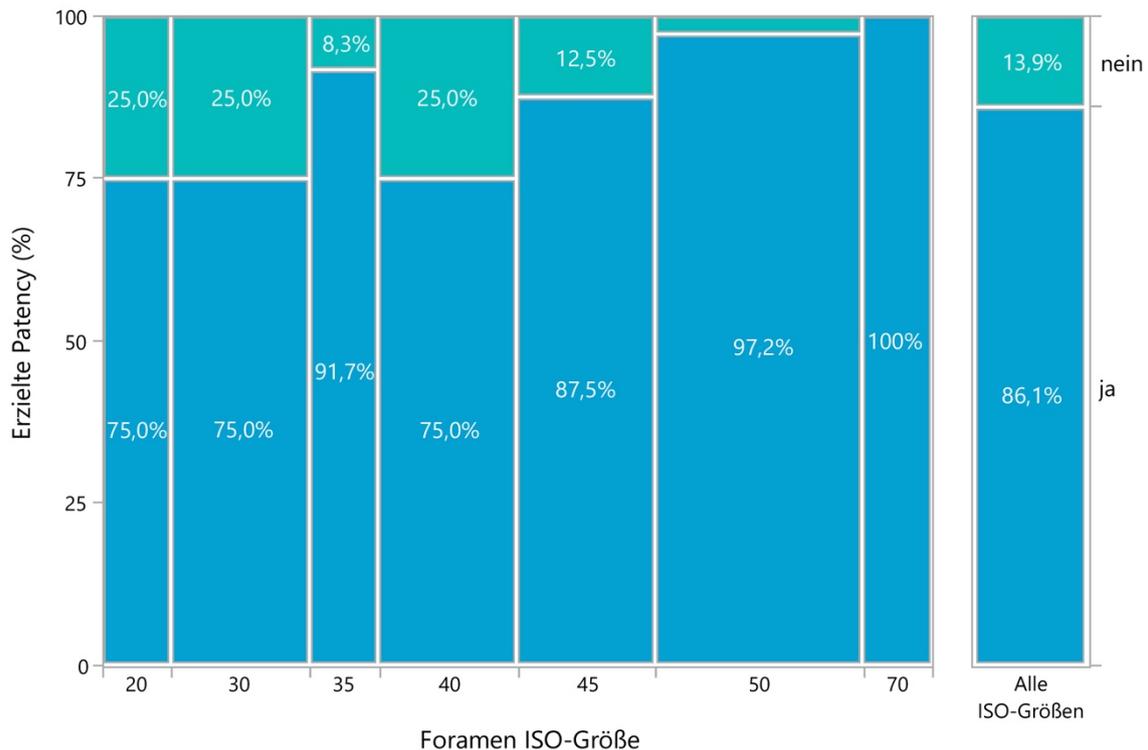


Abb. 24: Ergebnisse der Patency in Prozent in Bezug zum Foramendurchmesser in ISO-Größe

Es besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Erreichen einer Kanaldurchgängigkeit und der ISO-Größe des Foramens. Je größer der Durchmesser, desto häufiger kann eine Patency erreicht werden. Die Säulenbreite der Darstellung ergibt sich aus der Anzahl der Zähne gleicher Apexöffnung, wobei die Einteilung einem Zahn entspricht.

Im Versuch wurden die Foramina der zwölf Testzähne bestimmt und in einer Tabelle aufgelistet. Der kleinste Durchmesser beträgt 0,2 mm. Hierbei kann in 75 % der Fälle eine Patency erzielt werden, bei 25 % entsteht keine Durchgängigkeit. Dasselbe gilt für die Durchmesser 0,3 mm sowie 0,4 mm. Ab einem Durchmesser von 0,45 mm des Foramens steigt die Zahl der erreichten Patency stetig an. Bei 0,45 mm kann in 87,5 %, bei 0,5 mm in 97,2 % und beim größten Durchmesser von 0,7 mm kommt es in 100 % der Fälle zu einer Kanaldurchgängigkeit.

Es ist hierbei eine deutliche Abhängigkeit zwischen dem Durchmesser des Foramens und dem Erreichen einer Durchgängigkeit im Kanal zu erkennen.

3.3. Zeitlicher Aufwand der Aufbereitung und Reinigung

Die unterschiedlichen Aufbereitungsvorgehen haben einen erheblichen Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Der Zeitfaktor für die Aufbereitung und Reinigung ist mit dem Vorgehen „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ deutlich höher als im Vergleich zu „Stahlfeile P_f am Ende“ und „Polyamidspitze_f am Ende“. Den kürzesten zeitlichen Aufwand beansprucht die Reinigung mit der Methode „Stahlfeile P_f am Ende“.

Beim Vorgehen „Polyamidspitze_f am Ende“ fließen 36 Zähne in die Auswertung ein ($M = 104,3$ Sekunden, $SD = 16,2$ Sekunden). Bei der Aufbereitung „Stahlfeile P_f am Ende“ liegt der Mittelwert bei 75,8 Sekunden, die Standardabweichung bei 19,7 Sekunden. „Stahlfeile P_f und Polyamidspitze_f am Ende“ verzeichnet einen Mittelwert von 149 Sekunden, bei einer Standardabweichung von 23,3 Sekunden. Die längsten zeitlichen Werte ergeben sich beim Aufbereiten mit dem Vorgehen „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“. Im Mittel werden 180,3 Sekunden benötigt. Auch in der Standardabweichung zeichnen sich die höchsten Werte ab. Diese liegen bei 30,9 Sekunden.

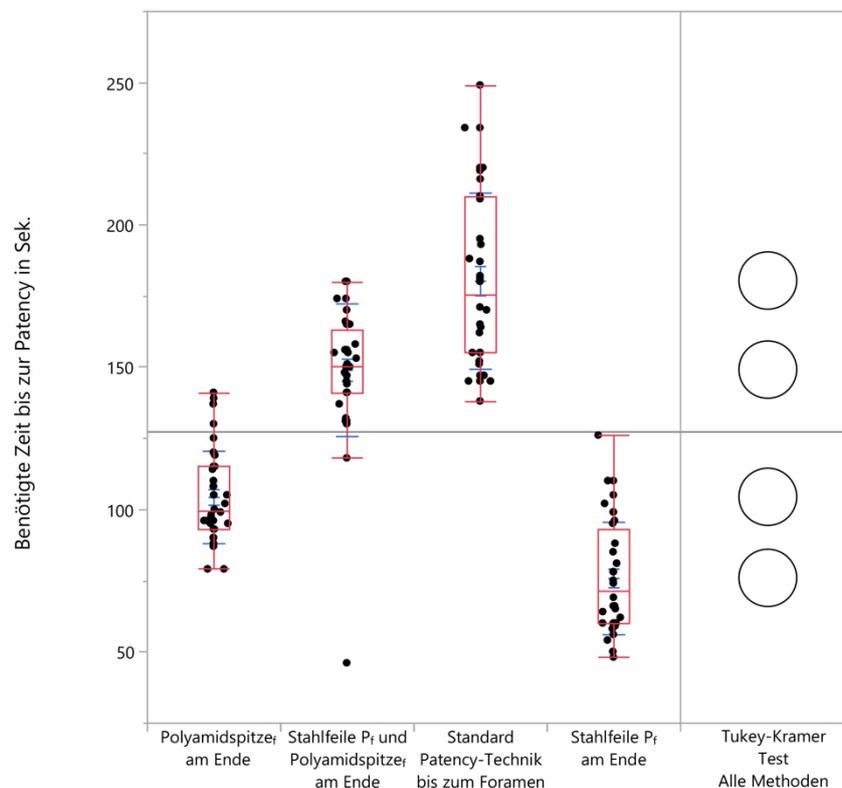


Abb. 25: Darstellung der zeitlichen Verteilung pro Aufbereitungsmethode in Sekunden

Mit dem Aufbereitungsverfahren „Stahlfeile P_f am Ende“ kann ein Kanal signifikant schneller aufbereitet werden als mit der Methode „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“. Der zeitliche Aspekt steht hierbei nicht in Verbindung mit dem Erreichen der Kanaldurchgängigkeit.

Mit Hilfe des Tukey-Kramer-HSD-Tests werden die Gruppen darüber hinaus nochmals untereinander in Bezug gesetzt. Es wird hierfür jede mögliche Paar-kombination verglichen. Der ermittelte p -Wert bei allen Vergleichen zweier Verfahren liegt bei $< 0,0001$. Dies bedeutet, dass der Unterschied zwischen den jeweiligen Aufbereitungszeiten statistisch signifikant ist.

Damit kann eine auf die Gesamtstichprobe übertragbare verlässliche Ergebnisschätzung gegeben werden. Die Versuchsreihe bestätigt, dass die unterschiedlichen Aufbereitungs- und Reinigungsvorgehen einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand haben.

Das Konfidenzintervall gibt den Bereich an, in dem der wahre Wert mit 95 % Wahrscheinlichkeit liegt. Das Konfidenzintervall für den Vergleich „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ und „Stahlfeile P_f am Ende“ liegt im unteren Bereich bei 90,2 Sekunden, im oberen Bereich bei 118,7 Sekunden. Im Paarvergleich kann hier die größte Differenz nachgewiesen werden. Diese liegt bei 104,4 Sekunden. Der geringste Unterschied zeichnet sich mit 28,5 Sekunden zwischen den Versuchsgruppen „Polyamidspitze $_f$ am Ende“ und „Stahlfeile P_f am Ende“ ab. Das untere Ende des Konfidenzintervalls liegt hier bei 14,3 Sekunden, das obere bei 42,7 Sekunden. Nahezu gleich verhält sich dies für die Gegenüberstellung von „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ und „Stahlfeile P_f und Polyamidspitze $_f$ am Ende“. Mit einer Differenz von 31,3 Sekunden, einem niedrigen Konfidenzintervallwert von 17,1 Sekunden und einem hohen von 45,5 Sekunden, unterscheiden sich diese nur minimal vom zuvor aufgeführten Vergleich.

Tabelle 1: Vergleich der unterschiedlichen Paarkombinationen

In Tabelle 1 ist ein Teil der unterschiedlichen Paarkombinationen dargestellt. Die größte zeitliche Differenz besteht hierbei zwischen den Gruppen „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ und „Stahlfeile P_f am Ende“, der geringste Unterschied zwischen „Polyamidspitze_f am Ende“ und „Stahlfeile P_f am Ende“.

