

Aus dem Institut für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin
im Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Retrospektive vergleichende Analyse des Erfolgs von
Wurzelkanalbehandlungen mit Mehrfeilensystemen und
Einfeilensystemen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Lisa Andrä
aus Herzberg (Elster)

Datum der Promotion: 16.06.2018

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Abstrakt	VI
Abstract.....	VIII
1. Einleitung.....	1
1.1. Einleitende Worte	1
1.2. Ziel der Wurzelkanalbehandlung.....	1
1.3. Manuelle Wurzelkanalaufbereitung.....	2
1.3.1. Historische Entwicklung.....	2
1.3.2. Eigenschaften und Aufbau der Instrumente.....	2
1.3.3. Manuelle Aufbereitungstechniken.....	5
1.4. Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung.....	9
1.4.1. Maschinelle Antriebsmotoren	9
1.4.2. Nickel-Titan-Wurzelkanalinstrumente	10
1.4.3. Mehrfeilensystem ProTaper® Universal	14
1.4.4. Einfeilensystem WaveOne™	15
1.4.5. Wurzelfülltechniken	16
1.5. Aktueller wissenschaftlicher Stand.....	17
1.6. Ziel der Untersuchung.....	21
2. Material und Methode	22
2.1. Studiendesign.....	22
2.2. Einschlusskriterien.....	22
2.3. Ausschlusskriterien.....	22
2.4. Behandlungsprotokolle	23
2.4.1. ProTaper® Universal.....	23
2.4.2. WaveOne™.....	25
2.5. Materialien und Geräte	27
2.5.1. Geräte und Hilfsmittel.....	27
2.5.2. Verbrauchsmaterialien:.....	28
2.5.3. Röntgengeräte	29
2.6. Recall und Outcomeparameter	30
2.7. Definition Erfolg	33
2.8. Reliabilitätsuntersuchung.....	34
2.9. Statistik.....	34

3. Ergebnisse	35
3.1. Deskriptive Statistik	35
3.1.1. Behandlungsfälle.....	35
3.1.2. Geschlecht	35
3.1.3. Alter.....	36
3.1.4. Zahnverteilung.....	37
3.1.5. Vorbehandlung	38
3.1.6. Vitalität	39
3.1.7. Recallzeitraum.....	40
3.1.8. Kanalsituation.....	41
3.1.9. Länge der Wurzelkanalfüllung	41
3.1.10. Homogenität.....	43
3.1.11. Kanalverlauf	44
3.1.12. Apikale Ausgangssituation	45
3.1.13. Veränderung des periapikalen Indexes und prozentuale Erfolgsrate	46
3.2. Explorative Statistik	49
3.2.1. TTest und Korrelationskoeffizienten	49
3.2.2. Korrelationen nach Pearson	51
3.2.3. Logistische Regressionsanalyse mit SPSS	52
3.2.4. Modellgüte.....	55
3.2.5. Formulierung des Regressionsmodells und Berechnung der Erfolgswahrscheinlichkeit	55
4. Diskussion	57
4.1. Bewertung der Ergebnisse.....	57
4.2. Ordinale logistische Regressionsanalyse.....	68
4.3. Vergleich zu anderen Studien	70
4.4. Limitationen der Studie	70
5. Literaturverzeichnis	74
6. Eidesstattliche Versicherung	84
7. Lebenslauf	85
8. Danksagung	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Aufbau konventionelle Feile, [7].....	3
Abbildung 2 Aufbau Reamer, [8]	4
Abbildung 3 Aufbau K-Feile, [8].....	4
Abbildung 4 Aufbau Hedstroemfeile, [8]	5
Abbildung 5 Elbow-Zip-Effekt, [9]	6
Abbildung 6 Bild eine ProTaper®-Feile	14
Abbildung 7 Bild einer WaveOne™-Feile	15
Abbildung 8 Bild eines Thermafilobturator	17
Abbildung 9 Beispiel Bestimmung Wurzelkanalkrümmung	31
Abbildung 10 Zahnverteilung.....	37
Abbildung 11 Bilanz Quadrant versus Erfolg	37
Abbildung 12 Länge der Wurzelkanalfüllung ProTaper®.....	41
Abbildung 13 Länge der Wurzelkanalfüllung WaveOne™	42
Abbildung 14 Homogenität ProTaper®.....	43
Abbildung 15 Homogenität WaveOne™	43
Abbildung 16 Behandlungserfolg / ProTaper® (grau) und WaveOne™ (weiß)	46
Abbildung 17 Beispiel Erfolg (2) mit Ausgang PAI 2 (links) und Recall PAI 4 nach 83 Monaten (rechts).....	47
Abbildung 18 Beispiel Misserfolg (-2) mit Ausgang PAI 3 (links) und Recall PAI 1 nach 11 Monaten (rechts).....	47
Abbildung 19 Beispiel Misserfolg (0) mit Ausgang PAI 1 (links) und Recall PAI 1 nach 6 Monaten (rechts).....	47
Abbildung 20 Beispiel Erfolg (2) mit Ausgang PAI 2 und Recall PAI 4 nach 28 Monaten.....	48
Abbildung 21 Beispiel Erfolg (0) mit Ausgang PAI 4 und Recall PAI 4 nach 3 Monaten.....	48
Abbildung 22 Beispiel Misserfolg (-1) mit Ausgang PAI 3 und Recall PAI 2 nach 15 Monaten.....	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Geräte und Hilfsmittel	27
Tabelle 2 Verbrauchsmaterialien	28
Tabelle 3 Codierung Periapikaler Index.....	33
Tabelle 4 Altersgruppen	36
Tabelle 5 Vorbehandlung ProTaper® und WaveOne™	38
Tabelle 6 Vorbehandlung zusammengefasst in Zusammenhang mit der Vitalität	39
Tabelle 7 Recallzeitraum ProTaper® und WaveOne™	40
Tabelle 8 Kanalsituation ProTaper® und WaveOne™	41
Tabelle 9 Kanalverlauf ProTaper® und WaveOne™	44
Tabelle 10 Apikale Ausgangssituation ProTaper® und WaveOne™	45
Tabelle 11 Signifikanz der Unterschiede in der Verteilung der Werte berechnet mit TTest bezogen auf Feilensystem und Erfolg; signifikante Werte sind hervorgehoben, durchgestrichene Zellen $p \geq 0,05$	50
Tabelle 12 Korrelationskoeffizient zu Erfolg / Feilensystem	51
Tabelle 13 Nullmodell (ohne unabhängige Variablen)	53
Tabelle 14 Klassifizierungstabelle mit Einschluss der unabhängigen Variablen	53
Tabelle 15 SPSS – Output – Regressionskoeffizienten	54

Abstrakt

Einleitung

Die Aufbereitung des Wurzelkanals stellt einen wichtigen Therapieschritt in der endodontischen Behandlung dar. In den letzten Jahrzehnten gab es einige Weiterentwicklungen im Bereich der maschinellen Aufbereitung, neben den vollrotierenden Mehrfeilensystemen hat sich das reziproke Einfeilensystem etabliert. In der retrospektiven *in vivo* Untersuchung sollte geklärt werden, inwiefern Unterschiede in der Qualität und der Erfolgswahrscheinlichkeit bei Wurzelkanalbehandlungen mit Mehrfeilensystem und Einfeilensystem bestehen. Zusätzlich wurde untersucht, welche Faktoren den größten Einfluss auf den Erfolg ausübten.

Methodik

Untersucht wurden Molaren ($n = 292$), die zwischen Januar 2007 und September 2016 in einer zahnärztlichen Gemeinschaftspraxis endodontisch behandelt wurden. 152 Zähne sind mit ProTaper® therapiert worden, 140 Zähne mit WaveOne™. Bewertungen wurden anhand prä- und postendodontischer Röntgenbilder durchgeführt, bei einem Recallzeitraum von mindestens 3 Monaten. Der Erfolg wurde mithilfe des periapikalen Index beurteilt [1]. Für die Einschätzung der Qualität wurden die Parameter Wurzelfülllänge, Beibehaltung des Kanalverlaufs und Homogenität bestimmt. Weitere mögliche Einflussfaktoren wie Feilensystem, Patientenalter, Geschlecht, Zahntyp, Recallzeitraum, Kanalkrümmung und Zahnvorbehandlung wurden erhoben und mituntersucht. Welche der genannten unabhängigen Variablen signifikanten Einfluss auf das Endergebnis hatten, wurde mithilfe einer dichotomen logistischen Regressionsanalyse erörtert. Das Signifikanzniveau wurde auf $p \leq 0,05$ festgelegt.

Ergebnisse

Die statistische Auswertung ergab einen signifikanten Einfluss der Parameter Wurzelfülllänge, periapikaler Index und Feilensystem. Eine überextendierte Wurzelfüllung ergab einen negativen Einfluss auf das Endergebnis ($p = 0,048$), ebenso periapikale Destruktionen ($p < 0,001$). Lege artis gelegte Wurzelfüllungen ($p = 0,017$) und das Feilensystem WaveOne™ ($p = 0,002$) haben einen signifikant positiven Einfluss auf den Ausgang der Behandlung. Nach Erstellung einer Regressionsgleichung wurde

eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 62,7 % für ProTaper® und 80,8 % für WaveOne™ berechnet.

Schlussfolgerung

Die Erfolgswahrscheinlichkeiten werden maßgeblich durch das gewählte Feilensystem beeinflusst. Unberücksichtigt anderer Faktoren, geht die Empfehlung in Richtung Nutzung von Einfeilensystemen wie WaveOne™. Auch der Einflussfaktor der Wurzelfülllänge ist durch den Behandler steuerbar. Der Parameter der präendodontischen periapikalen Lyse stellt den stärksten Einflussfaktor dar, gleichzeitig auch eine nichtänderbare Größe. Diesbezüglich sollte vor Beginn jeder Behandlung das prognostische Risiko mit dem Patienten besprochen werden.

Abstract

Introduction

The preparation of the root canal is an important step in endodontic treatment. In recent decades there have been further developments in the field of mechanical treatment. In addition to the full-sequence rotary systems the single-file reciprocating system has established itself. In the retrospective *in vivo* study the aim was to clarify to what extent there are differences in the quality and the success rate in root canal treatments with a multi-file system and a single-file system. Furthermore, it was to be examined which factors exerted the greatest influence on success.

Materials and methods

Examinations were conducted on molars ($n = 292$) which were endodontically treated in a dental practice between January 2007 and September 2016. 152 teeth have been treated by ProTaper® and 140 teeth by Wave-One™. Evaluations were performed using pre- and postendodontic x-rays with a recall period of at least 3 months. The success was assessed using the periapical index [1]. For estimating the quality the parameters root filling length, retention of the root canal direction and homogeneity were determined. Further possible influencing factors such as file system, patient age, sex, tooth type, recall period, root canal curvature and tooth pre-treatment were collected and examined. The independent variables, which had a significant influence on the outcome, were discussed using a dichotomous logistic regression analysis. The significance level was set to $p \leq 0.05$.

Results

The statistical evaluation showed that the parameter root filling length, periapical index and file-system used have a significant influence on the success of the treatment. An overextended root filling demonstrated a bad influence on the final result ($p = 0.048$), as well as periapical destruction ($p < 0.001$). Layered root fillings ($p = 0.017$) and the WaveOne™ file-system ($p = 0.002$) have a significantly positive effect on the outcome of the treatment. After a regression equation was established the probability of success for the multi-file system ProTaper® was 62.7 % and for WaveOne™ it was 80.8 %.

Conclusion

The success rates are heavily influenced by the chosen file system. Unless other factors are taken into account the recommendation would be to use a single-file reciprocating system such as WaveOne™. The root filling length as an influencing factor can also be controlled by the dentist. The preendodontic periapical lysis parameter represents the strongest influencing factor, however, at the same time it is also an unchangeable parameter. Therefore, the prognostic risk should be discussed with the patient before commencing treatment.

1. Einleitung

1.1. Einleitende Worte

Mit Einführung der maschinellen Aufbereitungssysteme mittels Nickel-Titan-Feilen kam es zu einem Wendepunkt in der Endodontie. Die Aufbereitung der Wurzelkanäle wurde erleichtert und die Behandlung gekrümmter Kanäle erfuhr eine innovative Entwicklung. Viele Systeme haben sich bereits auf dem Markt etabliert und sind wissenschaftlich gut untersucht. Obwohl eine erfolgreiche Therapie von vielen Faktoren beeinflusst wird, ist die chemo-mechanische Aufbereitung der Wurzelkanäle wohl einer der entscheidendsten Schritte im Verlauf einer endodontischen Behandlung [2]. Die Erschließung der Kanalsysteme ist die Voraussetzung für jeden weiteren Therapieschritt. Die Qualität der Wurzelfüllung und schließlich der endodontische Erfolg korrelieren mit der Art der Aufbereitung [3]. Mit der Einführung der Einfeilensysteme wurde ein weiterer Meilenstein gelegt [4]. Das häufige Wechseln der Feilen innerhalb einer Behandlung und die problematische Sterilisation der Instrumente erübrigten sich. Damit wurde der Arbeitsablauf erleichtert und die Behandlungszeit deutlich gekürzt [4]. Ob die Qualität unter diesem Aspekt einen Nachteil erfährt, sollte in dieser retrospektiven Studie unter *klinischen* Bedingungen analysiert werden. Verglichen wurde das etablierte Mehrfeilensystem ProTaper® Universal mit dem Einfeilensystem WaveOne™ unter verschiedenen Gesichtspunkten.

1.2. Ziel der Wurzelkanalbehandlung

Die europäische Gesellschaft für Endodontologie hat in einem Konsenspapier, welches 1994 erstmals publiziert wurde, Qualitätsrichtlinien zum Thema endodontische Behandlung bestimmt. Um jedem Praktiker einen gewissen Standard zu vermitteln, wurden in dieser Publikation die unterschiedlichen Behandlungsmodalitäten, Qualitätsstandards und Ziele der Wurzelkanalaufbereitung aufgezeigt. Oberstes Ziel ist der Erhalt des pulpal erkrankten Zahnes durch die vollständige Ausräumung des Kanalsystems von infiziertem und/oder devitalem Gewebe. Dabei sollte eine umfangreiche Desinfektion stattfinden, um so viele Mikroorganismen und Debris wie möglich zu eliminieren. Weiterhin sollten die Wurzelkanäle nach Aufbereitung eine Form

aufweisen, die die Desinfektion und Füllung des Kanalsystems ermöglichen. Hierbei muss auf den Erhalt der ursprünglichen Kanalanatomie geachtet und Stufen-, Zip- und Elbowbildung vermieden werden. Der Kanal sollte sich von koronal nach apikal konisch verengen und an der Wurzelspitze seine natürliche Konstriktion beibehalten [2].