Gruppe 1	Gruppe 2	Unterschied in Sek.	Unteres Konfidenzintervall in Sek.	Oberes Konfidenzintervall in Sek.
Standard Patency-Technik bis zum Foramen	Stahlfeile P _f am Ende	104,4	90,2	118,7
Standard Patency-Technik bis zum Foramen	Polyamidspitze _f am Ende	76,0	61,8	90,2
Stahlfeile P _f und Polyamidspitze _f am Ende	Stahlfeile P _f am Ende	73,2	59,0	87,4
Stahlfeile P _f und Polyamidspitze _f am Ende	Polyamidspitze _f am Ende	44,7	30,5	58,9
Polyamidspitze _f am Ende	Stahlfeile P _f und Polyamidspitze _f am Ende	31,3	17,1	45,5
Polyamidspitze _f am Ende	Stahlfeile P _f am Ende	28,5	14,3	42,7

3.4. Verwendete Feilensysteme im Vergleich

Die Auswertung bezüglich der verwendeten Feilensysteme für die Aufbereitung und Reinigungsschritte zeigen keinen wesentlichen Einfluss auf die Patency. Es wurde ein R²-Wert von 0,0277 (*df* = 2) ermittelt. Dies bedeutet, dass die Unterschiedlichkeit der Feilen zu 2,8 % relevant für das Ergebnis der apikalen Kanaldurchgängigkeit ist. Der Likelihood Ratio Test ($\chi^2 = 0,0277, > 0,05$) unterstützt die Hypothese dahingehend, dass von der verwendeten Feile selbst keine nennenswerte Auswirkung ausgeht. In der Studie werden die Feilen HyFlex™ EDM, Mtwo®, sowie RECIPROC® blue #25 miteinander verglichen.

Im direkten Vergleich schneidet die RECIPROC® blue #25 Feile am besten ab. Sie erreicht in 91,7 % der Fälle eine Kanaldurchgängigkeit. In 8,3 % der Fälle kann keine Patency erreicht werden. In absteigender Reihenfolge erzielt die Verwendung des Mtwo®-Feilensystems in 87,5 % eine Patency und in 12,5 % der Fälle keine Kanaldurchgängigkeit. Das Feilensystem HyFlex™ EDM schließt mit 79,2 % erreichter Patency und in 20,8 % der Fälle keiner erreichten Kanaldurchgängigkeit am schlechtesten ab.

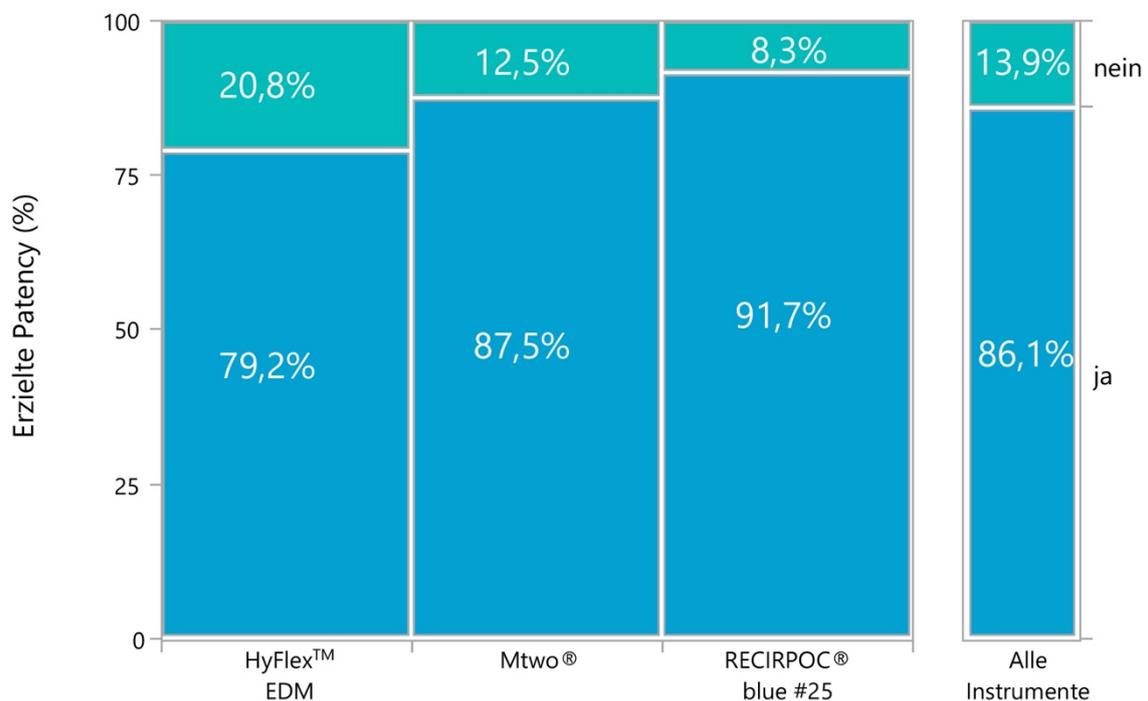


Abb. 26: Ergebnisse der Feilensysteme RECIPROC® blue #25, Mtwo®, HyFlex™ EDM

Bei der Aufbereitung mittels RECIPROC® blue #25 Feilen kann am häufigsten eine Kanaldurchgängigkeit verzeichnet werden. Der Einsatz der anderen Feilensysteme zeigt jedoch keinen deutlichen Unterschied.

4. Diskussion

4.1. Diskussion der Methode

4.1.1. Auswahl der Präparate

In der wissenschaftlichen Literatur ist eine Vielzahl von Studien zu finden, die sich mit der Patency-Technik beschäftigen. In der Regel wird hierbei die Versuchsdurchführung an natürlichen, menschlichen Zähnen beschrieben. Daher stellt sich zuallererst die Frage, welche Präparate für den Versuch in dieser Studie genutzt werden sollen. Es steht die Option offen, die Versuche ebenfalls an menschlichen Zähnen oder an 3D-gedruckten Kunststoffzähnen durchzuführen. Die Entscheidung fällt zugunsten der Verwendung von 3D-gedruckten Zähnen, die auf Mikro-CT-Datensätzen von echten, humanen extrahierten Zähnen basieren. Auf diese Weise können möglichst standardisierte Versuchsbedingungen hergestellt werden und so für die spätere Auswertung ein besserer und aussagekräftigerer Vergleich unter den einzelnen Versuchsreihen getroffen werden.

Alle Wurzelkanäle werden aus der Mikro-CT-Datenbank nach folgenden Kriterien ausgewählt:

An den Zähnen erfolgt zuvor keinerlei Veränderung des Wurzelkanalsystems von extern, wie z.B. eine Wurzelkanalbehandlung. Die Wurzelkanäle sind vollständig durchgängig und nicht obliteriert. Die Wurzeln der Zähne sind komplett und intakt ausgebildet und weisen ein abgeschlossenes Wurzelwachstum auf. Bei der Auswahl der Präparate werden untere Inzisiven sowie Prämolaren des Ober- und Unterkiefers verwendet. Dabei soll die Auswahl einen Querschnitt der unterschiedlichen Varianzen der Kanal anatomien repräsentieren. Die Kanal anatomien wurden so ausgesucht, dass nach der Schneider'schen Einteilung Vertreter aus allen Kategorien der Wurzelkanalkrümmungen (0° - 5° : annähernd gerader Wurzelkanal, 10° - 20° : mäßige Wurzelkanalkrümmung, 25° -

70°: starke Wurzelkanalkrümmung) (Schneider, 1971) und der daraus resultierenden Schwierigkeiten bei der Aufbereitung vorhanden sind.

Als größter Nachteil bei der Verwendung von Kunststoffzähnen kann angeführt werden, dass die Härte des Kunststoffmaterials nicht der Härte des natürlichen Dentins entspricht und das Material aus diesem Grund ein anderes Abrasionsverhalten aufweist. Da der Kunststoff eine geringere Härte als Dentin aufweist, kann es jedoch auch als Vorteil angesehen werden, dass sich die Aufbereitung dementsprechend schwieriger gestaltet und sich aufgrund des niedrigeren Materialwiderstands Fehler bei der Präparation sowie der Substanzabtrag an der Kanalwandung besser darstellen lassen (Miserendino et al., 1988). Peters stellt 2004 und Morgental 2013 fest, dass die Resultate, die an Kunststoffzähnen gewonnen werden, häufig das Ergebnis von Humanpräparat-Zähnen bestätigen (Peters, 2004, Morgental et al., 2013). Zudem haben Kunststoffzähne den Vorteil, dass das Ergebnis durch Neben-faktoren, wie z.B. die Mundöffnung des Patienten, Würgereiz oder Lichtverhältnisse in der Mundhöhle nicht beeinflusst wird. Der bedeutendste Vorteil in der Auswahl der Kunststoffpräparate ist darin zu sehen, dass die Zähne aus transparentem Material und in dünnen Schnitten hergestellt werden können und so die Möglichkeit bieten, dass der gesamte Aufbereitungsvorgang per Videodokumentation festgehalten und analysiert werden kann. Jeder Feileneinsatz, jeder Spülvorgang, jede Veränderung im Kanal kann so sichtbar gemacht werden und bietet eine einmalige Chance, um die einzelnen Schritte zu optimieren. Dies wäre am Patienten nicht möglich. Die Eigenschaften des Zahnes reichen an die *in vivo* Situation heran und zusätzlich kann der wissenschaftliche Dokumentationsstandard erheblich verbessert werden.

4.1.2. Auswahl der Methode

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird eine Vielzahl von 3D-gedruckten Zähnen mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden aufbereitet. Zur detaillierten Aufbereitung finden diese Vorbereitungen unter Verwendung eines OP-

Mikroskops statt. Erst als eine konstant gleichbleibende Qualität bei der Aufbereitung hinsichtlich der manuellen Handhabung erreicht ist, werden die Versuchsreihen der Studie gestartet.

Im Unterschied zu den meisten bisher durchgeführten Studien wird bewusst darauf verzichtet, 1 mm über das apikale Foramen mit der Patency-Feile zu instrumentieren, wie dies beispielsweise in der Studie von Jorge Vera der Fall ist (Vera et al., 2011). Es soll keine unnötige Verletzung und Formveränderung des apikalen und periapikalen Gewebes erfolgen. Daher wird die Feilenspitze der Patency-Feile sowie der Polyamidspülspitze exakt bis zum Foramen geführt (die genaue Arbeitslänge wurde zuvor bestimmt). Es soll in dieser Studie nachgewiesen werden, dass die Reinigungswirkung mit modernen Schallspitzen ebenso erreicht werden kann, wie es seither unter Anwendung der Patency-Technik (1 mm über das apikale Foramen) möglich ist.

Die Studie von Vera et al. zeigt, dass es nach der passiven Ultraschallspülung im apikalen Drittel deutlich mehr erreichte Kanäle mit Spüllösung gibt, wenn zuvor die Aufbereitung mittels Patency-Technik durchgeführt wird als bei der Nichtanwendung der Patency-Technik. In der vorliegenden Studie kann gezeigt werden, dass eine Kanaldurchgängigkeit mit modernen Schallspitzen erreicht werden kann, ohne dass es nötig ist, mit dem Instrument 1 mm über das Foramen hinaus zu instrumentieren. Die Studie stellt dar, dass der Kanal bis ans Foramen gereinigt und durchgängig gemacht werden kann, ohne dass die Gefahr besteht, dass eine periapikale Gewebstraumatisierung oder Verschleppung von Keimen über den Apex hinaus entsteht.

Zusätzlich wurden die Versuche mit verschiedenen Feilensystemen durchgeführt, um auch hier eventuelle Unterschiede herauszuarbeiten. Es werden sowohl rotierende als auch reziprok arbeitende Instrumente verglichen (HyFlex™ EDM #20 mit Konizität 0,05; RECIPROC® blue #25 mit Konizität 0,08; VDW ROTATE™ #20 mit Konizität 0,05). Hier zeigt sich, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Feilensystemen gibt. Mit allen drei Feilensystemen können vergleichbare Ergebnisse erreicht werden.

Für die Auswertung der Ergebnisse kommen unterschiedliche Möglichkeiten in Betracht, wie z.B. die Analyse mittels Röntgenbildern (Tsesis I, 2008 , Vera et al., 2011), per fotografischer Dokumentation der einzelnen Zwischenschritte und späteren Projektion der einzelnen Aufnahmen übereinander (Goldberg F, 2002) oder per Mikro-CTs (Wiseman et al., 2011, Ma et al., 2015). In der vorliegenden Studie wird die direkte visuelle Auswertung mittels gefärbter Spüllösung durchgeführt. Diese findet nach dem letzten Aufbereitungsschritt jeder Versuchsreihe Anwendung und zeigt so, ob eine Durchgängigkeit am apikalen Foramen vorhanden ist oder nicht. Bei Durchfluss der gefärbten Spüllösung ist die Patency erreicht, bei Nichtdurchfluss derselben ist keine Kanaldurchgängigkeit gegeben. Durch die Verwendung von 3D-gedruckten Zähnen ist es als großer Vorteil anzusehen, dass pro Versuchsreihe jeweils dieselbe standardisierte Ausgangssituation vorliegt. Es wurde zudem ein durchsichtiges Kunststoffmaterial gewählt und dünne Schnitte der einzelnen Zähne angefertigt, so dass die Vorgänge intrakanalikulär per Videodokumentation für jede einzelne Aufbereitung wissenschaftlich dokumentiert und später detailliert ausgewertet werden können.

4.1.3. Rolle des Behandlers

In der durchgeführten Versuchsreihen werden die Zähne von nur einer Person aufbereitet. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse einerseits vom Geschick der ausführenden Person beeinflusst werden können, andererseits muss angemerkt werden, dass so ein besserer Vergleich innerhalb der unterschiedlichen Feilensysteme angestellt werden kann und die Ergebnisse durch den Einfluss behandlerbedingter Faktoren weniger verfälscht werden.

Es empfiehlt sich jedoch für künftige Studien, dass die Versuche nochmals von unterschiedlichen Behandlern durchgeführt werden, um dann den zusätzlichen Aspekt der „Behandlerrolle“ besser analysieren zu können.

4.2. Erreichen der Patency

Die besten Ergebnisse zur Erlangung eines durchgängigen Foramen apikale liefert die Aufbereitungsmethode „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“, bei der in 94,4 % der Fälle eine Durchgängigkeit erreicht wird. Dabei wird nach jeder Aufbereitungsfeile mit einer Zwischenstahlfeile #10 bis zum Foramen instrumentiert. Hierbei werden Auf- und Abbewegungen (1 - 2 mm) durchgeführt, um das zuvor entstandene Debris aufzulockern. Danach erfolgt die Spülung des Kanals, um das Material herauszubefördern. Nach dem vollständigen Reinigungs-, Desinfektions- und Formgebungsverfahren wird die Spüllösung mit der schallaktivierten Spülspitze im Wurzelkanal für drei Zyklen à 20 Sekunden aktiviert.

Vera et al. stellen 2011 in ihrer Studie ebenfalls fest, dass die Aufrechterhaltung der apikalen Durchgängigkeit und die anschließende Verwendung einer passiven Ultraschallspülung die Abgabe von Spülflüssigkeit in das apikale Drittel verbessert. Hierbei werden vierzig humane Testzähne in zwei Gruppen eingeteilt. In Gruppe eins wird während der Aufbereitung mit einer #10 K-Feile 1 mm über die Arbeitslänge instrumentiert, um die apikale Durchgängigkeit beizubehalten.

In Gruppe 2 dieser Studie wird ohne Zwischenfeile aufbereitet. Nach der Aufbereitung erfolgt in beiden Gruppen eine passive Ultraschallspülung (Vera et al., 2011). Im Unterschied zu den in vorliegender Studie durchgeführten Protokollen, wurde bei Vera et al. das konventionelle, standardisierte Aufbereitungsverfahren gewählt und mit der Zwischenfeile 1 mm über das Foramen apicale hinaus instrumentiert. Es kann bei der Auswertung der vorliegenden Untersuchungen aufgezeigt werden, dass für das Erreichen einer Kanaldurchgängigkeit die Überinstrumentierung von 1 mm nicht notwendig ist, um gute Ergebnisse im Hinblick auf ein von Debris freies Foramen zu erhalten. Es besteht also kein Grund, das periapikale Gewebe mit Feilen zu bearbeiten. Die passive Ultraschallspülung hat sich – wie auch in der Studie von Vera et al. (Vera et al., 2011) – als sehr effektiv erwiesen.

Zum selben Ergebnis kommt auch die Arbeit von Urban et al. (2017). Sie stellt ebenfalls einen signifikanten Unterschied im Vergleich verschiedener Aktivierungssysteme zur herkömmlichen Handspülung fest in Bezug auf das Entfernen von Debris und dem Smear Layer und der daraus resultierenden Kanaldurchgängigkeit. Die herkömmliche Handspülung unterliegt dabei deutlich (Urban et al., 2017).

Bemerkenswert und interessant sind in diesem Zusammenhang auch die Erkenntnisse hinsichtlich der nach abgeschlossener *in vivo* Wurzelkanalbehandlung auftretenden/nicht auftretenden postendodontischen Schmerzen. Bei Einhaltung/Nichteinhaltung der Kanaldurchgängigkeit kommen die Studien zu keinem einheitlichen Konsens.

Bei der Übersichtsarbeit und Metaanalyse von S. Abdulrab 2018 wird die Auswirkung der apikalen Durchgängigkeit/apikalen Blockade auf eventuell auftretende postendodontische Schmerzen hin bewertet. Hierbei kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es bei Aufrechterhaltung der apikalen Durchgängigkeit zu keiner erhöhten Inzidenz von postoperativen Schmerzen kommt (Abdulrab et al., 2018). Zum selben Resultat gelangt auch die Studie von I. Yaylali 2018. Es werden zwei Gruppen gebildet. In der ersten Gruppe erfolgt die Wurzelkanalbehandlung unter Einhaltung der apikalen Durchgängigkeit, in der zweiten Gruppe erfolgt diese ohne Erhaltung der Patency. Im Anschluss an die erfolgte Behandlung geben die Patienten aus Gruppe 1 an, weniger postoperative Schmerzen zu haben, als in der Vergleichsgruppe ohne Einhaltung der Patency (Yaylali et al., 2018). Dieselbe Aussage wird auch durch die Untersuchungen von M. Arora sowie der Studie von Garg unterstützt (Arora et al., 2016, Garg et al., 2017). Nachteilig ist anzumerken, dass in den Studien nicht bekannt ist, ob das Erreichen der Patency durch Überinstrumentierung – also 1 mm über das Foramen hinaus – erfolgt oder die Zwischenfeile direkt am Foramen endet.

Eine aktuelle Studie von A. Yousaf et al. 2021 zeigt hingegen, dass die Aufrechterhaltung der apikalen Patency bei nekrotischen Zähnen bei einer vorlie-

genden asymptomatischen apikalen Parodontitis zu keiner signifikanten Verringerung der postoperativen Schmerzen führt (Yousaf et al., 2021).

In der randomisierten Studie von Snigdha Shubham et al. wird ebenfalls der Einfluss auf die postendodontischen Schmerzen bei Erhaltung der Kanaldurchgängigkeit bewertet. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass die postoperativen Schmerzen bei Erhalt der Patency im Vergleich zur Nichterhaltung häufiger vorkommen. Hierbei erfolgt eine Überinstrumentierung mit flexiblen Handfeilen #10 über das Foramen apicale hinaus. Zudem wird berücksichtigt, ob der Zahn vor Behandlungsbeginn vital/avital war, ob bereits präoperative Schmerzen vorliegen und ob es sich um ein- oder mehrwurzlige Zähne handelt. Die Patienten geben vor Behandlungsbeginn und an den Tagen 1, 2 und 7 nach Behandlung unter Verwendung einer numerischen Bewertungsskala an, wie stark sie die Schmerzen empfinden. Beim sekundären Ergebnis zeigt sich, dass ein statistisch entscheidender Unterschied bei Erhalt der Patency besteht. Präoperative Schmerzen zeigen hier eine positive Korrelation mit postoperativen Schmerzen (Shubham et al., 2021). In der hier durchgeführten Studie können keine Angaben zu postendodontisch auftretenden oder nicht auftretenden Schmerzen gemacht werden, da die Protokolle an 3D-gedruckten Zähnen stattfinden. Bei der Analyse der Videos fällt jedoch auf, dass bereits bei Anwendung der Handfeilen bis zum Foramen und ebenso bei Anwendung der schallaktivierten Spülspitze aus Polyamid bis zum Foramen (ohne Überinstrumentierung) Debris über das Foramen ins periapikale Gewebe geschoben wird. Da es sich hierbei um infiziertes Material handelt, ist vorstellbar, dass postendodontische Schmerzen auftreten könnten. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass das über den Apex verlagerte Material nicht nur von den Schallspitzen und der Patency-Feile stammt, sondern dass dies bereits bei der regulären, schrittweisen Aufbereitung mit den maschinell betriebenen Feilen verursacht wird. Dieses Material fällt bei jeder Aufbereitungsmethode an, egal, ob das Patency-Konzept in konventioneller oder modifizierter Art Anwendung findet. Diskutiert werden kann, ob die Menge des Debris in der beschriebenen Versuchsdurchführung höher ausfällt als unter Realbedingungen, da *in vivo* das periapikale Gewebe einen Gegendruck ausübt und nur Raum für eine „gewisse Menge an Debris“

bietet und aus diesem Grund vermutlich nur geringere Mengen überpresst werden können, als im durchgeführten Versuch. In der Studie ist der Zahn in Wasser gelagert, wodurch sich die Kräfte und Platzverhältnisse anders abbilden. Ebenfalls ist gut vorstellbar, dass eine Korrelation zwischen prä- und postendodontisch auftretenden Schmerzen besteht, wenn unter Erhalt der Patency durch Überinstrumentierung von 1 mm über das Foramen hinaus noch mehr infiziertes Material über die apikale Grenze ins umliegende Gewebe verlagert werden kann, da bei der Aufbereitung mit der Patency-Feile 1 mm über das Foramen hinaus der Durchmesser und die Form des Foramen apicale durch den Feileneinsatz verändert werden.