1.3. Manuelle Wurzelkanalaufbereitung

1.3.1. Historische Entwicklung

Bereits 4000 v.Chr. wurde in chinesischen Schriften über die Behandlung von Pulpaerkrankungen mittels Arsen berichtet. In den nächsten 5000 Jahren wurden Erkrankungen des Endodonts mit narkotisierenden Mitteln und Kauterisierung durch glühend heiße Drähte behandelt. Die Anwendung dieser Methoden beschränkte sich jedoch auf das Pulpenkavum. Erst Faluccci (1357-1411) wendete erstmals die Instrumentierung der Wurzelkanäle durch getränkte und mit Wolle ummantelte Nadeln an. Das Ziel der Beseitigung akuter Schmerzen mittels zuvor genannten Methoden wurde bis ins 19. Jahrhundert verfolgt. Erst danach kam es zu einer Reformation in der Behandlungsart. So wurden ab diesem Jahrhundert eher die chemischen Substanzen zur Devitalisierung und die vollständige Entfernung des Pulpengewebes durch Anwendung von feilenähnlichen Instrumenten in den Vordergrund gestellt. Es folgte eine stetige Weiterentwicklung der Wurzelkanalinstrumente und 1974 schließlich die Einführung der ISO-Normen [5].

1.3.2. Eigenschaften und Aufbau der Instrumente

Bis 1960 kamen Karbonstähle als Materialgrundlage für die Instrumente zum Einsatz, danach folgten rostfreie Edelmehle. Schließlich kam es 1988 durch Walia et al. zur Einführung der Nickel-Aluminium- und Nickel-Titan-Legierungen [6]. Für die manuelle Wurzelkanalaufbereitung steht eine Auswahl an drei verschiedenen ISO-genormten Instrumententypen zur Verfügung: Reamer, K-Feile und Hedstroemfeilen.

Die Feilen bestehen aus Griff, Schaft und Arbeitsteil. Am Griff kann der jeweilige Instrumententyp abgelesen werden. Ein dreieckiges Symbol steht für Reamer, ein Viereck ist gleichbedeutend mit K-Feile und die Hedstroemfeile ist durch einen Kreis am Ende des Handgriffs gekennzeichnet. Je nach Länge des Kanals unterscheidet sich die Länge des Schafts. Sie liegt jedoch stets im Bereich von 5 – 15 mm. Das Arbeitsteil weist eine Länge von 16 mm auf. Daraus ergibt sich eine Instrumentenlänge von 21 – 31 mm. Das Arbeitsteil besitzt zwei verschiedene Durchmesser, an der Spitze D_1 und am Ende des Arbeitsteils D_2 . Der Durchmesser wird als ISO-Stärke 1 / 100 mm angegeben. Dies bedeutet, dass der Durchmesser pro 1 mm um 0,02 mm zunimmt. So ergibt sich bei einer Konizität von 2 % eine Differenz ($D_2 - D_1$) von 0,32 mm. Die Konizität bei Handinstrumenten liegt im Gegensatz zu maschinellen Aufbereitungsfeilen immer bei 2 %.

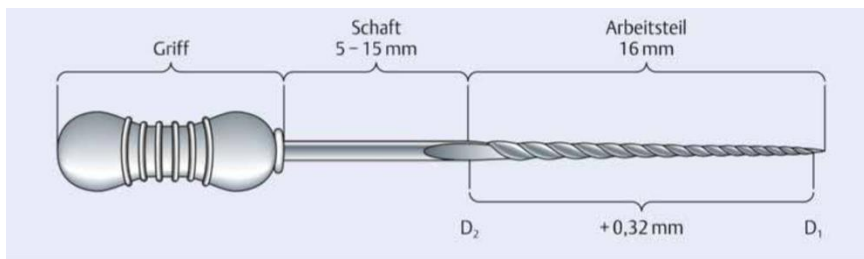


Abbildung 1 Aufbau konventionelle Feile, [7]

Die drei genannten Grundtypen unterscheiden sich in den Eigenschaften Instrumentenquerschnitt, Spanraum und Schneidekantenwinkel. Der Instrumentenquerschnitt zeichnet die jeweilige Bruchfestigkeit und Flexibilität des Instruments aus. Je großflächiger der Kern des Arbeitsteils ist, desto massiver und bruchfester ist das Instrument. Schlussfolgernd ist damit die Flexibilität eingeschränkt [7]. Zusätzlich wird durch die Geometrie des Kerns der Spanraum bestimmt, welcher bei viereckigem Durchmesser am geringsten ist. Der Schneidekantenwinkel wird gebildet durch die Achse des Instruments und der Schneidekante. Er gibt an, wie das Instrument im Kanal zu führen ist, um möglichst effizient zu arbeiten. So sollte bei Winkeln unter 45° rotierend, schabend gearbeitet werden (K-Feilen und Reamer). Hedstroemfeilen mit einem Schneidekantenwinkel von bis zu 65° sollten dagegen linear, ziehend im Kanal bewegt werden [8].

Reamer

Diese Instrumente besitzen einen verwundenen Dreikantquerschnitt mit einem Spanraum von 60 %. Bei kleineren Größen weist dieser einen viereckigen Querschnitt mit einem Spanraum von 36 % auf. Ihr Schneidekantenwinkel beträgt 10 – 30° [7].

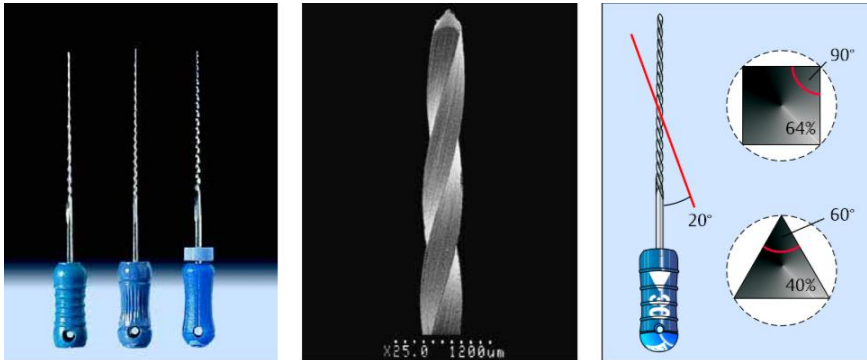


Abbildung 2 Aufbau Reamer, [8]

K-Feilen

Auch diese Feilen besitzen bei kleineren ISO-Größen einen viereckigen Querschnitt. Ab einer ISO-Größe von 30 (Herstellerangaben von VDW) findet man einen dreieckigen Querschnitt. Der Schneidekantenwinkel bewegt sich zwischen 25 – 40°. Damit weist die Feile eine deutlich höhere Windungszahl als Reamer auf [7].

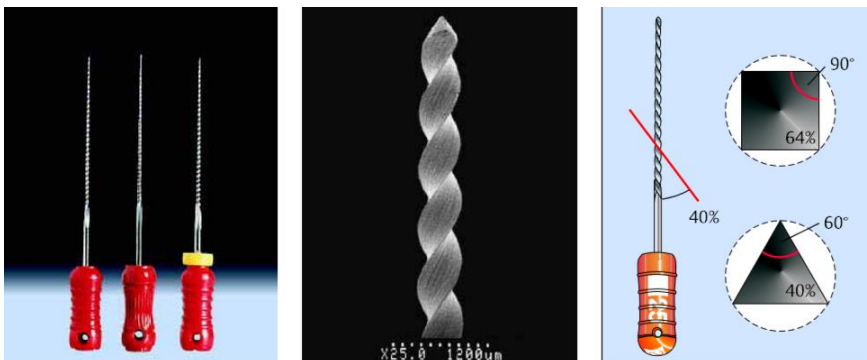


Abbildung 3 Aufbau K-Feile, [8]

Hedstroemfeilen

Charakteristisch für diesen Instrumentengrundtyp ist der gefräste Rundstahl, mit unterschiedlichen Querschnittsformen (zum Beispiel tränenförmig oder u-förmig). Durch den geringen Kerndurchmesser sind die Instrumente frakturanfälliger, als die zuvor genannten. Deshalb sollte man sie nicht für die initiale Erschließung des Kanalsystems nutzen [7].

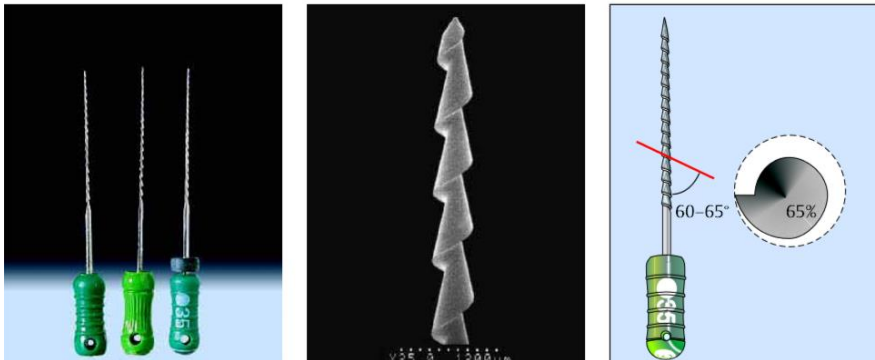


Abbildung 4 Aufbau Hedstroemfeile, [8]

Weiterentwicklungen

Um die beschriebenen Vor- und Nachteile der einzelnen Grundtypen zu nutzen bzw. auszugleichen, wurden neue Instrumente entwickelt. Sie stellen Mischtypen dar und zeichnen sich durch verbesserte Anwendungsmöglichkeiten aus. Querschnittsveränderungen und der Einsatz eines speziellen Stahls (Chrom-Nickel-Stahl) führten zu höherer Flexibilität und gleichzeitig größerem Spanraum, um den Materialabtrag zu erhöhen [8].

1.3.3. Manuelle Aufbereitungstechniken

Die Aufbereitungstechniken lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen, welche sich insbesondere in der Art der Aufbereitungsrichtung unterscheiden. Grundsätze der Aufbereitung, wie das regelmäßige Spülen mit Natriumhypochlorit und das Rekapitulieren, um Verbolzungen zu vermeiden, gelten für alle Methoden dieser Gruppen [9].

1.3.3.1. Apikal-koronale Methoden

Bei diesem Vorgehen wird zunächst die Arbeitslänge bestimmt, um dann mit zunehmender ISO-Größe den Kanal in koronaler Richtung konisch aufzubereiten.

Konventionelle Technik

Hier werden alle Instrumente auf Arbeitslänge eingebracht. Damit ist die Konizität des Kanals nicht besonders ausgeprägt. Vorteil dieser Technik ist die runde Aufbereitung des Wurzelkanals, welche damit die Wurzelfüllung mittels genormten Guttaperchastifts ermöglicht. Außerdem kann bei dieser Methode eine leichte Zeitersparnis gegenüber anderer Techniken vermerkt werden. Als Nachteil zeigt sich die eingeschränkte Indikation dieser Technik. Durch die schmale Präparation des Kanals, kann bei ovalen oder hantelförmigen Kanalquerschnitten nicht von einer vollständigen Präparation der Kanalwände ausgegangen werden. Zudem besteht bei gekrümmten Kanälen die Gefahr der Ausbildung eines „Elbow-Zip“-Effekts (Abbildung 5). Hier kommt es durch die Einbringung von relativ starren und nicht vorgebogenen Feilen zur Stufenbildung und damit Richtungsveränderung im Kanalsystem [9].

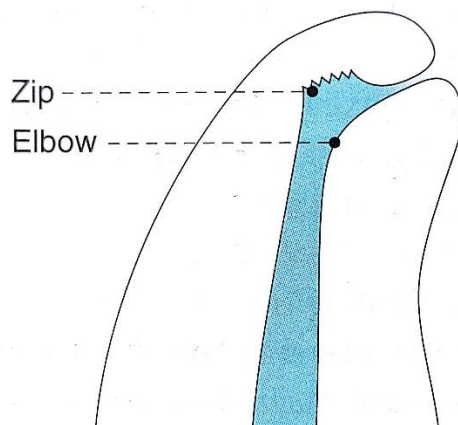


Abbildung 5 Elbow-Zip-Effekt, [9]

Step-Back-Technik

Bei dieser Aufbereitungsform wird zunächst das apikale Drittel mit sukzessiv zunehmenden Instrumentendurchmessern präpariert. Man bereitet 3 – 5 Instrumentengrößen nach erster klemmender Feile auf. Danach werden die Aufbereitungslängen mit zunehmender ISO-Größe um 0,5 mm – 1 mm verkürzt. Der Konus ist hier deutlicher als bei der Aufbereitung mit der vorgenannten Methode. Dadurch verringert sich die Gefahr der Stufenbildung. Da die unflexibleren, durchmesserstärkeren Feilen nicht auf

Arbeitslänge eingeführt werden, kann im Bereich von Krümmungen der einseitige Abtrag des Wurzelentins vermieden werden [9].

Konische Wurzelkanalaufbereitung

Hier gleicht das initiale Vorgehen dem der Step-Back-Technik. Das heißt, dass zunächst der apikale Bereich präpariert und sukzessiv die Arbeitslänge mit zunehmender ISO-Größe verringert wird. Der Fokus liegt auf einer stark ausgeprägten konischen Form des Wurzelkanals. Im koronalen Wurzelkanaldrittel wird dies durch die Anwendung von Gates-Glidden-Bohrern erreicht [9].

1.3.3.2. Koronal-apikale Methoden

Grundlage dieser Aufbereitungsmethoden ist die initiale Erweiterung des koronalen Wurzelkanaldrittels. Erst anschließend erfolgt die Bestimmung der Arbeitslänge und Präparation des Kanalsystems in apikaler Richtung.

Step-Down-Technik

Hier wird zuerst der Kanal mit Handinstrumenten bis zum mittleren Wurzel Drittel sondiert und erweitert, um anschließend koronal mittels Gates-Glidden-Bohrern weiter aufbereitet zu werden. Danach erfolgt die Bestimmung der Arbeitslänge und analog der Step-Back-Technik angewandte Präparationsmethode der Apikalregion. Das Interesse liegt hierbei darin, so wenig infiziertes und nekrotisches Gewebe wie möglich in Richtung des Foramen physiologicums zu verschleppen. Durch die anfängliche Erweiterung des Kanals bis zur Wurzelkrümmung, soll das Risiko der Begradigung minimiert werden [7]. Auch die Penetration der Spülflüssigkeit in das gesamte Kanalsystem wird verbessert und somit die Gefahr der Verbolzung des Wurzelkanals verringert. Nachteilig wird in der Literatur, besonders bei ungeübten Zahnärzten, die Bildung von Begradigungen und Perforationen beschrieben [9].