Dies können auch Goldberg und Massone 2002 nachweisen. In 60 % der Fälle erfolgt nach Einsatz einer Patency-Feile eine Veränderung des Durchmessers am Foramen und es kommt in Folge zu einer Transportation von infiziertem Gewebe. Mit steigender Instrumentengröße nimmt diese proportional zu (Goldberg and Massone, 2002).

In der durchgeführten Studie soll herausgearbeitet werden, ob sich ein deutlicher Unterschied zwischen der Aufbereitungsmethode mit und ohne schallaktivierter Spülung abzeichnet. Hierzu ist zu sagen, dass zwischen allen vier Aufbereitungsprotokollen kein statistisch signifikanter Unterschied erkennbar ist. Der R^2 -Wert liegt bei der JMP-Analyse bei 0,0723, was bedeutet, dass die Unterschiedlichkeit der Verfahren zum Aufbereitungs- und Reinigungsvorgehen nur zu 7,2 % relevant für das Ergebnis der apikalen Kanaldurchgängigkeit ist. Diese Erkenntnisse decken sich mit dem Ergebnis des Likelihood Ratio Testes ($\chi^2 = 0,0385 > 0,05$) und unterstützen die Hypothese dahingehend, dass angenommen werden kann, dass die Hochrechnungen zu einem ähnlichen Ergebnis führen.

Die besten Ergebnisse bringt das Verfahren „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ mit 94,4 % Durchgängigkeit und „Stahlfeile P_f und Polyamidspitze_f am Ende“ mit 91,7 % hervor. Die reine Anwendung der Polyamidspitze am Ende der Aufbereitung schneidet mit 86,1 % etwas schlechter ab. Prozentual deutlich geringer fällt das Ergebnis jedoch im Hinblick auf ein durch-

gängiges Foramen mit alleiniger Anwendung der Patency-Feile am Ende der Aufbereitung aus. Hier gelingt es nur in 72,2 % der Fälle, dass das apikale Foramen frei wird.

Interessant ist das Ergebnis der Aufbereitungsmethode „Polyamidspitze_r am Ende“, das in 86,1 % der Fälle eine Patency hervorbringt. Bei dieser Methode kommen keine Zwischenhandfeilen zum Einsatz. Hier kommt die volle Effektivität der Polyamidspülspitze zum Tragen. Dieses Konzept ist für die Behandler maximal effektiv, da die Kanaldurchgängigkeit mit geringerem Instrumenteneinsatz erreicht wird und dabei zudem weniger Zeit beansprucht.

In der durchgeführten Studie soll auch der Aspekt miteinfließen, ob der Krümmungsgrad der Kanalmorphologie einen Einfluss auf die Patency hat.

Es kann gezeigt werden, dass die Unterschiedlichkeit der Zähne nur zu 21,55 % relevant für das Ergebnis der apikalen Kanaldurchgängigkeit ist. Der Likelihood Ratio Test ($\chi^2 = 0,1711$, $> 0,05$) unterstützt die Annahme dahingehend, dass unabhängig von der Kanalanatomie ähnliche Ergebnisse entstehen. Sowohl bei dem Zahn mit der geringsten als auch bei dem Zahn mit der stärksten Krümmung kann in 100 % der Fälle eine Kanaldurchgängigkeit erreicht werden. Dahingegen ist unter den verbleibenden Zähnen keine Regelmäßigkeit erkennbar. Es ist anzunehmen, dass es noch weitere Aspekte gibt, die ein Erreichen der Patency begünstigen oder erschweren. Es wird die Überlegung angestellt, ob es aufgrund des Foramendurchmessers selbst bzw. dem Durchmesser der Konstriktion oder dem Einsetzen der Krümmung Zusammenhänge gibt. Ein weiterer Gedanke ist, ob das Erreichen der Patency abhängig davon sein könnte, wie schmal oder breit der gesamte Kanalverlauf ist und wie weit in Folge die Spülkanüle während der passiven Spülung in den Kanal vordringen kann.

Beim genauen Analysieren der Videoaufnahmen sind einige interessante Details zu erkennen. Die wichtigsten sollen im Folgenden beschrieben werden.

Bei einem Zahn aus der leichten Kanalanatomie mit einer Krümmung von 6° sollte man erwartungsgemäß davon ausgehen können, dass die Ergebnisse besser ausfallen müssten als bei schwereren Kanalanatomien. Dies kann je-

doch anhand der Ergebnisse nicht bewiesen werden. Worin kann dies begründet sein, wenn der Krümmungswinkel nicht den alleinigen Ausschlag darstellt? Es liegt an dem Zahn ein geringer Durchmesser an der Konstriktion (0,133 mm) und am Foramen (0,318 mm) vor. Nach abgeschlossener Aufbereitung zeigt sich, dass die gefärbte Spüllösung beim Überprüfen, ob eine Durchgängigkeit erreicht wurde oder nicht, extrem fein aus dem Kanal fließt. Die Polyamidspülspitze erreicht das Foramen in einigen Fällen nicht oder nur schwer. Bei der Aufbereitung mit Mtwo[®]-Feilen im Verfahren „Stahlfeile P_f und Polyamidspitze_f am Ende“ kann die erste Patency-Feile einen Großteil des Debris lösen. Bereits beim ersten Einsatz der Polyamidspitze steigen Luftbläschen auf. Im Vergleich dazu treiben beim Verfahren „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ erst beim zweiten Spülspitzeneinsatz Luftbläschen auf. Beim alleinigen Einsatz der Patency-Feile am Ende kann weder bei der Aufbereitung mittels Mtwo[®]-Feilen, noch mit der HyFlex[™] EDM eine Patency erreicht werden. Die Patency-Feile schafft es am Ende nicht, das Debris zu lösen. Hier kann die Tatsache zum Tragen kommen, die auch Kahn et al. 1995 sowie Abou-Rass & Piccinino 1982 in ihren Arbeiten bereits feststellen, dass die Spülflüssigkeit nur in einem Radius von wenigen Millimetern um die Kanülenspitze herum ihre Wirkung zeigt. Mit zunehmendem Abstand zum Kanülenausgang nimmt die Energie ab, um das entstandene Debris zu lockern und aus dem Kanal zu befördern (Kahn et al., 1995, Abou-Rass and Piccinino, 1982). Die Ergebnisse der Autoren decken sich mit den Beobachtungen in der hier durchgeführten Studie und stützen deren Aussage.

In der Studie liefert die Aufbereitung eines Zahns mit einem Krümmungsradius von 60° im Hinblick auf die Kanaldurchgängigkeit sehr gute Ergebnisse, obwohl er einen der am stärksten gekrümmten Kanäle aufweist. Dies könnte damit zusammenhängen, dass hier zugleich einer der größten Durchmesser für das apikale Foramen (0,52 mm) und für die Konstriktion (0,31 mm) vorliegt. Die Kanüle kann weit Richtung apikal in den Kanal eingebracht werden. Vergleichbares kann auch bei einem weiteren Zahn beobachtet werden. Auch hier liegt ein großer Durchmesser am apikalen Foramen (0,50 mm) vor. Bei beiden Zähnen kann die Spülkanüle weit Richtung apikales Foramen einge-

bracht und so mit Hilfe von Patency-Feile und Spülspitze gelöstes Material effektiver an die Oberfläche befördert werden. Bereits beim erstmaligen Einsatz der Polyamidspitze kann in allen Fällen die Durchgängigkeit erreicht werden. Auch hier können die Ergebnisse der Studien von Kahn et al. und Abou Rass bestätigt werden (Kahn et al., 1995, Abou-Rass and Piccinino, 1982).

Bei einigen Zähnen zeigt sich, dass der erstmalige Einsatz der Polyamidspülspitze das Debris zwar auflockert, aber noch nicht vollständig lösen kann. Der zweite Zyklus mit der Spülspitze sorgt dafür, dass der Kanal sichtlich freier von Gewebsresten wird (siehe Fotoabfolge 2.3.4.3.). Die sich im Kanal befindliche Flüssigkeit ist zudem klarer als zuvor. Nach dem zweiten Spülspitzeneinsatz sind in den meisten Fällen aufsteigende Luftbläschen zu erkennen, die auf ein durchgängiges apikales Foramen hinweisen.

Die Studie von Franziska Haupt et al. 2020 bewertet die Wirksamkeit verschiedener aktivierter Spültechniken bei der Entfernung von Debris und dem Smear Layer aus gekrümmten Wurzelkanälen.

Die Kanäle weisen hierbei eine Krümmung von 20° - 40° auf. Die Zähne werden nach der Aufbereitung und Reinigung in Längsrichtung gespalten und per Rasterelektronenmikroskop ausgewertet. Die Aktivierung der Spülflüssigkeit verbessert die Entfernung der Schmierschicht signifikant. In Bezug auf das Debris im Kanal übertrifft die schallaktivierte Spülung die Spritzenspülung deutlich, wobei keine der Aktivierungstechniken in der Lage ist, das Debris und die Schmierschicht vollständig aus gekrümmten Wurzelkanälen zu entfernen (Haupt et al., 2020).

Ebenfalls auffällig ist, dass vor allem das RECIPROC® blue-Feilensystem in der Gesamtanalyse besser abschneidet. Dies könnte auf die stärkere Konizität an der Instrumentenspitze zurückzuführen sein. Diese ist deutlich größer als es beispielsweise bei der HyFlex™ EDM-Feile der Fall ist. Dadurch wird auch der apikale Bereich stärker aufbereitet und erleichtert somit das Erreichen einer apikalen Durchgängigkeit.

4.3. Zeitlicher Aspekt der Aufbereitung und Reinigung

Die Erfahrung der Behandler sowie die Aufbereitungstechnik haben einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. In der durchgeführten Arbeit wird die reine Aufbereitungszeit gemessen. Dies bedeutet, dass die Zeit nicht erfasst wird, die für einen Feilenwechsel oder das Aufziehen von Spüllösung in die Spritze sowie am Ende für das Spülen mit der gefärbten Spüllösung aufgebracht wird. Bei Betrachtung der unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden zeigt das Verfahren „Stahlfeile P_f am Ende“ den geringsten zeitlichen Aufwand. Im Mittel benötigt man 75,8 Sekunden, während hingegen beim Verfahren „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ der höchste zeitliche Aufwand zu erbringen ist. Hierfür werden im Mittel 180,3 Sekunden benötigt. Zwischen der schnellsten und der langsamsten Methode liegt somit eine Differenz von durchschnittlich 104,4 Sekunden, was auf den klinischen Ablauf betrachtet durchaus einen bedeutsamen Einfluss hat.

Dass das Verfahren „Stahlfeile P_f am Ende“ in Bezug auf die zeitliche Komponente besser abschneidet, als „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ dürfte jedoch keine Überraschung darstellen und leicht nachvollziehbar sein. Beim erstgenannten Verfahren kommt nach vollständiger Aufbereitung des Wurzelkanals erstmalig die Patency-Feile zum Einsatz. Hierbei werden 3 Zyklen à 10 kurzen Auf- und Abbewegungen bis auf Arbeitslänge (P_f) durchgeführt. Dazwischen erfolgt jeweils eine passive Spülung mittels Spritze und Kanüle. Beim Verfahren „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ wird nach jedem Aufbereitungsschritt ein Zyklus mit der Patency-Feile eingelegt. Am Ende der vollständigen Aufbereitung mittels Feilen erfolgen weitere 3 Zyklen à 10 kurzen Auf- und Abbewegungen bis auf Arbeitslänge, auch hier erfolgt jeweils eine Zwischenspülung. An diesen Vorgang schließt sich nun die aktivierte Spülung mit der Polyamidspitze an. Dies erfolgt ebenfalls in 3 Zyklen à 20 Sekunden. Auch hier erfolgt eine Zwischenspülung mittels Spritze und Kanüle. Allein der Einsatz der Polyamidspülspitze nimmt daher mindestens 60 Sekunden in Anspruch.

Im klinischen Alltag zählt natürlich nicht allein die zeitliche Komponente, sondern die Kombination der Verfahren, die eine Durchgängigkeit am sichersten in kürzester Zeit gewährleisten. Wie bereits zuvor beschrieben, nimmt die Wahl der Aufbereitungstechnik keinen signifikanten Einfluss auf die Patency. Schließt zwar das Verfahren „Stahlfeile P_f am Ende“ insgesamt am schlechtesten ab, so liegt die Varianz bei nur 7,2 %, was bedeutet, dass alle Verfahren zu einem ähnlichen Ergebnis führen und die gewählte Aufbereitungstechnik statistisch nicht ins Gewicht fällt.

4.4. Einschätzung Polyamidspülspitze

Die Polyamidspitze von VDW überzeugt durch die einfache Handhabung. Die Spitze ist durch die Wahl des Materials extrem flexibel und gleichzeitig formstabil. Die Einführung der Spitze in den Kanal wird durch die Schaftlänge von 28 mm vereinfacht. Schwierigkeiten bei der Einbringung in den Kanal könnten sich hierbei lediglich durch die Schaftlänge im Molarenbereich und die Mundöffnung des Patienten ergeben. Positiv ist hervorzuheben, dass durch die Biegsamkeit des Instruments der koronale Kanalanteil weniger weit freipräpariert und aufgeweitet werden muss, als bei herkömmlichen Methoden, da sich die Spitze der Kanalanatomie sehr gut anpassen kann. Dies trifft ebenfalls bei stark gekrümmten Wurzelkanälen zu. Die Feile muss hierfür nicht extra vorgebogen werden, um der Form zu folgen. In diesem Punkt ist die Polyamidspitze jeder metallischen Feile überlegen. Darüber hinaus ist die Bruchgefahr enorm reduziert. Zudem findet keine Begradigung des Kanals durch das Instrument selbst statt, was bei Handfeilen oft beobachtet werden kann. In den Videoaufnahmen wird die Effektivität der Spülspitze sehr gut dargestellt. Schon beim ersten Zyklus (20 Sek.) löst sich ein Großteil des im Kanal festsitzenden Debris und kann aufgelockert und herausgelöst werden.

5. Zusammenfassung

Die Studie mit 144 Zähnen umfasst 12 Versuchsreihen, die verschiedene Komplexitäten der Kanalanatomien abbilden. Innerhalb jeder Versuchsreihe werden drei unterschiedliche maschinelle Feilensysteme sowohl in rotierender als auch reziproker Anwendung verwendet. Pro Feilentyp werden vier unterschiedliche Aufbereitungsvorgehen durchgeführt.

Die Auswertung erfolgt klinisch anhand einer gefärbten Spüllösung, welche nach dem letzten Reinigungsschritt in den Kanal appliziert und zur optischen Prüfung eingesetzt, um eindeutig festzustellen, ob eine Patency erreicht wird oder nicht.

Die auf den Seiten 35 und 36 ausgeführten Fragestellungen führen im Rahmen der Möglichkeiten dieser *in vitro* Studie an 3D-gedruckten Zähnen zu folgenden Ergebnissen:

Die Patency wird am verlässlichsten mit der „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ erreicht, wenn nach jeder Aufbereitungsfeile eine Stahlzwischenfeile eingesetzt wird und am Ende der Aufbereitung eine Aktivierung der Spüllösung mittels schallaktivierter Polyamidspülspitze erfolgt.

Nahezu dieselben Ergebnisse können mit dem Aufbereitungsverfahren „Stahlfeile P_f und Polyamidspitze_f am Ende“ erreicht werden. Dabei wird auf die Anwendung der Zwischenfeile nach jedem Aufbereitungsinstrument verzichtet. So kann der zeitliche Aufwand bei dieser Aufbereitungsmethode wesentlich verkürzt werden – bei nahezu gleichbleibendem Ergebnis.

Die verschiedenen Aufbereitungsmethoden haben einen deutlichen Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Eindeutig ist, dass sich die Kanäle mit dem Vorgehen „Stahlfeile P_f am Ende“ am schnellsten aufbereiten lassen. Im Unterschied zum Vorgehen „Standard Patency-Technik bis zum Foramen“ ist der Unterschied

signifikant, während sich hingegen „Stahlfeile P_f am Ende“ und „Polyamidspitze_f am Ende“ nur gering unterscheiden.

Das Vorgehen „Stahlfeile P_f am Ende“ ist zwar das am schnellsten durchgeführte Aufbereitungsvorgehen, zugleich werden jedoch auch die schlechtesten Ergebnisse in Bezug auf die Durchgängigkeit erzielt. Deshalb ist diese Aufbereitungsmethode als obsolet zu betrachten.

Im Hinblick auf die unterschiedlich verwendeten Feilensysteme kann in dieser Studie vor allem das RECIPROC® blue #25 Feilensystem von VDW überzeugen und bringt die besten Ergebnisse hervor, gefolgt von Mtwo®-Feilen. Am schlechtesten sind die Ergebnisse bei Einsatz der HyFlex™-EDM Feilen. In Summe ist jedoch zu sagen, dass die unterschiedlichen Feilensysteme keinen nennenswerten Einfluss auf das Gesamtergebnis hinsichtlich des Erreichens der Patency nehmen.

Auch bei Betrachtung der unterschiedlichen Anforderungen der Kanal anatomien ist kein signifikanter Einfluss auf die Patency erkennbar. Sowohl der am wenigsten gekrümmte als auch der am stärksten gekrümmte Wurzelkanal kann in 100 % der Fälle eine vollständige Kanaldurchgängigkeit hervorbringen, während hingegen keine Gleichmäßigkeit innerhalb der anderen Testreihen erkennbar ist. Es wird deutlich, dass es weniger von der Krümmung als von der Größe des Foramendurchmessers und der gewählten Aufbereitungstechnik abhängt, ob eine Patency erzielt werden kann oder nicht.

Die Ergebnisse dieser Studie erlauben die Empfehlung auszusprechen, dass es für den Erfolg einer endodontischen Behandlung ausreichend ist, mit der Patency-Feile ausschließlich bis zum Foramen apicale zu instrumentieren und dass eine Überinstrumentierung von 1 mm über das apikale Foramen hinaus vermieden werden kann.

Das Erreichen der Patency wird maßgeblich vom Durchmesser am Foramen beeinflusst. Der Krümmungswinkel spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Ver-

bliebenes Debris im Kanal kann durch Einsatz der flexiblen modernen und schallaktivierten Polyamidspülspitze wesentlich leichter gelockert und aus dem Kanal befördert werden, sodass das Risiko einer apikalen Blockade am Foramen deutlich reduziert werden kann.

Ausblick:

Bei der JMP-Analyse werden 144 Zähne auf die oben genannten Aspekte hin ausgewertet. Die daraus gewonnenen Ergebnisse lassen einen Rückschluss auf die Qualitätsreproduzierbarkeit, den zeitlichen Aufwand, die erzielte bzw. nicht erreichte Patency und den Nutzen des Einsatzes moderner flexibler Schallspitzen zu. Jedoch liefern sie statistisch betrachtet noch keine relevante Aussage, da die Anzahl der Zähne für die Summe der betrachteten Parameter zu gering ist.

In zukünftigen Studien müsste die Anzahl der Zähne erhöht, die Protokolle von mehreren Behandlern durchgeführt und der Einsatz der Patency-Technik mit moderner Polyamidspülspitze an echten, humanen Zähnen – vor allem im Bereich der Molaren – untersucht werden. Daher kann die vorliegende Studie als richtungsweisend angesehen werden, ihre Ergebnisse müssten jedoch mit den Resultaten weiterer Studien gestützt werden.

Fazit:

Durch den Einsatz der Polyamidspülspitze kann die vollständige Aufbereitung des Wurzelkanals signifikant verbessert werden. In den meisten Fällen kann eine Patency erzielt werden, ohne dass es nötig ist, über das Foramen apicale hinaus zu instrumentieren und die Gefahr eines selbstverursachten periapikalen Traumas einzugehen.

Die vorliegende Arbeit belegt im Rahmen der Versuchsreihe mit 144 Zähnen, dass durch den Einsatz der flexiblen modernen Schallspitze eine Steigerung der Effizienz der Patency-Technik erreicht wird.