Crown-down-pressureless-Technik

Anfangs wird der Kanal mit ISO-reduzierten Feilen bis ins apikale Wurzel Drittel instrumentiert. Anschließend nutzt man eine Feile der ISO-Größe #35 und führt diese möglichst drucklos circa 16 mm in das Kanalsystem ein. Am erreichten Endpunkt sollten mit der Feile maximal zwei Rotationsbewegungen durchgeführt werden. Im

Anschluss werden kleinere Feilen für die Erschließung der Apikalregion genutzt, bis die Arbeitslänge erreicht wird. Ist dieser Bereich gängig, kann der Kanal mit größeren Feilen (ab ISO #40) von koronal nach apikal erweitert werden, bis auch diese die Arbeitslänge erreicht haben [7].

Double-Flare-Technik

Man beginnt hier zunächst mit der Erweiterung apikalwärts mit durchmesserstärkeren Feilen, welche sukzessive mit zunehmender Eindringtiefe in ihrer ISO-Größe reduziert werden. Kann ein dünnes Instrument auf Arbeitslänge eingebracht werden, so wird mit der Präparation des unteren Wurzeldrittels begonnen. Um die Konizität der koronalen Abschnitte zu steigern, wird nach apikaler Aufbereitung analog zur Step-Back-Technik weiterverfahren. Auch hier besteht die Möglichkeit der Anwendung von Gates-Glidden-Bohrern für die Präparation [7].

Balanced-Force-Technik nach Roane (1985)

Das Besondere an diesem Verfahren ist die Nutzung von Spezialfeilen mit nichtschneidender Spitze. Durch leichte Rotationsbewegungen in alternierende Richtungen wird die Feile drucklos auf Arbeitslänge gebracht. Im Apexbereich erfolgen weitere Rotationsbewegungen mit leichtem Druck, um schließlich die Feile wieder koronalwärts aus dem Kanal zu ziehen. Durch die ausgewogenen Kräfte („balanciert“) können der Literatur zufolge Präparationsfehler wie zum Beispiel der Stufenbildung vermieden werden [10]. Die Balanced-Force-Technik gilt als Vorreiter der reziproken Feilensysteme mit dem Bewegungsmuster der clockwise (cw) und counterclockwise (ccw) Rotationen [11].

1.4. Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung

1.4.1. Maschinelle Antriebsmotoren

Im Gegensatz zur manuellen Aufbereitungstechnik benötigen die maschinellen Aufbereitungssysteme Motoren, die diese Technik erst ermöglichen. So setzt sich ein solches Konstrukt aus Antriebsmotor und einem dazugehörigen Instrument zusammen.

Die Anfänge der maschinellen Antriebssysteme gehen auf das Jahr 1899 zurück. Hier hatte Rollins erstmalig Wurzelkanalinstrumente aus Uhrfedern oder Klaviersaiten hergestellt, mit einem Motor verbunden und zur Reinigung der Wurzelkanäle genutzt. Um Instrumentenfrakturen zu vermeiden wurden die Umdrehungszahlen des Motors auf $100\text{U}\cdot\text{min}^{-1}$ begrenzt. Das Winkelstück führte eine Vollrotation von 360° durch. Im nachfolgenden Jahrhundert wurde diese Technologie weiterentwickelt und es kamen Winkelstücke wie Racer, Giromatic, das Canal-Finder-System, Endolift oder das Endoplaner-System auf den Markt [7]. Die anfänglich starren Bewegungsabläufe führten zu einer hohen Zahl an Instrumentenfrakturen. Ziel war es durch Kombinationen von partieller Rotation und Hubbewegungen das Risiko der Frakturen zu senken und gleichzeitig eine bessere Reinigungswirkung zu erzielen. In der weiteren Entwicklung konnten die Motoren bei erhöhten Widerständen in den Wurzelkanälen ihre Drehzahl automatisch reduzieren, um auch hier die Anzahl der Brüche rückläufig zu gestalten. Das erste System mit integrierter Drehmomentbegrenzung war ENDOflash [7]. All diese Systeme spielen in der heutigen Endodontie kaum noch eine Rolle, da die Motoren alle in Kombination mit Stahlinstrumenten genutzt wurden. Als weitere Technik zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung wurde 1957 die Präparation mittels Ultraschall vorgestellt [7]. Hier stellte sich heraus, dass die Inzidenz der Zip-Bildung und die Verringerung der Arbeitslänge im Vergleich zu den anderen Systemen höher lag [12]. Außerdem ist das Risiko der Instrumentenfrakturen bei diesem System hoch [13]. Die Einführung der Nickel-Titan-Legierung in die Endodontie durch Walia et al. 1988 brachte einen Umschwung in die Entwicklung [13]. Durch die Flexibilität der Instrumente und Weiterentwicklung der vollrotierenden maschinellen Aufbereitungssysteme kam es zu einer Verbesserung in der maschinellen Aufbereitung von Wurzelkanalsystemen. Allerdings ist trotz Nutzung von Nickel-Titan-Instrumenten das Problem der Instrumentenfrakturen weiterhin präsent [14].

1.4.2. Nickel-Titan-Wurzelkanalinstrumente

Nickel-Titan-Instrumente differenzieren sich nicht nur durch ihre Metalleigenschaften von den Handinstrumenten, die in der Regel aus Edelstahl gefertigt sind, sondern auch durch ihr Design. Anfang der 60er Jahre entwickelte W.F. Buehler eine Nickel-Titan-Legierung im Naval Ordnance Laboratory in Silver Springs, Maryland, USA. Diese sollte für die Raumfahrttechnik genutzt werden. Die Legierung wurde mit dem Akronym „Nitinol“ angegeben. Der Begriff setzt sich aus den Materialien der Legierung Nickel- Ni, Titan -ti und dem Ort der Entwicklung Naval Ordnance Laboratory -nol zusammen [15]. Eine besondere Eigenschaft, die diese Legierung auszeichnet, ist der sogenannte „Memory effect“ oder auch Formgedächtnis genannt. Dies bedeutet, dass sich das Metall nach plastischer Deformierung, und damit Kristallgitterumwandlung, in einem niedrigen Temperaturbereich, nach Erwärmung wieder in die Ursprungsform transformieren kann. Außerdem besitzen Nickel-Titan-Legierungen die Fähigkeit sich in einem bestimmten Temperatur- und Spannungsbereich elastisch zu verformen, ohne dass dabei eine bleibende Deformation auftritt. Demzufolge ist es schwieriger das Metallgefüge plastisch zu deformieren, was die Eigenschaft der Superelastizität/Pseudoelastisches Verhalten dieser Legierung unterstreicht [16].

Legierungszusammensetzung und Eigenschaften

In der Regel setzt sich die Legierung zu 56 % aus Nickel und 44 % aus Titan zusammen. In einigen Dentallegierungen wird ein geringer Prozentsatz von 2 % von Nickel durch Kobalt ersetzt. Dadurch ergibt sich ein äquiatomares Verhältnis in der Gitterstruktur. Die Legierung kann in zwei verschiedenen kristallografischen Formen existieren: Austenit und Martensit. Diese Veränderung der atomaren Verbindungsstruktur resultiert aus einer Veränderung des Drucks und/oder der Temperatur [15]. Bei Raumtemperatur liegt die Kristallstruktur Austenit vor, welche sich durch Spannungs- oder Temperaturänderung in die martensitische Anordnung umwandeln kann. Dabei kann eine reversible Verformung von bis zu 7 % erreicht werden. Bei stärkerer Deformation kommt es zu irreversiblen Formveränderungen, welche mit einer Schwächung des Instrumentes einhergeht und damit zu erhöhter Frakturgefahr führt [17]. Die Austenitphase ist durch ein kubisch-flächenzentriertes, die Martensitphase durch ein kubisch-raumzentriertes Gitter gekennzeichnet [18].

Das Volumen während der Phasenumwandlung ist nahezu gleichbleibend, da die makroskopischen Abmessungen des Martensits und des Austenits sehr ähnlich sind. Verglichen mit den Eigenschaften des herkömmlichen Edelstahl weist das Nitinol einen geringeren Elastizitätsmodul auf, welches Rückschluss auf den breiteren Indikationsbereich hinsichtlich der Nutzung in gekrümmten Kanälen ziehen lässt [16]. Liegt die reversible Verformung bei Nickel-Titan-Legierungen bei bis zu 7 %, kann bei den herkömmlichen Handfeilen nur eine elastische Deformation von unter 1 % festgestellt werden [15]. Auch in der Härte sind Unterschiede festzustellen. Edelstahl weist eine Vickers-Härte von 520 – 540 HV, Nickel-Titan nur 300 – 360 HV. Dadurch ist die Standzeit der Nitinolfeilen verkürzt. Dies wird durch neue Beschichtungsmethoden mittels Titan-Nitrid versucht zu optimieren [19]. Menschliches Wurzeldentin wird in der Literatur mit einer Vickers-Härte von 28 – 35 HV angegeben [18].

Design der Nickel-Titan-Feilen

Um die Qualität und Eigenschaften der Instrumente zu optimieren, wurde das Feilendesign in den letzten Jahren stets weiterentwickelt. Merkmale wie die Gestaltung der Instrumentenspitze, Schneidekantenwinkel, Abstand und Anzahl der Schneiden, Konizität und Querschnitt haben einen Einfluss auf die Schneideeffizienz, die Flexibilität und den Torsionswiderstand der Feilen [20].

Schneidengeometrie

Die ersten industriell genutzten Systeme wie LightSpeed, PowerR, ProFile oder Mity-Roto waren gekennzeichnet durch ihre abgeflachten Schneidekanten, auch „Radial lands“ genannt. Man ging davon aus, dass durch diese Schneidengestaltung die Gefahr der Kanalverlegung und damit auch das Risiko der Fraktur reduziert werden. Neuere Systeme vertreten die schneidenden Außenflächen, um die Schneidleistung zu erhöhen und parallel den Reibungswiderstand und die Torsionsbelastung zu reduzieren [21, 22]. Bezüglich der Wurzelkanalsauberkeit konnten die aktiven Schneiden bessere Ergebnisse erlangen. Es wird angenommen, dass abgeflachte Schneiden dazu neigen, mit den abgetragenen Dentinspänen die Innenwand des Wurzelkanals zu polieren bzw. die Reste in die umliegenden Dentintubuli zu schieben [23].

Instrumentenspitze

Die Spitzen der Instrumente sind abgerundet (non-cutting tip) und gewährleisten damit die Zentrierung im Wurzelkanal [19]. Dadurch wird das Risiko von Präparationsfehlern wie Begradigungen oder Perforationen minimiert [21]. Die aktiven Schneiden der Instrumente reichen jedoch weit an das apikale Ende der Feile [19].

Taper

Je konischer und weiter ein Kanal aufbereitet wurde, desto besser ist die Penetration der Spüllösung in das gesamte Kanalsystem. Konventionelle Handinstrumente weisen stets einen Taper von 2 % auf. Durch die manuellen Präparationstechniken sind jedoch Konizitäten von bis zu 10 % innerhalb eines Wurzelkanals möglich [24]. Die kommerziell verwendeten vollrotierenden Nickel-Titan-Feilen sind in Konizitäten zwischen 2 % und 19 % verfügbar. Der Großteil der Systeme umfasst mehrere Feilensequenzen, wobei die einzelnen Instrumente unterschiedliche Taper aufweisen. Neuere Systeme wie zum Beispiel ProTaper® zeigen progressive Konizitäten innerhalb einer Feile [24]. Die Flexibilität der Feilen nimmt mit zunehmendem Taper stetig ab und muss deshalb über die Variation des Querschnitts reguliert werden. So sollte bei hoher Konizität ein konkaver Querschnitt vorherrschen. Dementsprechend ist bei niedriger Konizität ein konvexer Querschnitt geeignet, um die Beweglichkeit zu gewährleisten und gleichzeitig die Frakturresistenz zu erhöhen [25].

Herstellung der Feilen

Anders als die Handfeilen wie Reamer oder K-Feilen, welche durch Verdrillung eines Rohlings ihre Form erhalten, müssen Nickel-Titan-Feilen aus Rohlingen gefräst werden. Metalle auf Nickelbasis gelten in der Zerspantechnik als schwer zu verarbeitendes Material. Demzufolge gab es insbesondere in den Anfängen der Herstellung Defizite in der Qualitätssicherung der Oberflächengüte. Probleme wie Metallausbrüche und Unregelmäßigkeiten auf den Schneidekanten führten zu geringeren Standzeiten der Instrumente [18].

Erhöhung der Schneidleistung durch Oberflächenbearbeitung

Bereits in den Anfangszügen der Nickel-Titan-Feilen Entwicklung Ende der 80er Jahre wurde eine Erhöhung der Oberflächengüte durch elektrolytische Polierverfahren in Betracht gezogen [26]. Weitere Entwicklungen für die Steigerung der Oberflächengüte und -qualität bestanden in der Behandlung der Feilen im Vakuum mit Stickstoff oder Bor. Respektive entsteht an der Instrumentenoberfläche eine Titannitridbeschichtung oder Titanboridbeschichtung. Hierdurch soll die Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit erhöht werden. Eine Studie ergab eine Verdopplung der Oberflächenhärte bei gleichbleibender Flexibilität der Legierung [27]. Weitere Studien konnten die Steigerung der Oberflächengüte durch thermische Nitrierprozesse und Stickstoffionen-Implantationen nachweisen [28]. Schäfer entwickelte eine weitere Methodik zur Senkung der Korrosionsanfälligkeit und Verbesserung der Schneidleistung. Die PVD-Beschichtung (Physical Vapour Deposition) basiert auf der Grundlage unter Temperaturzufuhr und Vakuumbedingungen der Feile eine 0,1 µm dicke Haftvermittlerschicht aus Titan aufzulagern. Auf diesen Layer wird eine weitere 1 µm Titannitridschicht aufgetragen. Durch die Erhöhung der Oberflächenhärte auf bis zu einer Vickers-Härte von 2200 HV kommt es zu einem deutlichen Abriebschutz der Schneidekanten [29].