6. Literaturverzeichnis

- ABDULRAB, S., RODRIGUES, J. C., AL-MAWERI, S. A., HALBOUB, E., ALQUTAIBI, A. Y. & ALHADAINY, H. 2018. Effect of Apical Patency on Postoperative Pain: A Meta-analysis. *J Endod*, 44, 1467-1473.
- ABOU-RASS, M. & PICCININO, M. V. 1982. The effectiveness of four clinical irrigation methods on the removal of root canal debris. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 54, 323-8.
- AHIR, B., PAREKH, V., KATYAYAN, M. K. & KATYAYAN, P. A. 2014. Smear layer removal efficacy of different irrigating solutions: a comparative scanning electron microscope evaluation. *Indian J Dent Res*, 25, 617-22.
- AHMED, H. M. A., NEELAKANTAN, P. & DUMMER, P. M. H. 2018. A new system for classifying accessory canal morphology. *Int Endod J*, 51, 164-176.
- ALRAHABI, M. K. 2017. Evaluation of complications of root canal treatment performed by undergraduate dental students. *Libyan J Med*, 12, 1345582.
- ARORA, M., SANGWAN, P., TEWARI, S. & DUHAN, J. 2016. Effect of maintaining apical patency on endodontic pain in posterior teeth with pulp necrosis and apical periodontitis: a randomized controlled trial. *Int Endod J*, 49, 317-24.
- ARSLAN, H., AKCAY, M., CAPAR, I. D., SAYGILI, G., GOK, T. & ERTAS, H. 2015. An in vitro comparison of irrigation using photon-initiated photoacoustic streaming, ultrasonic, sonic and needle techniques in removing calcium hydroxide. *Int Endod J*, 48, 246-51.
- BAUMGARTNER, J. C. & CUENIN, P. R. 1992. Efficacy of several concentrations of sodium hypochlorite for root canal irrigation. *J Endod*, 18, 605-12.
- BELLAMY, D. R. 2003. Confine yourself to the canal. *Irish Dentist*.
- BLOME, B., BRAUN, A., SOBARZO, V. & JEPSEN, S. 2008. Molecular identification and quantification of bacteria from endodontic infections using real-time polymerase chain reaction. *Oral Microbiol Immunol*, 23, 384-90.
- BOUSIOUKIS, C., LAMBRIANIDIS, T., VERHAAGEN, B., VERSLUIS, M., KASTRINAKIS, E., WESSELINK, P. R. & VAN DER SLUIS, L. W. 2010. The effect of needle-insertion depth on the irrigant flow in the root canal: evaluation using an unsteady computational fluid dynamics model. *J Endod*, 36, 1664-8.
- BUCHANAN, L. S. 1989. Management of the curved root canal. *J Calif Dent Assoc*, 17, 18-25, 27.
- BYSTROM, A. & SUNDQVIST, G. 1985. The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. *Int Endod J*, 18, 35-40.
- CAILLETEAU, J. G. & MULLANEY, T. P. 1997. Prevalence of teaching apical patency and various instrumentation and obturation techniques in United States dental schools. *J Endod*, 23, 394-6.
- CHÁVEZ DE PAZ, L. E., BERGENHOLTZ, G. & SVENSÄTER, G. 2010. The effects of antimicrobials on endodontic biofilm bacteria. *J Endod*, 36, 70-7.
- COHEN S, B. R. 1994. Pathways of the pulp. 6th ed. St. Louis: Mosby.
- COLTENE. 2022. HyFlex™ EDM NiTi Feilen [Online]. <https://global.coltene.com/de/produkte/endodontie/rotierende-feilen/hyflex-rotierende-feilen//hyflextm-edm-niti-feilen/>. [Accessed 2. Januar 2022].
- CRAIG, R. G., MCILWAIN, E. D. & PEYTON, F. A. 1968. Bending and torsion properties of endodontic instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 25, 239-54.
- CUNNINGHAM, C. J. & SENIA, E. S. 1992. A three-dimensional study of canal curvatures in the mesial roots of mandibular molars. *J Endod*, 18, 294-300.
- DAVIS, S. R., BRAYTON, S. M. & GOLDMAN, M. 1972. The morphology of the prepared root canal: a study utilizing injectable silicone. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 34, 642-8.
- DGZMK 2005. Stellungnahme der DGZMK zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. *Deutsche Zahnärztliche Zeitung*, 60.

- DONNERMEYER, D., WYRSCH, H., BÜRKLEIN, S. & SCHÄFER, E. 2019. Removal of Calcium Hydroxide from Artificial Grooves in Straight Root Canals: Sonic Activation Using EDDY Versus Passive Ultrasonic Irrigation and XPendo Finisher. *J Endod*, 45, 322-326.
- E. HELLWIG, J. K., T. ATTIN 2013. *Einführung in die Zahnerhaltung*, Köln, Deutscher Zahnärzte Verlag.
- ENDODONTOLOGY, E. S. O. 2001. Undergraduate curriculum guidelines for endodontology. *Int Endod J*, 34, 574-80.
- ENDODONTOLOGY, E. S. O. 2006. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J*, 39, 921-30.
- FLANDERS, D. H. 2002. Endodontic patency. How to get it. How to keep it. Why it is so important. *N Y State Dent J*, 68, 30-2.
- FOSCHI, F., NUCCI, C., MONTEBUGNOLI, L., MARCHIONNI, S., BRESCHI, L., MALAGNINO, V. A. & PRATI, C. 2004. SEM evaluation of canal wall dentine following use of Mtwo and ProTaper NiTi rotary instruments. *Int Endod J*, 37, 832-9.
- FROUGHREYHANI, M., SALEM MILANI, A., BARAKATEIN, B. & SHIEZADEH, V. 2013. Treatment of Strip Perforation Using Root MTA: A Case Report. *Iran Endod J*, 8, 80-3.
- G. GRESSMANN, M. H. 2001. Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit dem FlexMaster-NiTi-System. *Endodontie*, 10 (3):227-241.
- GAMBARINI, G. & LASZKIEWICZ, J. 2002. A scanning electron microscopic study of debris and smear layer remaining following use of GT rotary instruments. *Int Endod J*, 35, 422-7.
- GARG, N., SHARMA, S., CHHABRA, A., DOGRA, A., BHATIA, R. & THAKUR, S. 2017. Clinical evaluation of maintenance of apical patency in postendodontic pain: An *in vivo* study. *Endodontology*, 29, 115-119.
- GLOSSEN, C. R., HALLER, R. H., DOVE, S. B. & DEL RIO, C. E. 1995. A comparison of root canal preparations using Ni-Ti hand, Ni-Ti engine-driven, and K-Flex endodontic instruments. *J Endod*, 21, 146-51.
- GMBH, V. 2014. VDW EDDY - Gebrauchsanweisung.
- GOLDBERG, F. & MASSONE, E. J. 2002. Patency file and apical transportation: an in vitro study. *J Endod*, 28, 510-1.
- GOLDBERG F, M. E. 2002. Patency file and apical transportation: an in vitro study. *J Endod. Jul;28(7):510-1. doi: 10.1097/00004770-200207000-00005. PMID: 12126377.*
- GOMES, B. P., VIANNA, M. E., ZAIA, A. A., ALMEIDA, J. F., SOUZA-FILHO, F. J. & FERRAZ, C. C. 2013. Chlorhexidine in endodontics. *Braz Dent J*, 24, 89-102.
- GOODMAN, A., READER, A., BECK, M., MELFI, R. & MEYERS, W. 1985. An in vitro comparison of the efficacy of the step-back technique versus a step-back/ultrasonic technique in human mandibular molars. *J Endod*, 11, 249-56.
- GRAWEHR, M., SENNER, B., WALTIMO, T. & ZEHNDER, M. 2003. Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions. *Int Endod J*, 36, 411-7.
- GREENE, K. J. & KRELL, K. V. 1990. Clinical factors associated with ledged canals in maxillary and mandibular molars. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 70, 490-7.
- GU, L. S., KIM, J. R., LING, J., CHOI, K. K., PASHLEY, D. H. & TAY, F. R. 2009. Review of contemporary irrigant agitation techniques and devices. *J Endod*, 35, 791-804.
- HAN, Y., BAI, Y. H. & HOU, X. M. 2018. [Glide path management of rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals]. *Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban*, 50, 148-153.
- HARRINGTON, G. W. & NATKIN, E. 1992. Midtreatment flare-ups. *Dent Clin North Am*, 36, 409-23.
- HAUPT, F., MEINEL, M., GUNAWARDANA, A. & HÜLSMANN, M. 2020. Effectiveness of different activated irrigation techniques on debris and smear layer removal from curved root canals: a SEM evaluation. *Aust Endod J*, 46, 40-46.

- HAUSER, V., BRAUN, A. & FRENTZEN, M. 2007. Penetration depth of a dye marker into dentine using a novel hydrodynamic system (RinsEndo). *Int Endod J*, 40, 644-52.
- HERGT, A. R., A.; HÜLSMANN, M. 2017. Removal of calcium hydroxide paste from root canals using four different irrigation techniques. In *18th ESE Biennial Congress - Poster presentation*.
- HÜLSMANN, M. 2008. *Checklisten der Zahnmedizin - Endodontie*, Stuttgart - New York, Georg Thieme Verlag.
- HÜLSMANN, M. & HAHN, W. 2000. Complications during root canal irrigation--literature review and case reports. *Int Endod J*, 33, 186-93.
- IZU, K. H., THOMAS, S. J., ZHANG, P., IZU, A. E. & MICHALEK, S. 2004. Effectiveness of sodium hypochlorite in preventing inoculation of periapical tissues with contaminated patency files. *J Endod*, 30, 92-4.
- JAFARZADEH, H. & ABBOTT, P. V. 2007. Ledge formation: review of a great challenge in endodontics. *J Endod*, 33, 1155-62.
- KAHN, F. H., ROSENBERG, P. A. & GLIKSBERG, J. 1995. An in vitro evaluation of the irrigating characteristics of ultrasonic and subsonic handpieces and irrigating needles and probes. *J Endod*, 21, 277-80.
- KAKEHASHI, S., STANLEY, H. & FITZGERALD, R. 1965. The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology*, 20, 340-349.
- KAPALAS, A. & LAMBRIANIDIS, T. 2000. Factors associated with root canal ledging during instrumentation. *Endod Dent Traumatol*, 16, 229-31.
- KARTAL, N. & CIMILLI, H. K. 1997. The degrees and configurations of mesial canal curvatures of mandibular first molars. *J Endod*, 23, 358-62.
- KAVAL, M. E., CAPAR, I. D. & ERTAS, H. 2016. Evaluation of the Cyclic Fatigue and Torsional Resistance of Novel Nickel-Titanium Rotary Files with Various Alloy Properties. *J Endod*, 42, 1840-1843.
- KHANNA, R., HANDA, A., VIRK, R. K., GHAI, D., HANDA, R. S. & GOEL, A. 2017. Clinical and Radiographic Evaluation of Procedural Errors during Preparation of Curved Root Canals with Hand and Rotary Instruments: A Randomized Clinical Study. *Contemp Clin Dent*, 8, 411-415.
- KIM, Y., CHANG, S. W., LEE, J. K., CHEN, I. P., KAUFMAN, B., JIANG, J., CHA, B. Y., ZHU, Q., SAFAVI, K. E. & KUM, K. Y. 2013. A micro-computed tomography study of canal configuration of multiple-canalled mesiobuccal root of maxillary first molar. *Clin Oral Investig*, 17, 1541-6.
- KIM, Y., LOVE, R. & GEORGE, R. 2017. Surface Changes of PathFile after Glide Path Preparation: An Ex Vivo and In Vivo Study. *J Endod*, 43, 1674-1678.
- KLAYMAN, S. M. & BRILLIANT, J. D. 1975. A comparison of the efficacy of serial preparation versus Giromatic preparation. *J Endod*, 1, 334-7.
- KLIMM, W. 2003. *Endodontologie. Grundlagen und Praxis*. Dt. ZÄ Verlag Köln, 42.
- KUTTLER, Y. 1955. Microscopic investigation of root apexes. *J Am Dent Assoc*, 50, 544-52.
- LAMBRIANIDIS, T., TOSOUNIDOU, E. & TZOANOPOULOU, M. 2001. The effect of maintaining apical patency on periapical extrusion. *J Endod*, 27, 696-8.
- LEE, S. J., WU, M. K. & WESSELINK, P. R. 2004. The effectiveness of syringe irrigation and ultrasonics to remove debris from simulated irregularities within prepared root canal walls. *Int Endod J*, 37, 672-8.
- LEONARDI, L. E., ATLAS, D. M. & RAIDEN, G. 2007. Apical extrusion of debris by manual and mechanical instrumentation. *Braz Dent J*, 18, 16-9.
- LI, D., JIANG, S., YIN, X., CHANG, J. W., KE, J. & ZHANG, C. 2015. Efficacy of Needle, Ultrasonic, and Endoactivator Irrigation and Photon-Induced Photoacoustic Streaming in