M-Wire-Technologie

Die M-Wire-Technologie (Dentsply Tulsa-Dental Specialties, Tulsa, OK) wurde 2007 entwickelt und wird aktuell für die Herstellung der GT® Series X-Instrumente genutzt [30]. Auch das untersuchte Einfeilensystem WaveOne™ arbeitet mit der M-Wire-Technologie [31]. Bei dem M-Wire Nickel-Titan-Instrument wurde die Zusammensetzung des ursprünglichen Nitinols verändert. Der Nickelanteil wurde von 56 % auf 50,8 % gesenkt. Außerdem veränderte man die Feinstruktur der Kristallphase und behandelte die Legierung mit einer speziellen thermischen Prozedur. Dabei wird die Legierung auf 350 – 500 °C erhitzt. Folglich besteht das M-Wire Nickel-Titan vorwiegend aus einer Austenitphase mit einigen Martensitanteilen und der Übergangsphase (R-Phase). Daraus ergibt sich eine Steigerung der Elastizität mit paralleler Senkung der Frakturanfälligkeit [4]. Die Resistenz gegenüber Ermüdungsbrüchen ist im Vergleich zu den konventionell hergestellten Nickel-Titan-Instrumenten erhöht [32].

1.4.3. Mehrfeilensystem ProTaper® Universal

1.4.3.1. Aufbau des Systems

Das ProTaper® Universal (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) System wurde 2006 dem Markt erstmals präsentiert. Es besteht aus einem Sortiment von bis zu acht Feilen SX, S1, S2, F1 – F5 und gehört damit zu den Mehrfeilensystemen. Die Feile SX ist fakultativ anzuwenden und dient der koronalen Erweiterung. Die Feilenfolge S1 – F1 ist laut Hersteller in der Regelzahl der klinischen Fälle ausreichend. Für die weitere Bearbeitung der Wurzelkanäle kann die Reihenfolge auf F2 – F5 erweitert werden, um besonders bei weitleumigen Kanaldurchmessern eine suffiziente Aufbereitung zu gewährleisten. Die Feilen besitzen einen dreieckigen Querschnitt mit konvexen Außenflächen, um die Schneideeffizienz zu erhöhen. Weiterhin soll hierdurch die Kontaktfläche zwischen Dentin und Feile verringert werden und damit die Gefahr des Einschraubens sinken. Bei den Feilen F3 – F5 wurden die Führungsflächen modifiziert, sodass die Flächen des dreieckigen Querschnitts eine eher U-förmige Form annehmen. Damit soll die Flexibilität der großen ISO-Größen erhöht werden. Der Schneidekantenwinkel bei diesem System ist variabel. Die Führungsspitze ist nicht-schneidend. Die Konizitäten innerhalb des Arbeitsteils variieren. Im apikalen Bereich erreichen die Feilen F1 und F2 einen Taper von 7 % und 8 %. Kongruent zu den Größen der Feilen bietet der Hersteller Handinstrumente, Papierspitzen in den ISO-Größen der Feilen F1 – F5, sowie Obturatoren und Guttaperchastifte an. Die Feilen sind in den Arbeitslängen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich [33].



Abbildung 6 Bild eine ProTaper®-Feile

1.4.3.2. Arbeitsweise

Zunächst sollten, analog zu anderen Systemen, ein gerader Kanalzugang und ein Gleitpfad mit einem Handinstrument der ISO-Größe #15 bis auf Arbeitslänge geschaffen werden. Die Shapingfeilen SX – S2 werden nach Herstellerangaben mit bürstenden Bewegungen in den Kanal eingeführt. Die SX-Feile ist nicht immer notwendig. Ist der Fall gegeben, sollte diese mit bürstenden Bewegungen verwendet werden, um den

Abstand vom Furkationsbereich zu erhöhen und eine Erweiterung des koronalen Kanalabschnitts zu gewährleisten. Die Finishingfeilen werden mit progressiven Bewegungen in das Kanallumen eingeführt, unterstützt durch Zwischenspülungen, bis die vorgegebene Arbeitslänge erreicht ist. Der Hersteller gibt vor die Feilen mit leicht nach apikal gerichtetem Druck bei konstanter Rotation in das Kanalsystem einzuführen. Die Drehzahl liegt bei 150 – 350 U/min [33].

1.4.4. Einfeilensystem WaveOne™

1.4.4.1. Aufbau des Systems

WaveOne™ (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) gehört zu den reziproken Einfeilensystemen. Das Feilensortiment besteht aus drei Feilen und wird je nach Kanaldurchmesser ausgewählt. Die Feilen sind Einmalartikel und nicht autoklavierbar. Der Hersteller bietet die Arbeitslängen 21 mm, 25 mm und 31 mm an. Die Spitze der Feile ist nichtschneidend. Es sind die ISO-Größen #21, #25 und #40 erhältlich mit den jeweiligen Tapern 6 %, 8 % und 8 % [34]. Die Konizitäten variieren innerhalb des Arbeitsteils. Die ISO-Größe #25 besitzt von der Spitze zum Schaft eine abnehmende Konizität (0.8, 0.65, 0.6, 0.55). Auch beim Querschnittsdesign gibt es Modifikationen. Während sich am Apex ein modifizierter, triangulärer und konvexer Querschnitt mit Radial Lands darstellt, findet sich in der Mittel- und Schaftregion des Arbeitsteils ein neutraler triangulärer und konvexer Querschnitt, ähnlich den ProTaper®-Feilen. Die Instrumente bestehen aus einer Nickel-Titan-Legierung und sind mit der M-Wire Technologie behandelt worden [31].



Abbildung 7 Bild einer WaveOne™-Feile

1.4.4.2. Arbeitsweise

Analog zu der beschriebenen Arbeitsweise von ProTaper® wird ein Gleitpfad gebildet. Laut Herstellerangaben ist die ISO-Größe #10 hierfür in den meisten Fällen ausreichend. Die Feilen werden mit pickenden, apikalwärts gerichteten Bewegungen in das Kanallumen eingeführt. Sobald eine Klemmpassung auftritt wird das Instrument

dem Kanal entnommen und eine Zwischenspülung durchgeführt [34]. Das WaveOne™-System gehört zu den reziproken Systemen. Die Rotation dieser Feilen wird beschrieben in counterclockwise (schneidende Richtung, entgegen dem Uhrzeigersinn) und clockwise (entlastend, im Uhrzeigersinn) [31]. Der Drehwinkel in counterclockwise beträgt 170°, wohingegen die clockwise Rotation 50° beträgt [35]. Da die Rotation entgegen dem Uhrzeigersinn ausgeprägter ist, wird ein stetiges apikales Vorschreiten der Feile ermöglicht [31]. Durch die reziproke Bewegung werden die Feilen entlastet und damit das Risiko für Ermüdungsbrüche durch Spannung und Druck reduziert [36]. Die Umdrehungszahl liegt bei 350 U/min [35]. Für die Präparation des Wurzelkanals ist ein auf die WaveOne™-Feilen angepasster Motor zu verwenden. Der Hersteller bietet einen dem Produkt entsprechenden Motor an.

1.4.5. Wurzelfülltechniken

Die Wurzelfüllung ist in der endodontischen Behandlung ein kritischer und wichtiger Punkt. Das Ziel der Wurzelfüllung sollte eine dichte, wandständige Füllung sein, welche das gesamte dreidimensionale Volumen des aufbereiteten Kanals ausfüllt. Auch anliegende Dentinkanälchen und akzessorische Seitenkanäle sollten möglichst verfüllt werden [2]. In der Endodontie gibt es verschiedene Methoden, die bei der Füllung der Wurzelkanäle angewandt werden können. Neben der klassischen lateralen Kondensation mit Guttaperchastiften, gibt es unter anderem die Zentralstifttechnik mit kalten Guttaperchastiften, passend zur Konizität der Aufbereitungsfeilen. Dieses Verfahren wird eher bei der maschinellen Aufbereitung genutzt. Auch Silberstifte können für die Wurzelfüllungen genutzt werden oder thermoplastische Materialien die mittels Füllspitze von apikal nach koronal den Wurzelkanal füllen [37]. In der vorliegenden Studie wurden Thermafilobturatoren genutzt. Die angewandten Obturatoren mit Kunststoffträgerstiften umhüllt von α -Phase-Guttapercha werden seit 1984 produziert (Dentsply/Maillefer, Konstanz) [38]. Die Obturatoren können vor Wurzelfüllung nicht auf Passung eingesetzt werden, da die Stifte vor Erwärmung leicht überdimensioniert sind. Die Wahl der richtigen Größe erfolgt mittels Verifier, welche passend zu dem System mitgeliefert werden. Die Feile sollte drucklos und mit geringer Klemmpassung in den Kanal auf Arbeitslänge eingeführt werden können. Thermafil wird in der Literatur als benutzerfreundlich und zeitsparend beschrieben. Auch die Be-

nutzung in gekrümmten und engen Kanälen wird hervorgehoben [38, 39]. Laut Dummer et al. zeigt die Benutzung von Thermafil im Vergleich zur lateralen Kondensation weniger Mikroleakage in gekrümmten Kanälen [39]. Auch Gencoglu et al. bestätigen die Aussage, dass Thermafil mit signifikant weniger Mikroleakage in Zusammenhang steht [40]. Nachteile sind unter anderem die verlängerte und erschwerte Revisionsbehandlung von Thermafil gefüllten Wurzelkanälen im Vergleich zu anderen Techniken [41]. Auch wird die vermehrte apikale Extrusion von Wurzelfüllmaterial bei der Thermafiltechnik kritisiert [42-44].



Abbildung 8 Bild eines Thermafilobturators

1.5. Aktueller wissenschaftlicher Stand

In der aktuellen Literatur findet man zahlreiche vergleichende *in vitro* Untersuchungen zwischen ProTaper® Universal und WaveOne™. Dabei werden einige Aspekte widergespiegelt, bewertet und verglichen. *In vivo* Studien sind nachrangig. Verglichen wurde, ob die Erfahrung des Behandlers mit dem Erfolg der Anwendung von beiden Systemen korreliert. Dies konnte nicht bestätigt werden [45]. Allerdings wurde festgestellt, dass die Aufbereitungszeit mittels Einfeilensystem im Vergleich zur ProTaper®-Anwendung deutlich kürzer ist [45-48].

Microcracks

Durch die Anwendung der maschinellen Aufbereitungssysteme wird der Zeitaufwand minimiert. Ein Problem in der Behandlung mit maschinellen Aufbereitungssystemen stellt die Gefahr der Mikrorissbildung in den Dentinwänden oder sogar vertikaler Frakturen ganzer Zähne dar [49]. Die Einfeilensysteme werben damit, durch ihre spezielle Rotation (clockwise und counterclockwise) die Balanced-force-Technik nachzuahmen, wie sie bei Handinstrumenten angewendet wird, um schonend den Wurzelkanal aufzubereiten. Trotzdem wird angenommen, dass durch die Behandlung mit nur einer Feile die mechanische Belastung steigt und damit das Risiko der Mikrorissbildung, im Vergleich zu vollrotierenden Mehrfeilensystemen, erhöht ist [50]. Bürklein und

Schäfer untersuchten 100 frisch extrahierte Unterkieferfrontzähne nach Aufbereitung mit zwei vollrotierenden (ProTaper® und Mtwo) und zwei reziproken Systemen (Reciproc und WaveOne™). Die Zähne wurden in einem Abstand von 3,6 und 9 mm zum Apex horizontal geschnitten. Die Einfeilensysteme verursachten mehr Frakturlinien, besonders im apikalen Bereich konnten mehr Defekte erörtert werden. Es ist nicht nachgewiesen, wie viele der Mikroläsionen in eine Vertikalfaktur der Wurzel münden nach Abschluss der Behandlung [50]. Andere Studien behaupten, dass die ProTaper®-Instrumentierung mehr Microcracks in den Kanalwänden im Vergleich zu WaveOne™-behandelten Zähnen verursacht [51, 52]. Auch die aktuelle Meta-Analyse von Wei et al. (2017) unterstreicht die vermehrte Rissbildung im Dentin bei Nutzung des vollrotierenden ProTaper®-Systems im Vergleich zu WaveOne™ [53]. Es gibt jedoch auch Analysen die keine der beiden Aussagen stützen. Sie untermauern die Annahme, dass bei beiden Systemen Microcracks mit vernachlässigbaren Differenzen auftreten [54-56]. Die Ergebnisse der Studien gehen aus *in vitro* Untersuchungen hervor.

Extrusion von Debris

Während der Präparation von Wurzelkanälen besteht die Gefahr der Reizung des apikalen Gewebes durch Austritt von Spülflüssigkeiten oder Debris über den Apex hinaus. Folgen können postendodontische Beschwerden und inflammatorische Reaktionen des periapikalen Gewebes sein [57]. Cicek et al. untersuchten *in vitro* die extrudierte Menge an Debris nach Wurzelkanalaufbereitung mit unterschiedlichen Systemen [58]. Voraussetzung war die Messung der Wurzelkanallänge mit dem Root ZX. Die Ergebnisse ergaben keine signifikanten Differenzen. Auch die *in vitro* Untersuchung von Ehsani et al. bestätigt die erhöhte Menge an extrudierten Geweberesten beim ProTaper®-System [48]. Werden die Kanäle mit großen Tapern aufbereitet, ist der apikale Austritt von Debris bei dem Mehrfeilensystem größer verglichen mit WaveOne™ [59]. Bürklein und Schäfer ermittelten in ihrer *in vitro* Studie entgegengesetzte Werte [60]. Die Ergebnisse der reziproken Systeme fielen schlechter aus [60-63]. Die Resultate dieser Studien können nicht direkt auf den klinischen Alltag übertragen werden, da unter *in vivo* Bedingungen der periapikale Gewebedruck die Extrusion der Gewebereste vermutlich reduziert [57].

Postendodontische Dolenz

Studien ergaben, dass der postendodontische Schmerz bei WaveOne™-behandelten Zähnen stärker und langanhaltender ist, als bei ProTaper®-therapierten Zähnen [64, 65]. 2016 wurde eine weitere klinische Studie veröffentlicht, die sich mit der Behandlung von Mehrfeilensystemen im Vergleich zu Einfeilensystemen im klinischen Alltag befasst. Zehn Behandler arbeiteten jeweils fünf Monate mit einem Mehrfeilensystem und in den darauffolgenden Monaten mit einem Einfeilensystem *in vivo*. Die Patienten gaben ihre Schmerzreduktion und Lebensqualität bezüglich der oralen Gesundheit vor und nach Behandlung an. Dabei konnten keine signifikanten Differenzen zwischen den gesundheitlichen Parametern evaluiert werden [47].

Reinigungseffizienz

Ziel der Wurzelkanalbehandlung ist die vollständige Ausräumung und Desinfektion des Kanalsystems mit Eliminierung des verbliebenen Pulpagewebes, Debris sowie Mikroorganismen [2]. In Hinblick auf die Entwicklung neuer Systeme sollten diese Ziele, neben der Verkürzung der Arbeitszeit, an oberster Stelle stehen. Martinho et al. stellten in deren *in vivo* Untersuchung fest, dass die Reinigungseffektivität von reziproken im Vergleich zu vollrotierenden Systemen keine signifikanten Differenzen ergab [66]. In der Gesamtheit konnten jedoch nicht alle Endotoxine und Bakterien beseitigt werden [31, 66-68].

Beibehaltung Kanalverlauf

Jain et al. verglichen *in vitro* ProTaper® und WaveOne™ unter den Parametern Abtransport von Dentinspänen, Zentrierfähigkeit der Feilen im Kanal und verbleibende Dentinstärke [69]. Die Zentrierfähigkeit und die Beibehaltung des Kanalverlaufs fielen bei dem Einfeilensystem besser aus. Die Differenzen waren jedoch nur im mittleren Kanalabschnitt signifikant ($p < 0,05$) unterschiedlich. Bei beiden Systemen ist insgesamt von einer suffizienten Beibehaltung des Kanalverlaufs auszugehen [46]. Auch Goldberg et al. beschrieb in deren *in vitro* Analyse die Zentrierfähigkeit der WaveOne™-Feilen als exzellent [70].

Ermüdungsbrüche

Mit der Einführung der maschinellen Aufbereitungssysteme begann auch parallel die Problematik der vermehrten Feilenbrüche. Dabei ist der zyklische Ermüdungsbruch von dem Torsionsbruch zu unterscheiden. Letztere entstehen, wenn im apikalen Drittel das Instrument eine Klemmpassung erfährt und der koronale Abschnitt durch den Antrieb des Winkelstücks weiter rotiert. Die beiden untersuchten Systeme arbeiten mit voreingestellten Drehmomentbegrenzungen, die das Risiko reduzieren. Ermüdungsbrüche sind die Folge einer Überbelastung des Materials besonders in gekrümmten Kanälen. Die Legierung wird durch Biegung gestaucht und gestreckt und kehrt nach Entnahme aus dem Kanal wieder in seine Ursprungsform zurück. Wird dieser Vorgang zu häufig wiederholt, kommt es zu einem Ermüdungsbruch. Auch dieses Risiko sollte minimiert werden, indem die Feilen als Einmalprodukte verwendet werden [71]. Durch die Erfindung der M-Wire Technologie konnte, im Vergleich zu den konventionell hergestellten Nickel-Titan-Feilen, der Torsionswiderstand erhöht und die zyklische Ermüdung der Instrumente verringert werden [72]. Es gibt nur wenige Studien, die speziell ProTaper®-Instrumente mit WaveOne™-Instrumenten unter diesen Aspekten vergleichend untersucht haben. Ermittelt werden konnte, dass beide Konstanten bei dem reziproken im Vergleich zu dem vollrotierenden System überlegen sind [35, 73, 74].

Sonstige Klinische Studien

Eine klinische Studie wurde mit Studenten durchgeführt, die erstmalig maschinelle Aufbereitungssysteme benutzten. Verglichen wurden ProTaper® Universal und WaveOne™. Es wurde ein Fragebogen erstellt und Kriterien wie zum Beispiel Handhabung, Flexibilität oder Sicherheitsgefühl abgefragt. Das Resultat ergab eine signifikante Bevorzugung des reziproken Aufbereitungssystems WaveOne™ [75]. An der Universität in Köln wurde ebenfalls eine klinische Untersuchung mit Studenten durchgeführt. Diese sollten nach kurzer Erläuterung des Verfahrens das WaveOne™-System anwenden. Baumann unterstreicht das leichte Handling der Instrumente auch bei Anfängern. Besonders die verminderten Aufbereitungsfehler und die verkürzte Arbeitszeit im Vergleich zur Handinstrumentation wurden hervorgehoben [11]. In der *in vivo* Studie von Bartols et al. wurde eine durchschnittliche Aufbereitungszeit für Molaren von 238,9 sec (ProTaper®) versus 147,1 sec (WaveOne™) beschrieben [47].

Troiano et al. untersuchte die Aufbereitungszeit *in vitro*. Dabei wurde nochmals unterteilt in Zahnarzt und Zahnmedizinstudent. Die Aufbereitungszeiten wurden bei Zahnärzten um 80 % verkürzt (228 sec versus 44,8 sec). Bei den Studenten wurde nur ein Viertel der Aufbereitungszeit von ProTaper® benötigt (405 sec versus 110 sec) [45].

1.6. Ziel der Untersuchung

Die vorgestellten Studien sind fast ausschließlich experimentelle *in vitro* Untersuchungen. Bislang wurde über die klinische Alltagssituation in Kombination mit realen Patienten wenig bis keine Studien erstellt. Klinische endodontische Untersuchungen werden fast ausschließlich von Spezialisten und in Universitätszentren durchgeführt [76].

Das Ziel der retrospektiven Untersuchung war es, unter alltäglichen Praxisbedingungen die Ergebnisse der Behandlung mittels ProTaper® und WaveOne™ hinsichtlich der Qualität zu vergleichen. Die Praxis ist nicht spezialisiert auf Endodontie. Außerdem sollte die Fragestellung beleuchtet werden, ob zwischen den Feilensystemen differente Erfolgsquoten zu erwarten sind. Dabei ergeben sich, bezogen auf den aktuellen wissenschaftlichen Stand folgende Arbeitshypothesen:

1. Die Erfolgswahrscheinlichkeit der beiden Systeme weicht nicht signifikant voneinander ab.
2. Die Qualität der beiden Systeme weicht nicht signifikant voneinander ab.

2. Material und Methode

2.1. Studiendesign

Diese Arbeit ist eine retrospektive Studie. Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich vom 15.01.2007 bis 22.09.2016, wobei von Januar 2007 bis zum 30.05.2011 das Mehrfeilensystem ProTaper® Universal (Dentsply) verwendet wurde, alle weiteren Daten beziehen sich auf das Einfeilensystem WaveOne™ (Dentsply). Die Ergebnisse der Behandlungen stammen aus einer Zahnarztpraxis mit bis zu vier Behandlern. Insgesamt konnten 292 Patientenfälle zusammengefasst werden. Die Behandlung der Zähne wurde *in vivo* durchgeführt. Das Datenmaterial wurde pseudonymisiert und aus dem digitalen Praxisarchiv exportiert. Der Antrag zur Durchführung der Untersuchung wurde durch die Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin bewilligt. Die Antragsnummer lautet: EA1/331/16.

2.2. Einschlusskriterien

In die Studie wurden männliche und weibliche Patienten ab dem 18. Lebensjahr eingeschlossen. Einbezogen wurden Ober- und Unterkiefermolaren von 6 – 8. Dabei spielte es keine Rolle, ob es sich um symptomatische oder klinisch symptomfreie Zähne handelt. Die Vorbehandlung und die Vitalität der Zähne spielten bei der Inklusion in den Datensatz keine Rolle. Beide Kategorien konnten für die Analyse genutzt werden. Auch Revisionen wurden in den Datensatz eingeschlossen.

2.3. Ausschlusskriterien

Patientenfälle mit unzureichender Dokumentation, hinsichtlich des Aufbereitungssystems, Stammdaten und Behandlungsprozedere wurden ausgeschlossen. Auch fehlende Nachuntersuchungsbilder waren ein Ausschlusskriterium. Bei ausschließlicher Verwendung von Übersichtsaufnahmen in Form von Orthopantomogrammen wurde der Patientenfall nicht eingeschlossen. Ein Patientensatz mit Einzelbildern unzureichender Qualität wurde exkludiert. Waren auf den Röntgenbildern die Apices nicht sichtbar, wurde dieser Fall nicht in die Datensammlung eingeschlossen.

Auch Patienten, die eine chirurgische Wurzelspitzenresektion erhielten, wurden ausgeschlossen.

2.4. Behandlungsprotokolle

2.4.1. ProTaper® Universal

Das System ist seit 2007 auf dem Markt erhältlich und inzwischen über ProTaper® Next zu ProTaper® Gold weiterentwickelt worden. Die eingeschlossenen Wurzelkanalbehandlungen wurden nach folgendem Protokoll durchgeführt.

Trockenlegung, Trepanation und Kanaldarstellung

Nach symptombezogener Untersuchung der betroffenen Zähne und gegebenenfalls erfolgter Lokalanästhesie wurde eine Kavität präpariert, um einen geradlinigen Zugang zu den Kanälen zu schaffen. Für die koronale Erweiterung der Kanäleingänge sind Gates-Glidden-Bohrer zur Anwendung gekommen. Bei großen Defekten musste prä-endodontisch eine Aufbaufüllung gelegt werden, um weitere Kontamination durch Speichel über den Sulkus und Approximalraum zu vermeiden. Von der konsequenten Nutzung eines Kofferdams kann nicht ausgegangen werden, es wurde jedoch auf aseptische Bedingungen geachtet.

Kanalsondierung und Längenbestimmung

Die Sondierung aller Kanäle erfolgte mittels Handfeilen (bis ISO #15) und Spülung mit Natriumhypochlorit, um darauf folgend die Arbeitslänge endometrisch bestimmen zu können. Zur endometrischen Bestimmung wurde das Gerät RayPex®4 von VDW genutzt. Bei nicht reproduzierbarem Ergebnis kamen Röntgenmessaufnahmen zur Anwendung. Je nach Situation wurde der Zahn in der gleichen oder in einer weiteren Sitzung aufbereitet und gefüllt. Temporär verschloss man den Zahn mit einer medikamentösen Einlage, wobei Calxyl® (Oco-Präparate®) oder Ledermix® (Riemser) Anwendung fand.

Wurzelkanalaufbereitung

Das weitere Vorgehen bestand aus der Aufbereitung des Kanalsystems mittels ProTaper®-Feilen. Hierbei handelt es sich um Einmalprodukte, um Feilenbrüche und Kreuzkontaminationen zu vermeiden. Es gibt ein Portfolio von acht Feilen, welches sich in Shaping- und Finishingfeilen unterteilen lässt. Die Finishingfeilen geben dem Kanal ihre finale Form und unterteilen sich in F1 bis F5, mit den ISO Größen #20, #25, #30, #40, #50. Bei den untersuchten Fällen kamen die Feilengrößen bis maximal ISO-Größe #30 zur Anwendung. Die Instrumente wurden als Einmalprodukt genutzt.

Desinfektion

Während der Aufbereitung war das Kanallumen mit Natriumhypochlorit gefüllt. Die Abschlussspülung erfolgte ebenfalls unter Verwendung von Natriumhypochlorit.

Wurzelfüllung

In Vorbereitung auf die Wurzelfüllung wurden die Kanäle getrocknet. Anschließend bestrich man die Kanalwände mit Sealer (AH-Plus®) unter Verwendung von Papier spitzen. Als Füllungsmaterial kamen formkongruente ProTaper®-Obturatoren der Firma Dentsply zum Einsatz. Die Überführung in den thermoplastischen Zustand erfolgte mittels ThermaPrep®Plus Ofen. Die Heizdauer beträgt – je nach Größe des Obturators – 20 bis 45 sec und wird automatisch reguliert. Der entsprechende Obturator konnte im Vorfeld mit Hilfe eines ISO-genormten Verifiers ausgewählt werden. Nach Insertion der Wurzelfüllung trennte man die Thermafilstifte mithilfe einer undiamantierten Kugel (Therma-Cut) ohne Wasserkühlung ab. Abschließend wurde die Kavität mit Cavidex gesäubert, um überschüssige Guttapercha zu entfernen. Für den Verschluss der Kavität kam ein dichtes Füllungsmaterial zum Einsatz.

2.4.2. WaveOne™

Das folgende Protokoll wird seit dem 31.05.2011 durchgeführt und findet auch heute noch Anwendung.

Trockenlegung, Trepanation Kanaldarstellung, Kanalsondierung und Längenbestimmung

Die Schrittfolge bis einschließlich der endometrischen bzw. röntgenologischen Bestimmung der Arbeitslänge ist deckungsgleich mit dem im Vortext beschriebenen Ablauf.

Wurzelkanalaufbereitung

Nach Vorbereitung des Zahnes begann man anschließend mit der Aufbereitung mittels WaveOne™-Feilen. Dieses System stellt eine Auswahl an drei Feilengrößen zur Verfügung, SMALL (021.06), PRIMARY (025.08) und LARGE (040.08), wobei laut Herstellerangaben die meisten Wurzelkanäle mit der PRIMARY-Feile aufbereitet werden können. In den untersuchten Fällen wurde überwiegend diese Feile genutzt. Vereinzelt kam die ISO-Größe #40 zum Einsatz. Die ISO Größe #21 war nicht im Sortiment der Praxis enthalten. Bei der Aufbereitung wurden die Feilen mit Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA)-Gel beschichtet und in einen mit Natriumhypochlorit gefluteten Kanal, unter pickenden Bewegungen passiv eingeführt. Bei auftretendem Widerstand wurde eine Zwischenspülung durchgeführt und der Vorgang wiederholt, bis die Feile widerstandslos eingebracht werden konnte. Auch bei diesem System nutzte man bei jedem Patient eine neue Feile.

Desinfektion

Das Prozedere der Desinfektion gleicht dem Protokoll der ProTaper®-Aufbereitung. Die Abschlusspülung erfolgte ebenfalls unter Verwendung von Natriumhypochlorit.

Wurzelfüllung

Nach Abschlusspülung trocknete man die Kanäle mithilfe von passenden Papierspitzen, die zu der jeweiligen verwendeten ISO-Größe der WaveOne™-Feile gehörten. Wenn die Papierspitzen trocken und apikal ohne Blut waren, wurden die Kanalwände mit Sealer bestrichen. Auch hier nutzte man Papierspitzen. Abschließend

konnte die Wurzelfüllung durchgeführt werden. Verwendung fanden hier zum WaveOne™-System dazugehörige Obturatoren. Um eine gute Passung zu erreichen, überprüfte man die Kanalaufbereitung mithilfe eines Verifiers, eine apikale Klemmpassung auf Arbeitslänge war hier die Voraussetzung. War dies nicht der Fall, musste entweder nachinstrumentiert werden, oder eine ISO-Größe größer gewählt werden. Um eine Überstopfung des Wurzelfüllmaterials zu vermeiden, wurden alle Obturatoren apikal um 0,5 mm gekürzt. Anschließend wurden die Thermafil-Stifte ausgemessen und im Thermaprep2®-Ofen erwärmt. Nach der entsprechenden Erwärmungszeit setzte der Behandler umgehend den Stift in den Wurzelkanal. Zum Schluss trennte man die Wurzelfüllung auch bei diesem System mittels nicht-diamantierter Kugel ohne Wasserkühlung ab. Die Thermafilstiftinsertion fand hintereinander statt. Abschließend säuberte man die Kavitätenwände und konditionierte diese für eine Kompositfüllung. Die Zugangskavität konnte damit verschlossen werden. Das Ergebnis der Wurzelkanalbehandlung wurde im direkten Anschluss mittels Röntgenbild verifiziert.