- Removing Calcium Hydroxide from the Main Canal and Isthmus: An In Vitro Micro-Computed Tomography and Scanning Electron Microscopy Study. *Photomed Laser Surg*, 33, 330-7.
- LIN, L. M., SKRIBNER, J. E. & GAENGLER, P. 1992. Factors associated with endodontic treatment failures. *J Endod*, 18, 625-7.
- LÓPEZ-MARCOS, J. F. 2004. Aetiology, classification and pathogenesis of pulp and periapical disease. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*, 9 Suppl, 58-62; 52-7.
- LÖST C, W. R., AXMANN-KRCMAR D 1995. Prognose von Wurzelkanalbehandlungen unter Anwendung der lateralen Kondensationstechnik und eines Glasionomerzementsealers. *Dtsch Zahnärztl Z*, 50:897-901.
- LÖST K, W. P., WINKLER R 1992. *Grundlagen und Prinzipien moderner Endodontie*. .
- MA, J. Z., SHEN, Y., AL-ASHAW, A. J., KHALEEL, H. Y., YANG, Y., WANG, Z. J., PENG, B. & HAAPASALO, M. 2015. Micro-computed tomography evaluation of the removal of calcium hydroxide medicament from C-shaped root canals of mandibular second molars. *Int Endod J*, 48, 333-41.
- MACHADO, R., FERRARI, C. H., BACK, E., COMPARIN, D., TOMAZINHO, L. F. & VANSAN, L. P. 2016. The Impact of Apical Patency in the Success of Endodontic Treatment of Necrotic Teeth with Apical Periodontitis: A Brief Review. *Iran Endod J*, 11, 63-6.
- MANDEL, E., ADIB-YAZDI, M., BENHAMOU, L. M., LACHKAR, T., MESGOUEZ, C. & SOBEL, M. 1999. Rotary Ni-Ti profile systems for preparing curved canals in resin blocks: influence of operator on instrument breakage. *Int Endod J*, 32, 436-43.
- MAQUIN, M., WEICK, J. M. & SÉVERIN, C. 1984. [Review of root canal treatment: indication and technics]. *Rev Odontostomatol (Paris)*, 13, 327-36.
- MARCELIANO-ALVES, M., ALVES, F. R., MENDES DDE, M. & PROVENZANO, J. C. 2016. Micro-Computed Tomography Analysis of the Root Canal Morphology of Palatal Roots of Maxillary First Molars. *J Endod*, 42, 280-3.
- MARROQUIN, B. G. A. R. L. W.-Z. B. 2012. Bedeutung der Spülung in der Endodontie. *In Zahnheilk Manag Kult*, pp. 11-20.
- MARTIN, G. & BLAŠKOVIĆG-ŠUBAT, V. 1997. Preparation of simulated root canals using the Macfile, Canal Master U and K-Flexofile. *International Endodontic Journal*, 30, 160-166.
- MARWA E SHARAAN, N. M. A.-E. 2012;1. Relationship between post-preparation pain and apical patency. A randomized clinical trial *Gulf Medical Journal*, (S1):S96-S101.
- MEYER, W. 1970. Die Anatomie der Wurzelkanäle, dargestellt an mikroskopischen Rekonstruktionsmodellen. *Dtsch Zahnärztl T*, 25, 1064-77.
- MISERENDINO, L. J., MISERENDINO, C. A., MOSER, J. B., HEUER, M. A. & OSETEK, E. M. 1988. Cutting efficiency of endodontic instruments. Part III. Comparison of sonic and ultrasonic instrument systems. *J Endod*, 14, 24-30.
- MOHAMMADI, Z. 2008. Sodium hypochlorite in endodontics: an update review. *Int Dent J*, 58, 329-41.
- MOORER, W. R. & WESSELINK, P. R. 1982. Factors promoting the tissue dissolving capability of sodium hypochlorite. *Int Endod J*, 15, 187-96.
- MORGENTAL, R. D., VIER-PELISSER, F. V., KOPPER, P. M., DE FIGUEIREDO, J. A. & PETERS, O. A. 2013. Cutting efficiency of conventional and martensitic nickel-titanium instruments for coronal flaring. *J Endod*, 39, 1634-8.
- NAENNI, N., THOMA, K. & ZEHNDER, M. 2004. Soft tissue dissolution capacity of currently used and potential endodontic irrigants. *J Endod*, 30, 785-7.
- NAGY, C., SZABÓ, J. & SZABÓ, J. 1995. A mathematically based classification of root canal curvatures on natural human teeth. *J Endod*, 21, 557-60.

- NAGY, C. D., BARTHA, K., BERNÁTH, M., VERDES, E. & SZABÓ, J. 1997. The effect of root canal morphology on canal shape following instrumentation using different techniques. *Int Endod J*, 30, 133-40.
- NEUHAUS, K. W., LIEBI, M., STAUFFACHER, S., EICK, S. & LUSSI, A. 2016. Antibacterial Efficacy of a New Sonic Irrigation Device for Root Canal Disinfection. *J Endod*, 42, 1799-1803.
- NYGAARD-OSTBY, B. 1962. seis años de experiencia clinic y experimental com el acido etilenodiamino tetracetico (EDTA) como coadjuvante en el terapia de los conductos radiculares. *Rev Assoc Odontol Argent*, 50, 75-95.
- PEREIRA, E. S., PEIXOTO, I. F., VIANA, A. C., OLIVEIRA, II, GONZALEZ, B. M., BUONO, V. T. & BAHIA, M. G. 2012. Physical and mechanical properties of a thermomechanically treated NiTi wire used in the manufacture of rotary endodontic instruments. *Int Endod J*, 45, 469-74.
- PÉREZ, A. R., RICUCCI, D., VIEIRA, G. C. S., PROVENZANO, J. C., ALVES, F. R. F., MARCELIANO-ALVES, M. F., RÔÇAS, I. N. & SIQUEIRA, J. F., JR. 2020. Cleaning, Shaping, and Disinfecting Abilities of 2 Instrument Systems as Evaluated by a Correlative Micro-computed Tomographic and Histobacteriologic Approach. *J Endod*, 46, 846-857.
- PETERS, L. B. & WESSELINK, P. R. 2005. [Root canal preparation: shaping and cleaning of the root canal]. *Ned Tijdschr Tandheelkd*, 112, 436-40.
- PETERS, O. A. 2004. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod*, 30, 559-67.
- PETERS, O. A., LAIB, A., GÖHRING, T. N. & BARBAKOW, F. 2001. Changes in root canal geometry after preparation assessed by high-resolution computed tomography. *J Endod*, 27, 1-6.
- PLOTINO, G., GRANDE, N. M., MERCADE, M., CORTESE, T., STAFFOLI, S., GAMBARINI, G. & TESTARELLI, L. 2019. Efficacy of sonic and ultrasonic irrigation devices in the removal of debris from canal irregularities in artificial root canals. *J Appl Oral Sci*, 27, e20180045.
- PRUETT, J. P., CLEMENT, D. J. & CARNES, D. L., JR. 1997. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod*, 23, 77-85.
- R. BEER, M. B. 1994. *Praktische Endodontie*, München-Wien-Baltimore, Urban und Schwarzenberg-Verlag.
- R. BEER, M. B. 1997. *Farbatlanten der Zahnmedizin - Endodontologie Bd. 7*, Stuttgart-New York, 4. Auflage, Tateitschak KH, Wolf, HF; Georg Thieme Verlag.
- RICUCCI, D. 1998. Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 1. Literature review. *Int Endod J*, 31, 384-93.
- RICUCCI, D. & LANGELAND, K. 1998. Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 2. A histological study. *Int Endod J*, 31, 394-409.
- ROANE, J. B., SABALA, C. L. & DUNCANSON, M. G., JR. 1985. The "balanced force" concept for instrumentation of curved canals. *J Endod*, 11, 203-11.
- ROSSI-FEDELE, G., DOĞRAMACI, E. J., GUASTALLI, A. R., STEIER, L. & DE FIGUEIREDO, J. A. 2012. Antagonistic interactions between sodium hypochlorite, chlorhexidine, EDTA, and citric acid. *J Endod*, 38, 426-31.
- RUDDLE, C. 2002. Cleaning and shaping the root canal system. In: Cohen S and Burns RC (eds) *Cohen's Pathways of the Pulp*. 8. St. Louis: C.V. Mosby Company, pp. 231–292.
- SAKAMOTO, M., RÔÇAS, I. N., SIQUEIRA, J. F., JR. & BENNO, Y. 2006. Molecular analysis of bacteria in asymptomatic and symptomatic endodontic infections. *Oral Microbiol Immunol*, 21, 112-22.
- SAKAMOTO, M., SIQUEIRA, J. F., JR., RÔÇAS, I. N. & BENNO, Y. 2007. Bacterial reduction and persistence after endodontic treatment procedures. *Oral Microbiol Immunol*, 22, 19-23.
- SCHÄFER, E. 1995. Das Instrumentarium zur manuellen Wurzelkanalaufbereitung. Teil 2: Wurzelkanalinstrumente aus Titanlegierungen. *Endodontie 4 (1995):305-312*.