2.5. Materialien und Geräte

2.5.1. Geräte und Hilfsmittel

Tabelle 1 Geräte und Hilfsmittel

Gates-Glidden-Bohrer	Hersteller: VDW GmbH, München, Deutschland Artikelnummer: V040380019300
X-smart für ProTaper®-System	Hersteller: Dentsply Maillefer Artikelnummer: A100400000000
X-smart plus für WaveOne™-System	Hersteller: Dentsply Detrey GmbH Artikelnummer: A103510000000
RayPex®4	Hersteller: VDW GmbH, München, Deutschland Artikelnummer: Messkabel: V040141000516 Netzteil: V040141000517 Akku: V040141000513
RayPex®5	Hersteller: VDW GmbH, München, Deutschland Artikelnummer: Messkabel: V040141000506 Netzteil: V040141000501 Akku: V040141000507
Zubehör zu Raypex®4 und Raypex®5	Artikelnummer: Lippencclip: V040141000514 Feilenklemme: V040141000515
Ultraschallansatz	Hersteller: SIRONA Referenznummer: 6002310
Thermaprep™Plus	Hersteller: Dentsply Detrey GmbH Artikelnummer: 14009227
Thermaprep®2	Hersteller: Dentsply Maillefer Artikelnummer: 064-4408
Nichtdiamantierte Kugel (Therma-Cut)	Hersteller: Dentsply Hersteller-Nr.: A005032501600

2.5.2. Verbrauchsmaterialien:

Tabelle 2 Verbrauchsmaterialien

Diverse Handfeilen (K-Feilen, Hedstroem, Reamer)	Hersteller: VDW
Natriumhypochlorit	1% Natriumhypochlorit; Aug.Hedinger GmbH & Co. KG; PZN: 08917324
EDTA	17% Edetinsäure-Dinatriumsalz; Speiko®- Dr. Speier GmbH; Art.Nr. 1058
Zitronensäure	10 % Zitronensäure; Speiko®-Dr. Speier GmbH; Art.Nr.: 1466
Calxyl® Röntgensichtbar	Calciumhydroxid, Bariumsulfat; OCO Präparate GmbH
Ledermix®	Demeclocyclin-Calcium(1:1)(30,21mg/g), Triamcinolo- nacetamid; Riemsler; Art.Nr.: 7728636
AH Plus®	Hersteller: Dentsply DeTrey Ref.-Nr.: 4570128
WaveOne™ Files	Hersteller: Dentsply Maillefer Ref.-Nr.: A07002
Papierspitzen WaveOne™	Hersteller: Dentsply Maillefer Ref.-Nr.: A024W
Obturatoren WaveOne™	Hersteller: Dentsplay Maillefer Ref.-Nr.: A1700
ProTaper® Universal Treatment Files	Hersteller: Dentsply Maillefer Ref.-Nr.: A04092
Papierspitzen ProTaper®	Hersteller: Dentsply Maillefer Ref.-Nr.: A022W
Obturatoren ProTaper®	Hersteller: Dentsply Maillefer Ref.-Nr.: A1411
Verifier	Hersteller: Dentsply Maillefer Ref.-Nr.: A0175
Cavidex®	Hersteller: DETAX, Ettlingen Ref.-Nr.: 02280

2.5.3. Röntgengeräte

Um die Ergebnisse der abgeschlossenen Wurzelkanalbehandlungen zu überprüfen, wurden direkt nach der Wurzelfüllung Röntgenkontrollbilder angefertigt. Es handelte sich dabei um Einzelbilder oder – in Einzelfällen – um Gesamtaufnahmen im Zusammenhang mit einem Orthopantomogramm (OPTG).

OPTG: Bei dem in der Untersuchung verwendeten Röntgengerät handelt es sich um Orthopos XG plus (Hersteller: Sirona). Die Belichtungszeit betrug immer 14,1 sec, die kV- und mA-Werte mussten dem jeweiligen Patienten angepasst werden. Hier bestand die Kombination aus 64 kV / 8 mA, 69 kV / 15 mA, 73 kV / 15 mA. Um ein kontrastreiches und detailgetreues Bild zu erhalten, wählte man bei Volljährigen in der Regel die letzte Verknüpfung.

Intraorale Einzelaufnahmen: Hierfür stand der Röntgenstrahler HELIODENT DS (Hersteller: SIRONA) zur Verfügung. Die Einstellung des Röntgengerätes beschränkt sich auf die Variabilität in der Belichtungszeit (0,08 sec bis 0,16 sec). Der Anodenstrom und die Röhrenspannung sind voreingestellt auf 7 mA und 60 kV. Bis zum 17.10.2015 wurde mithilfe eines Sensors (SIRONA) digital geröntgt. Danach kam das Gerät VistaScan von Dürr Dental zum Einsatz, welches mittels Speicherfolie (Größe 3 x 4 cm) und Scanner die Bilder in eine digitale Form umwandelte. Bei den Röntgenaufnahmen wurde die Paralleltechnik angewandt.

2.6. Recall und Outcomeparameter

Das Ziel der Untersuchung war es, die Röntgenbilder postendodontisch unter verschiedenen Kriterien vergleichen zu können. Dabei spielte zum einen die Qualität der Wurzelfüllung eine große Rolle, zum anderen der periapikale Index. Es wurde eine Exceltabelle für die jeweilige Behandlungsform erstellt, die folgende Punkte zur Untersuchung vorgab:

Geschlecht:

- 1 Weiblich
- 2 Männlich

Vitalität:

- 1 positiv
- 2 negativ

Vorbehandlung:

Hier sollte aufgezeigt werden, inwiefern der betroffene Zahn bereits konservierend, endodontisch oder prothetisch versorgt war.

- 1 Keine (Zahn röntgenologisch unauffällig)
- 2 Füllungstherapie
- 3 Indirekte/direkte Überkappung (CP-Behandlung)
- 4 Indirekte Restauration
- 5 Karies
- 6 Vorhandene Wurzelfüllung

Recallintervall:

Das Recallintervall wurde durch den Zeitraum zwischen Wurzelfüllung und röntgenologischer Nachkontrolle bestimmt. Die Spanne erstreckt sich von 3 bis zu 102 Monaten. Die röntgenologische Erfolgskontrolle fand nach einem Zeitraum von drei Monaten oder länger statt. Zusätzlich wurde der Zahn an diesem Behandlungstermin auch auf klinische Symptome geprüft (Perkussion, Palpation und Sondierungstiefen).

Kanalsituation:

Die Kanalsituation wurde in vier Abstufungen bewertet, wobei sich die Bewertung wie folgt aufschlüsselte:

- 1 stark gekrümmt
- 2 gekrümmt
- 3 leicht gekrümmt
- 4 gerade

Zur Ermittlung der Kanalkrümmung gibt es verschiedene Methoden. So kann zum einen der Krümmungsradius, zum anderen der Krümmungswinkel ermittelt werden [77]. Die Einteilung erfolgte nach den Richtlinien von Schneider [78] (Abbildung 10). Demzufolge sind Kanäle mit einem Winkel von $< 5^\circ$ als gerade einzuordnen und eine leichte Krümmung mit einer Spanne von $10 - 20^\circ$ definiert. Gekrümmte Kanäle sollten einen maximalen Winkel von 70° besitzen. Alle Werte $> 70^\circ$ zählen zu den stark gekrümmten Wurzelkanälen.

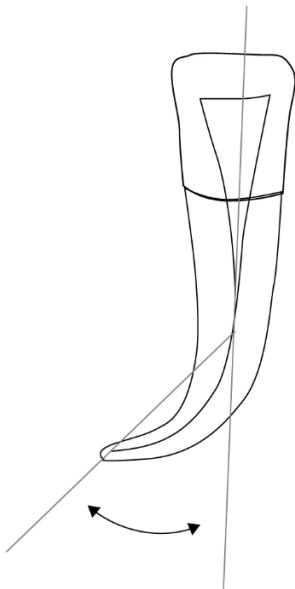


Abbildung 9 Beispiel Bestimmung Wurzelkanalkrümmung

Länge der Wurzelkanalfüllung:

Auch hier wurde in vier Kategorien eingeteilt.

- 1 stark überpresste Wurzelfüllungen (Sealerpuffs gehörten nicht zu dieser Kategorie) > 2 mm
- 2 Wurzelfüllung zu lang > 0 – 2 mm
- 3 Wurzelfüllung zu kurz < (-)2 mm
- 4 Wurzelfüllung lege artis gelegt, hier wurden die Grenzen zwischen 0 und (-) 2 mm gesetzt, dies richtet sich nach den Qualitätsrichtlinien der European Society of Endodontology [2].

Homogenität:

Die Homogenität wurde in vier Kategorien aufgeschlüsselt.

- 1 Inhomogen und apikal nicht verdichtet
- 2 Inhomogen und apikal verdichtet
- 3 Teilweise inhomogen und/oder nicht wandständig
- 4 Homogen und wandständig

Kanalverlauf:

- 1 zum Beispiel via falsa, Perforation oder Instrumentenfraktur
- 2 kontinuierlicher und konischer Verlauf, Kanalverlauf nicht dem Original entsprechend
- 3 Kanalverlauf beibehalten, jedoch nicht kontinuierlich und konisch
- 4 Kanalverlauf beibehalten, kontinuierlich und konisch

Der nächste Untersuchungspunkt beinhaltete die Feststellung einer vorhandenen apikalen Destruktion. Dabei ist der Wert 1 gleichbedeutend mit unauffälligem Apex. 0 dagegen spricht für eine apikale Veränderung im Sinne einer Lyse oder eines erweiterten parodontalen Spalts.

Anschließend erfolgte die Analyse des Periapikalen Index (PAI) [1]. Dies ist ein anerkanntes Indexsystem, welches zum röntgenologischen Vergleich der periapikalen Destruktion und somit zu einer einheitlichen Auswertung genutzt werden kann.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Unterteilung des PAI aus Praktikabilitätsgründen etwas modifiziert. Wichtig ist, dass die Nummern des PAI in der Auswertungstabelle zur besseren Beurteilung vertauscht wurden. Die Einteilung wird in der Tabelle 3 erläutert.

Tabelle 3 Codierung Periapikaler Index

PAI	Kategorie	Beschreibung
4	1	periapikale Aufhellung mit der Gefahr einer Exazerbation und extrahierte Zähne
3	2	deutliche apikale Aufhellung
2	3	minimale Veränderungen im apikalen Bereich im Sinne eines erweiterten Parodontal-Spalts
1	4	normale apikale Struktur

Der periapikale Index wurde direkt nach Wurzelfüllung für die Ausgangssituation, und für das Recallröntgenkontrollbild festgelegt. Abschließend wurde die Differenz aus den Werten PAI-Ausgang und PAI-Recall gebildet.

2.7. Definition Erfolg

Als Grundlage für die Bestimmung des Erfolgs wurde die Differenz des periapikalen Index angewandt. In der vorliegenden Untersuchung wurde als Erfolgskriterium die knöcherne Regeneration des periapikalen Gewebes gewählt. Die Behandlung galt auch als erfolgreich, wenn eine Verbesserung des periapikalen Indexes zu verzeichnen war, der Parodontalspalt aber noch nicht in seiner ursprünglichen Breite röntgenologisch dargestellt wurde. Zeigte das Röntgenbild bei einem apikal unauffälligen Zahn bei der Kontrollaufnahme den gleichen röntgenologischen Befund, wurde dieser der Kategorie Erfolg zugeordnet. Weiterhin wurde die Beschwerdefreiheit des Patienten vorausgesetzt. Zähne die aufgrund von Beschwerden oder Frakturen extraktionswürdig waren, wurden der Gruppe Misserfolg zugeteilt.

2.8. Reliabilitätsuntersuchung

Um die Reliabilität der Studie zu prüfen, wurden Stichproben von einer unabhängigen Person erhoben. Es sollten jeweils 16 Fälle von einer Zahnärztin für jedes Aufbereitungssystem ausgewertet werden. Parameter wie Kanalverlauf, Kanalsituation, Wurzelfülllänge, Homogenität und der periapikale Index wurden analog dem vorgegebenen Studiendesign bestimmt. Die Untersuchung fand an dem gleichen Untersuchungsmonitor statt, an welchem auch die anderen Werte erhoben wurden. Der Übereinstimmungsindex für WaveOne™ lag bei 92,2 %, für die ProTaper®-Instrumentierung 91 %. Differenzen wurden hauptsächlich in der Bewertung der Kanalkrümmung ermittelt.

2.9. Statistik

Die erhobenen Daten der Analyse wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel 2013 der Firma Microsoft erfasst und anschließend für das Statistikprogramm SPSS 23.0 (SPSS, Chicago, Illinois, USA) konvertiert. Zunächst wurde eine deskriptive Ergebnisdarstellung angewendet. Die Grafiken wurden mithilfe von Excel erstellt, Tabellen mit dem Programm Microsoft® Office Word 2013 angefertigt. Für die explorative Statistik wurde SPSS 23.0 angewandt. Neben den statistischen Tests TTest und Korrelationsberechnungen nach Pearson kam die Methodik der logistischen Regression zum Einsatz. Mit dem logistischen Regressionsmodell wurden die signifikanten Einflussfaktoren in Bezug auf den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung aufgeschlüsselt. Ziel war es, die Vorhersagekraft des statistischen Modells zu verbessern, um anschließend mithilfe des formulierten Regressionsmodells eine möglichst exakte Erfolgswahrscheinlichkeitsberechnung durchführen zu können. Zur Testung der Modellgüte kamen der Omnibustest, Pseudo-R-Quadrat-Werte und der Hosmer-Lemeshow-Test zum Einsatz. Das Signifikanzniveau wurde auf $p \leq 0,05$ festgelegt.

3. Ergebnisse

3.1. Deskriptive Statistik

3.1.1. Behandlungsfälle

Die Gesamtzahl der Behandlungsfälle (WaveOne™) vom 08.06.2011 bis 22.9.2016 beläuft sich auf 606. Daraus lassen sich für die Untersuchung 140 Patientenfälle ableiten. Exkludiert wurden Zähne die den Einschlusskriterien der Studie nicht gerecht wurden oder den Ausschlusskriterien (Recallzeitraum < 3 Monate, fehlende Röntgenbilder, Zahnart) entsprachen. Bei einer Gesamtzahl von 680 behandelten Zähnen mit ProTaper® im Zeitraum 15.01.2007 – 30.05.2011 konnten 152 Zähne für die retrospektive Untersuchung genutzt werden.

Insgesamt wurden in einem kürzeren Zeitraum mehr Patienten mit ProTaper®-Feilen behandelt. Das Intervall liegt bei 4,4 Jahren. WaveOne™ wurde 5,3 Jahre angewendet.

3.1.2. Geschlecht

ProTaper®

Die Auswertung der Geschlechterverteilung ergab, dass in dieser Untersuchung mehr Männer als Frauen analysiert wurden, die Zahlen mit 54 % (n = 82) zu 46 % (n = 70) jedoch keinen signifikanten Unterschied aufweisen.

WaveOne™

Die Verteilung der Geschlechter ist im Wesentlichen ausgeglichen. Es wurden 66 weibliche Patienten und 74 männliche Patienten behandelt. Das entspricht einem prozentualen Verhältnis von 47 % zu 53 %.

Die Verteilung der Geschlechter ergibt laut TTest keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$).

3.1.3. Alter

Tabelle 4 Altersgruppen

Altersgruppe	ProTaper®		WaveOne™	
	Verteilung (Anzahl)	Prozentualer Anteil	Verteilung (Anzahl)	Prozentualer Anteil
< 30 Jahre	12	8	7	5
31-45 Jahre	47	31	37	26
46-60 Jahre	36	24	38	27
61-75 Jahre	49	32	48	34
>76	8	5	10	7

ProTaper®

Das durchschnittliche Alter der Patienten beträgt 52,8 Jahre mit einer Standardabweichung von 15,4 Jahren. Bezugsdaten sind das Geburtsdatum des Patienten und das Recalldatum. In der Tabelle sind die Patienten in Altersgruppen aufgeschlüsselt. Junge Patienten (unter 30 Jahre) und sehr alte Patienten (> 76 Jahre) wurden seltener behandelt. Die Mehrheit liegt im Altersbereich von 30-75 Jahre.

WaveOne™

Der Mittelwert der Altersangaben beträgt 54,7 Jahre, mit einer Standardabweichung von 14,5 Jahren. Auch hier wurden die Patienten in die gleichen Gruppen aufgeteilt mit dem Ergebnis, das auch hier junge und sehr alte Patienten eher die Ausnahme darstellen.

Vergleicht man die Altersstrukturen in Tabelle 4 wird deutlich, dass sich die Durchschnittsalter nahezu gleichen. Die Differenz liegt bei 1,9 Jahren.

3.1.4. Zahnverteilung

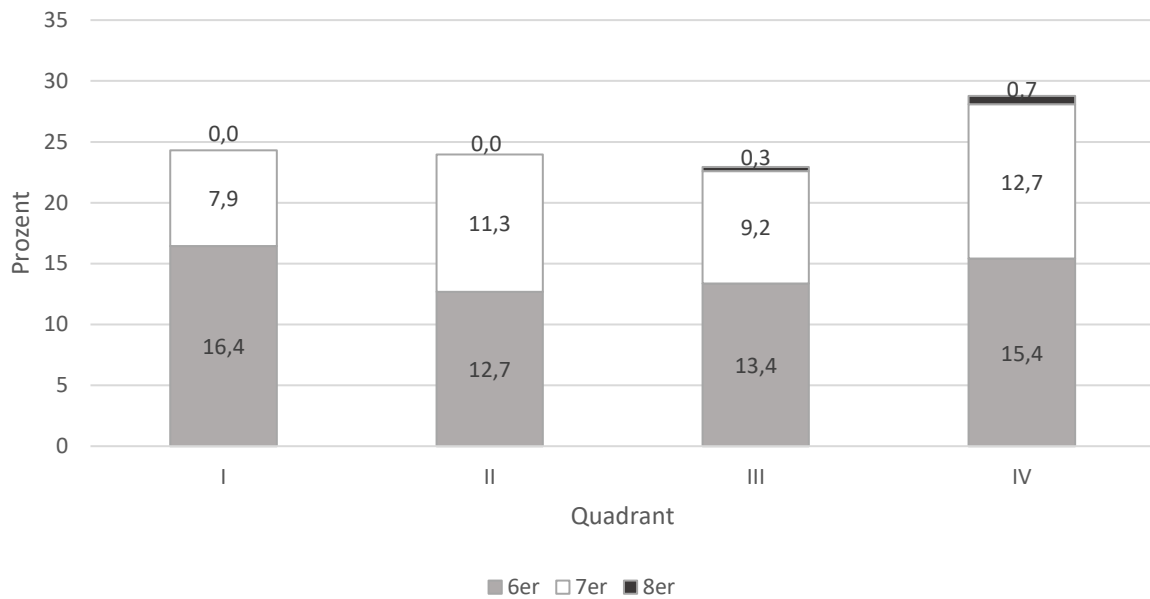


Abbildung 10 Zahnverteilung

Die Abbildung 10 zeigt die Gesamtverteilung der behandelten Zähne. Der prozentuale Anteil der Zähne aus den jeweiligen Quadranten liegt bei 24,3 % (n = 71) (I. Quadrant), 24 % (n = 70) (II. Quadrant), 22,9 % (n = 67) (III. Quadrant) und 28,8 % (n = 84) (IV. Quadrant). Die Verteilung der behandelten Zähne ist quadrantenweise annähernd ausgeglichen.

Bilanz Quadrant versus Erfolg

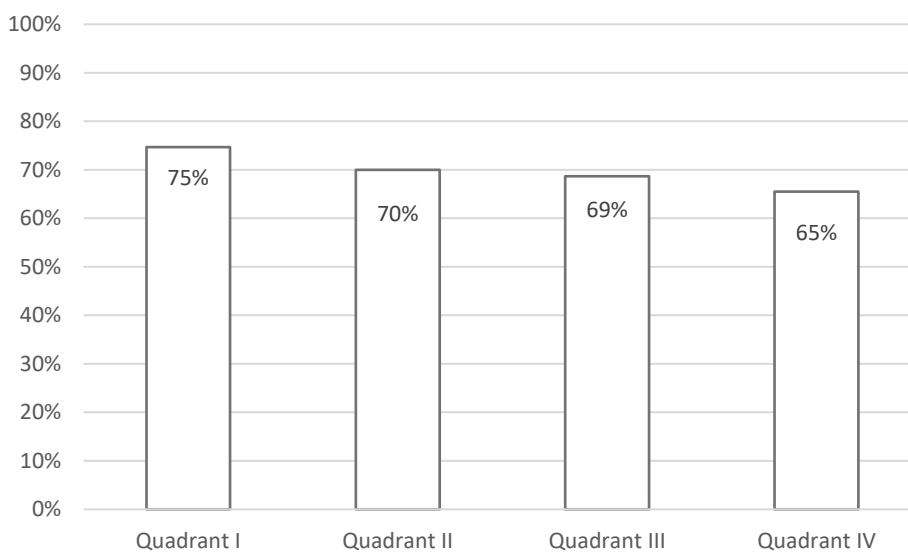


Abbildung 11 Bilanz Quadrant versus Erfolg

Das Diagramm (Abbildung 11) betrachtet die Gesamtzahl der behandelten Zähne, in Bezug auf eine erfolgreiche Behandlung, unterteilt in die jeweiligen Zahnquadranten. Hier wird deutlich, dass die Behandlung der Molaren im I. Quadranten am erfolgreichsten war. Der Erfolg der endodontisch behandelten Zähne im Oberkiefer ist höher im Vergleich zum Unterkiefer, jedoch nicht signifikant ($p > 0,05$)

3.1.5. Vorbehandlung

Tabelle 5 Vorbehandlung ProTaper® und WaveOne™

Vorbehandlung	ProTaper®	WaveOne™	Δ
Keine	8%	3%	5
Kariös	26%	25%	1
Füllungstherapie	14%	11%	3
Indirekte / direkte Überkappung	26%	30%	4
Indirekte Restauration	23%	27%	4
Wurzelfüllung	3%	4%	1

Zusammenfassend kann auch bei diesem Parameter kein Trend festgestellt werden. Die Vorbehandlungen sind bei beiden Patientengruppen durchmischt. Die Prozentangaben unterscheiden sich nur unwesentlich. Die Vorbehandlung 1 (keine) ergibt zwar einen signifikanten Unterschied zwischen den Feilensystemen ($p = 0,03$), betrifft jedoch nur einen geringen Teil (6 %) des Datensatzes. Alle anderen Werte sind nicht signifikant ($p > 0,05$).

Tabelle 6 Vorbehandlung zusammengefasst in Zusammenhang mit der Vitalität

Vorbehandlung	Vitalität		Gesamt
	positiv	negativ	
Keine	4%	2%	6%
Karies	20%	5%	25%
Füllungstherapie	8%	5%	13%
Indirekte/direkte Überkappung	18%	10%	28%
indirekte Restauration	12%	13%	25%
Wurzelfüllung	0%	3%	3%
Gesamt	62%	38%	100%

In Tabelle 6 wird deutlich, dass Karies und die damit verbundene konservierende Therapie mit insgesamt 66 % die Hauptursache für eine Trepanation des Zahnes darstellte. Die Untergruppen Füllungstherapie und indirekte/direkte Überkappung sind der Ursache Karies zuzuordnen. Die notwendige Trepanation aufgrund von prothetischer Vorbehandlung des Zahnes fällt mit 25 % weniger ins Gewicht. Über die Hälfte der Zähne wurden aufgrund einer irreversiblen Pulpitis eröffnet (62 %). Bei 38 % war die apikale Parodontitis mit Devitalität des Zahnes die Ursache für die notwendige endodontische Behandlung.

3.1.6. Vitalität

ProTaper®

Vor Einleitung der Wurzelkanalbehandlung wurden alle Zähne auf ihre Vitalität geprüft. Die Gewichtung fällt auf die vitalen Zähne, was grundsätzlich auf eine Vitalexstirpation hinweist. 66 % (n = 100) der Zähne waren vital, 34 % (n = 52) devital.

WaveOne™

Bei 57 % (n = 80) fand eine Vitalexstirpation statt. Die verbleibenden 60 Zähne (43 %) waren bereits bei Einleitung der Wurzelkanalbehandlung devital.

Vergleicht man beide Gruppen miteinander, so ergibt sich ein prozentualer Unterschied von ca. 10 % in den Kategorien. Tendenziell wurden bei beiden Systemen eher vitale Zähne trepaniert. Die Verteilung der Werte in Bezug auf die Feilensysteme ist nicht signifikant unterschiedlich ($p > 0,05$).

3.1.7. Recallzeitraum

Tabelle 7 Recallzeitraum ProTaper® und WaveOne™

Recallintervall	ProTaper®		WaveOne™	
	Verteilung (Anzahl)	Prozentualer Anteil	Verteilung (Anzahl)	Prozentualer Anteil
< 0,5 Jahr	24	16	55	39
0,5 – 1 Jahr	10	7	21	15
1 – 2 Jahre	20	13	26	19
2 – 3 Jahre	23	15	17	12
> 3 Jahre	75	49	21	15

ProTaper®

Der Mittelwert des Recallzeitraums beträgt 44 Monate. Dies sind durchschnittlich 3,4 Jahre. Die tabellarische Zusammenfassung zeigt deutlich, dass knapp 50 % der Recalls nach über 3 Jahren stattgefunden haben.

WaveOne™

Das durchschnittliche Recallintervall liegt bei 17 Monaten. Über die Hälfte der analysierten Fälle liegen im Recallintervall von unter einem Jahr. Die verbleibenden Patientenzahlen verteilen sich ausgewogen auf die weiteren drei Kategorien.

Stellt man beide Gruppen gegenüber, ist eine Differenz im Nachuntersuchungszeitraum feststellbar. Die Durchschnittswerte weichen 27 Monate voneinander ab.

3.1.8. Kanalsituation

Die Kanalsituation beschreibt die Form des Wurzelkanals in seiner Längsachse. Dies dient zur Beschreibung, ob eine Krümmung vorliegt oder nicht.

ProTaper® und WaveOne™

Die prozentuale Verteilung der einzelnen Ausprägungen schlüsselt sich wie folgt auf:

Tabelle 8 Kanalsituation ProTaper® und WaveOne™

Kanalsituation	ProTaper®	WaveOne™	Δ
Gerader Kanal	32,9 %	49,3 %	16,4
Leichte Krümmung	54,6 %	43,6 %	11
Krümmung	11,8 %	6,4 %	5,4
Starke Krümmung	0,7 %	0,7 %	0

Mit dem Mehrfeilensystem wurde eine höhere Anzahl an gekrümmten Kanälen instrumentiert (67,1 %). In der Behandlungsperiode von WaveOne™ weisen 50,7 % (n = 71) der behandelten Zähne eine Krümmung auf.

3.1.9. Länge der Wurzelkanalfüllung

ProTaper®

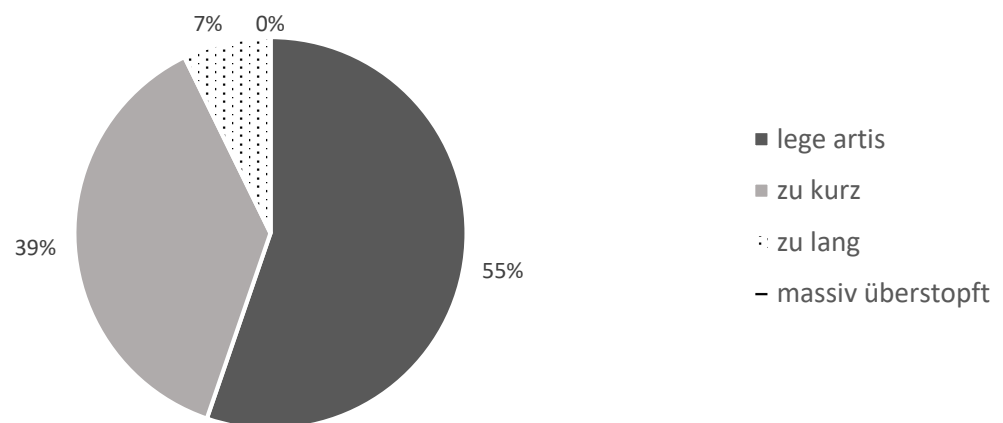


Abbildung 12 Länge der Wurzelkanalfüllung ProTaper®

Aus der visuellen Darstellung wird ersichtlich, dass ein hoher Anteil der Wurzelfüllungen zu kurz gelegt wurde. Alle Werte die ≤ -2 mm sind, fallen in diese Kategorie. Insgesamt 55 % (n = 84) liegen im Abstand von 0 – (-2mm) zum röntgenologischen Apex. Nur 7 %, was einer Anzahl von 11 Zähnen entspricht, wurden leicht überstopft. Fälle mit massiver Überstopfung sind nicht existent.