- SCHÄFER, E. 1998a. Metallurgie und Eigenschaften von Nickel-Titan-Handinstrumenten. *Endodontie*, 4: 323-335.
- SCHÄFER, E. 1998b. *Wurzelkanalinstrumente für den manuellen Einsatz: Schneidleistung und Formgebung gekrümmter Kanalabschnitte. Habilitationsschriften der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde*, Berlin, Quintessenz-Verlags-GmbH.
- SCHÄFER, E., ERLER, M. & DAMMASCHKE, T. 2006. Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J*, 39, 196-202.
- SCHILDER, H. 1974. Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am*, 18, 269-96.
- SCHNEIDER, S. W. 1971. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 32, 271-5.
- SEDGLEY, C. M., NAGEL, A. C., HALL, D. & APPEGATE, B. 2005. Influence of irrigant needle depth in removing bioluminescent bacteria inoculated into instrumented root canals using real-time imaging in vitro. *Int Endod J*, 38, 97-104.
- SHUBHAM, S., NEPAL, M., MISHRA, R. & DUTTA, K. 2021. Influence of maintaining apical patency in post-endodontic pain. *BMC Oral Health*, 21, 284.
- SIQUEIRA JUNIOR, J. F., RÔÇAS, I. D. N., MARCELIANO-ALVES, M. F., PÉREZ, A. R. & RICUCCI, D. 2018. Unprepared root canal surface areas: causes, clinical implications, and therapeutic strategies. *Braz Oral Res*, 32, e65.
- SOUZA, R. 1998. Clinical and radiographic evaluation of the relation between the apical limit of the root canal filling and success in endodontics. . *Part 1. Braz Endod J* 3: 43-48.
- SOUZA, R. A. 2003. *Endodontia Clínica. São Paulo: Santos*.
- SOUZA, R. A. 2006. The importance of apical patency and cleaning of the apical foramen on root canal preparation. *Braz Dent J*, 17, 6-9.
- STUART, C. H., SCHWARTZ, S. A., BEESON, T. J. & OWATZ, C. B. 2006. Enterococcus faecalis: its role in root canal treatment failure and current concepts in retreatment. *J Endod*, 32, 93-8.
- SUNDQVIST, G., FIGDOR, D., PERSSON, S. & SJÖGREN, U. 1998. Microbiologic analysis of teeth with failed endodontic treatment and the outcome of conservative re-treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 85, 86-93.
- T., H. E. K. J. A. 2009. Einführung in die Zahnerhaltung. Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie. *Elmar Hellwig Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag*, pp. 1-657.
- TANALP, J. & GÜNGÖR, T. 2014. Apical extrusion of debris: a literature review of an inherent occurrence during root canal treatment. *Int Endod J*, 47, 211-21.
- TEPEL, J. 2000. *Experimentelle Untersuchungen über die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung. Habilitationsschrift*, Berlin, Quintessenz-Verlags-GmbH.
- TORABINEJAD, M. & WALTON, R. E. 1991. Managing endodontic emergencies. *J Am Dent Assoc*, 122, 99, 101, 103.
- TRONDSTAD, L. 2003. *Clinical Endodontics. A Textbook*, , 2. revised Ed: Thieme Verlag.
- TSEH I, A. B., TAMSE A, KFIR A. 2008 The effect of maintaining apical patency on canal transportation. . *Int Endod J. May;41(5):431-5. doi: 10.1111/j.1365-2591.2008.01387.x. Epub 2008 Feb 25. PMID: 18312378*.
- URBAN, K., DONNERMEYER, D., SCHÄFER, E. & BÜRKLEIN, S. 2017. Canal cleanliness using different irrigation activation systems: a SEM evaluation. *Clin Oral Investig*, 21, 2681-2687.
- VAN DER SLUIS, L. W., GAMBARINI, G., WU, M. K. & WESSELINK, P. R. 2006. The influence of volume, type of irrigant and flushing method on removing artificially placed dentine debris from the apical root canal during passive ultrasonic irrigation. *Int Endod J*, 39, 472-6.

- VAN DER SLUIS, L. W., VERSLUIS, M., WU, M. K. & WESSELINK, P. R. 2007a. Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature. *Int Endod J*, 40, 415-26.
- VAN DER SLUIS, L. W., WU, M. K. & WESSELINK, P. R. 2007b. The evaluation of removal of calcium hydroxide paste from an artificial standardized groove in the apical root canal using different irrigation methodologies. *Int Endod J*, 40, 52-7.
- VDW-GMBH. 2019. *VDW.ROTATE Produktdetails* [Online]. <https://www.vdw-dental.com/fileadmin/Dokumente/Sortiment/Aufbereitung/Rotierende-Aufbereitung/ROTATE/VDW-Dental-ROTATE-Produktbroschuere-1-DE.pdf> [Accessed 2 Januar 2021].
- VDW-GMBH. 2022. *Mtwo* [Online]. <https://www.vdw-dental.com/de/sortiment/produktdetail/mtwo/>. [Accessed 2. Januar 2022].
- VERA, J., ARIAS, A. & ROMERO, M. 2011. Effect of maintaining apical patency on irrigant penetration into the apical third of root canals when using passive ultrasonic irrigation: an in vivo study. *J Endod*, 37, 1276-8.
- VERTUCCI, F. J. 1984. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 58, 589-99.
- VIANA, A. C., CHAVES CRAVEIRO DE MELO, M., GUIOMAR DE AZEVEDO BAHIA, M. & LOPES BUONO, V. T. 2010. Relationship between flexibility and physical, chemical, and geometric characteristics of rotary nickel-titanium instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 110, 527-33.
- VON VELZEN SKT, G. J., KERSTEN HW, MOORER WR, WESSELINK PR 1988. Endodontie. Köln: *Deutsche Ärzte-Verlag GmbH*, 121-137.
- WALTIMO, T. M., SEN, B. H., MEURMAN, J. H., ØRSTAVIK, D. & HAAPASALO, M. P. 2003. Yeasts in apical periodontitis. *Crit Rev Oral Biol Med*, 14, 128-37.
- WEBER 2010. Memorix Zahnmedizin. Stuttgart: *Georg Thieme Verlag*.
- WELLER, R. N., BRADY, J. M. & BERNIER, W. E. 1980. Efficacy of ultrasonic cleaning. *J Endod*, 6, 740-3.
- WILLERSHAUSEN B, T. H., SCHULZE R, BRISEÑO B. 2005. Bestimmung und Bedeutung von Wurzelkanalkrümmungen und Längenverhältnissen von OK-Prämolaren. *Dtsch Zahnärztl Z*, 60 (2): 87-90.
- WISEMAN, A., COX, T. C., PARANJPE, A., FLAKE, N. M., COHENCA, N. & JOHNSON, J. D. 2011. Efficacy of sonic and ultrasonic activation for removal of calcium hydroxide from mesial canals of mandibular molars: a microtomographic study. *J Endod*, 37, 235-8.
- WJ BUEHLER, F. W. 1968. A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering. *Ocean Engng.*, 1:105-120.
- WU, M. K. & WESSELINK, P. R. 1995. Efficacy of three techniques in cleaning the apical portion of curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 79, 492-6.
- XHEVDET, A., STUBLJAR, D., KRIZNAR, I., JUKIC, T., SKVARC, M., VERANIC, P. & IHAN, A. 2014. The disinfecting efficacy of root canals with laser photodynamic therapy. *J Lasers Med Sci*, 5, 19-26.
- YAYLALI, I. E., KURNAZ, S. & TUNCA, Y. M. 2018. Maintaining Apical Patency Does Not Increase Postoperative Pain in Molars with Necrotic Pulp and Apical Periodontitis: A Randomized Controlled Trial. *J Endod*, 44, 335-340.
- YILMAZ, K., USLU, G. & ÖZYÜREK, T. 2017. In vitro comparison of the cyclic fatigue resistance of HyFlex EDM, One G, and ProGlider nickel titanium glide path instruments in single and double curvature canals. *Restor Dent Endod*, 42, 282-289.
- YOUSAF, A., ALI, F., BHANGAR, F. & ALAM, M. 2021. Effect of Apical Patency on Postoperative Pain after Single-visit Endodontic Treatment in Necrotic Teeth with Asymptomatic Apical Periodontitis: A Randomised Control Trial. *J Coll Physicians Surg Pak*, 31, 1154-1158.

- ZEHNDER, M., LEHNERT, B., SCHÖNENBERGER, K. & WALTIMO, T. 2003. [Irrigants and intracanal medicaments in endodontics]. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 113, 756-63.
- ZENG, C., WILLISON, J., MEGHIL, M. M., BERGERON, B. E., CUTLER, C. W., TAY, F. R., NIU, L. & MA, J. 2018. Antibacterial efficacy of an endodontic sonic-powered irrigation system: An in vitro study. *J Dent*, 75, 105-112.
- ZEPPENFELD, W. 2015. Wurzelkanalspülung neu gedacht. *In Dental Magazin*, 33 (7), pp. 48-53.
- ZUPANC, J. & SCHÄFER, E. 2017. Neue Nickel-Titan-Legierungen. *Endodontie*, 26, 269-281.

7. Erklärung zum Eigenanteil

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit an der Universitätsklinik für Zahn-,Mund- und Kieferheilkunde in der Poliklinik für Zahnerhaltung Tübingen unter Betreuung von PD Dr. med. dent. Ashraf ElAyouti selbstständig und ohne fremde Hilfe durchgeführt habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher keinem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Tübingen, den 08.11.2023

8. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. ElAyouti für die Bereitstellung des Dissertationsthemas und die hervorragende Betreuung. Vielen Dank für Ihr Engagement, Ihre Unterstützung und Ihre Geduld, welche entscheidend zum Gelingen der Dissertation beigetragen haben.

Ein Dankeschön gilt auch Frau Carmen Buckley (Leiterin des Oberarztsekretariats der konservierenden Zahnheilkunde), die sich beim Korrekturlesen der Dissertation mit viel Mühe und Genauigkeit eingebracht hat und stets ein offenes Ohr für Fragen hatte.

Meinen Eltern danke ich für die Unterstützung während meines gesamten Studiums der Zahnmedizin.