WaveOne™

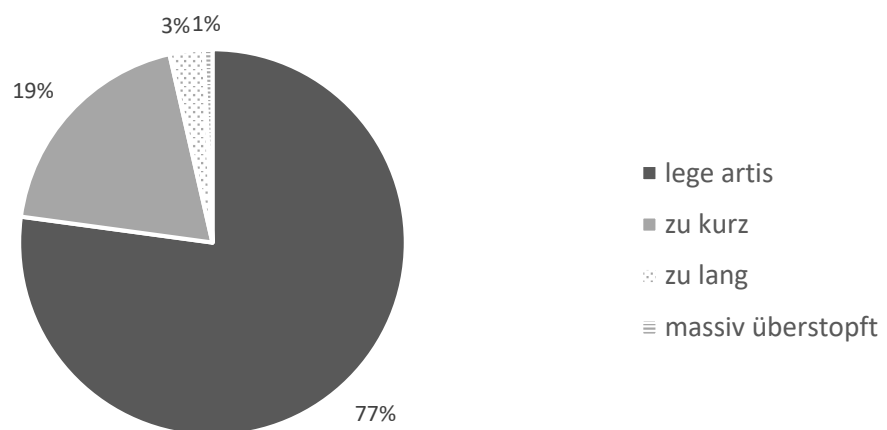


Abbildung 13 Länge der Wurzelkanalfüllung WaveOne™

Mehr als Dreiviertel der Wurzelfüllungen wurden lege artis gelegt (0 - (-2 mm)). In die Kategorie der zu kurzen Füllungen fielen 19 % (n = 27) und 1 – 3 % wurden überstopft.

Verglichen mit dem ProTaper®-System wurden deutlich mehr Wurzelfüllungen in korrekter Länge gelegt. Der Unterschied liegt bei 22 % und ist laut TTest signifikant ($p < 0,001$). Massive Überstopfung ist bei beiden Systemen nicht von Bedeutung ($p > 0,05$). Bei nicht lege artis gefüllten Zähnen spielen die zu kurz gelegten Füllungen bei beiden Systemen eine größere Rolle als die überstopften. Der Unterschied in der Verteilung ist auch hier signifikant ($p < 0,001$)

3.1.10. Homogenität

ProTaper®

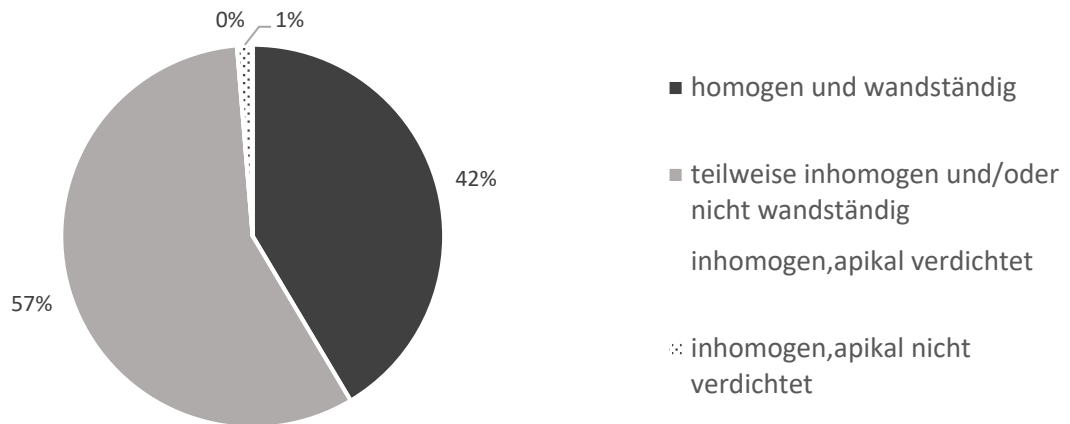


Abbildung 14 Homogenität ProTaper®

Betrachtet man das Kriterium Homogenität kristallisieren sich zwei Hauptgruppen heraus. Bei 57 % (n = 87) der Wurzelfüllungen wurden leichte Mängel in der Homogenität festgestellt. Größere Inhomogenitäten kamen bei 1 % (n = 2) der Fälle vor. Insgesamt 42 % (n = 64) zeigten eine homogene und wandständige Wurzelfüllung.

WaveOne™

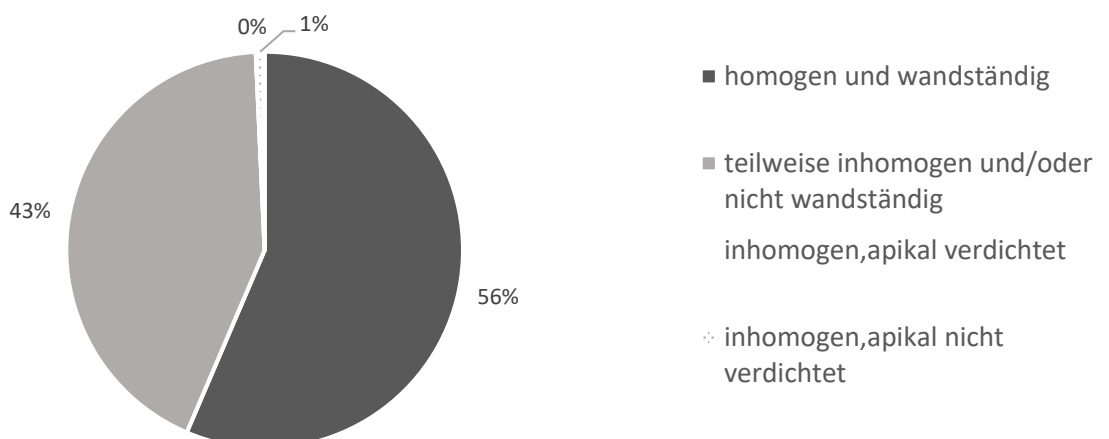


Abbildung 15 Homogenität WaveOne™

Mehr als die Hälfte der Wurzelkanalfüllungen zeigen im Röntgenbild einen homogenen und wandständigen Verlauf. Bei 43 % (n = 60) sind leichte Inhomogenitäten festzustellen. Ein geringer Prozentsatz von 1 % (n = 1) ist inhomogen und apikal nicht verdichtet. Nicht homogene Füllungen mit apikaler Verdichtung sind nicht existent.

Schlussfolgernd wurden in beiden Gruppen nur sehr wenige Füllungen mit erheblichen Mängeln in der Homogenität gelegt. Das Einfeilensystem weist mehr homogene und wandständige Füllungen auf als das Mehrfeilensystem, der Unterschied in der Verteilung ist hier signifikant ($p = 0,01$). Geringe Inhomogenitäten sind bei beiden Instrumentengruppen häufig, aber auch hier ist ein signifikanter Unterschied zwischen ProTaper® und WaveOne™ ($p = 0,014$) festzustellen.

3.1.11. Kanalverlauf

Tabelle 9 Kanalverlauf ProTaper® und WaveOne™

Kanalverlauf	ProTaper™	WaveOne®	Δ
Kanalverlauf beibehalten, kontinuierliche und konische Wurzelkanalaufbereitung	95 %	99 %	4
nur Kanalverlauf beibehalten	1 %	0 %	1
nur kontinuierliche und konische Aufbereitung mit Richtungsabweichung	2 %	0 %	2
Via falsa, Perforation oder Instrumentenbruch	1 %	1 %	0

Beide Gruppenergebnisse sind sich sehr ähnlich. Geringfügige Richtungsabweichungen, via falsa, Instrumentenfrakturen oder Perforationen sind in der Statistik nachrangig. Bei beiden Systemen wurden über 95 % der Wurzelkanäle kontinuierlich und konisch aufbereitet, mit Beibehaltung des Kanalverlaufs. Es liegt kein signifikanter Unterschied in der Verteilung der Werte vor ($p > 0,05$).

3.1.12. Apikale Ausgangssituation

Tabelle 10 Apikale Ausgangssituation ProTaper® und WaveOne™

Merkmal	ProTaper®	WaveOne™	Δ
Apikale Aufhellung			
Nein	57 %	43 %	14
Ja	43 %	57 %	14
Ausprägung			
erweiterter Parodontalspalt	26,3 % (n = 40)	28,6 % (n = 40)	2,3
deutliche apikale Aufhellung	14,5 % (n = 22)	25,7 % (n = 36)	11,2
periapikale Aufhellung mit der Gefahr einer Exazerbation	1,3 % (n = 2)	2,9 % (n = 4)	1,6

Zwischen beiden Gruppen ist ein umgekehrtes Verhältnis festzustellen. Sind es bei der ProTaper®-Behandlung 57 % der Zähne, die apikal unauffällig sind, so sind es bei WaveOne™ 57 % der Zähne, die eine periapikale Lyse aufweisen. Stark ausgeprägte apikale Lysen sind bei beiden Gruppen selten. Bei den ProTaper®-Patienten zeigten über die Hälfte der Patienten mit apikalen Aufhellungen erweiterte Parodontalspalten. Die deutlichen apikalen Aufhellungen nehmen einen kleineren Teil ein. In der Gruppe der mit WaveOne™-behandelten Zähne halten sich die Fallzahlen der Patienten mit apikaler Aufhellung und erweiterten Parodontalspalten annähernd die Waage.

Die Verteilung der apikalen Ausgangslage zwischen den Systemen ergibt laut TTest einen signifikanten Unterschied ($p = 0,014$). Weitere Signifikanzen wurden bei röntgenologisch unauffälliger periapikaler Situation ($p = 0,01$) und deutlicher apikaler Aufhellung ($p = 0,016$) berechnet.

3.1.13. Veränderung des periapikalen Indexes und prozentuale Erfolgsrate

Behandlungserfolg

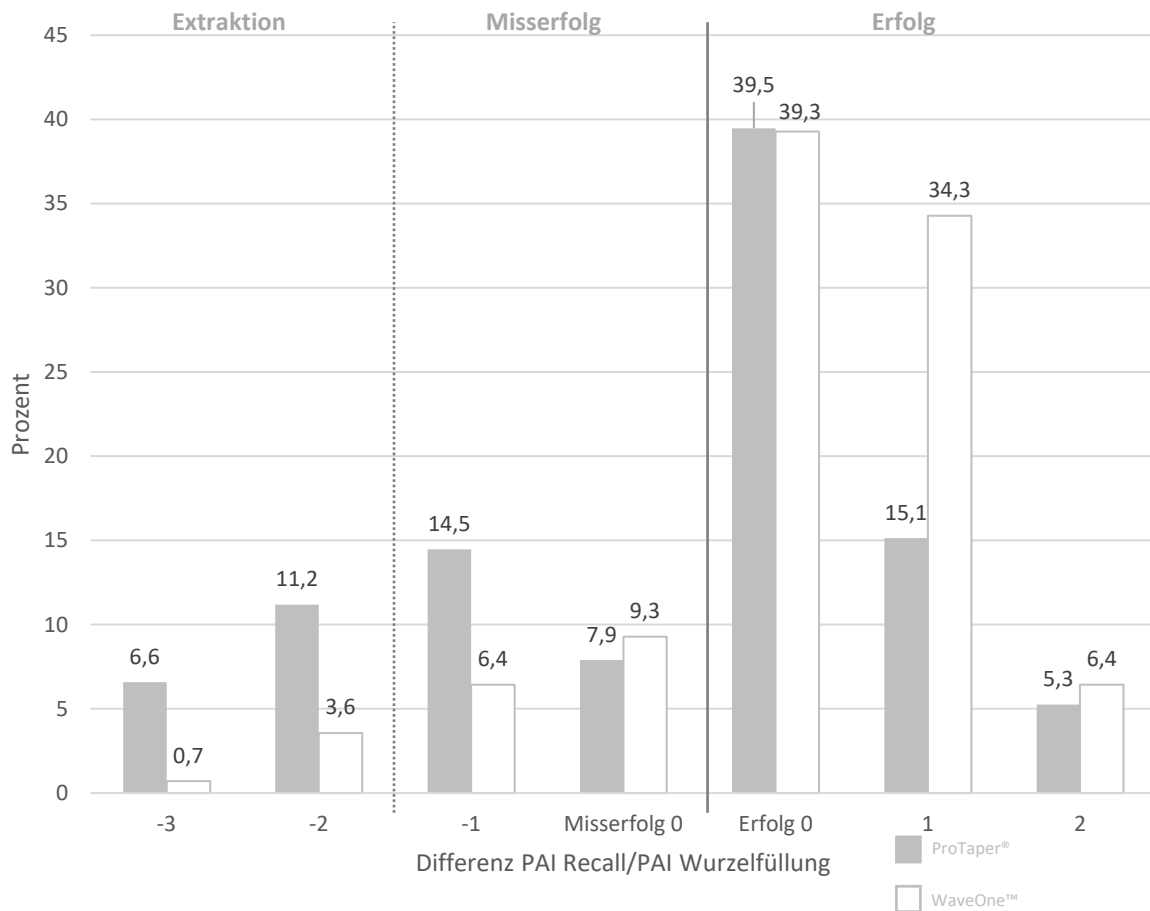


Abbildung 16 Behandlungserfolg / ProTaper® (grau) und WaveOne™ (weiß)

ProTaper®

Betrachtet man insgesamt die Erfolgsrate der ProTaper®-Behandlung, so ergibt sich ein Prozentsatz von 59,9 %. Alle Behandlungen die vorher bereits apikal unauffällig erschienen und dies auch nach Kontrolle waren, gelten als Erfolg. Zähne mit rückläufiger Lyse und zunehmender Ossifikation der Apikalregion gehören ebenso zur Gruppe der positiven Resultate (Abbildung 17). Die Misserfolgsquote entspricht einem Wert von 40,1 %. Die Behandlung gilt dann als Misserfolg, wenn die apikale Region im Vergleich zur Ausgangssituation eine größere Veränderung im Sinne einer Aufhellung aufzeigt (Abbildung 18). Auch wenn der Zahn auf dem Ausgangsbild eine Lyse aufweist und diese nach Einheilung der Wurzelkanalfüllung nicht geringer erscheint, gilt dies als nicht erfolgreich (Abbildung 19).

Beispielbilder:



Abbildung 17 Beispiel Erfolg (2) mit Ausgang PAI 2 (links) und Recall PAI 4 nach 83 Monaten (rechts)



Abbildung 18 Beispiel Misserfolg (-2) mit Ausgang PAI 3 (links) und Recall PAI 1 nach 11 Monaten (rechts)



Abbildung 19 Beispiel Misserfolg (0) mit Ausgang PAI 1 (links) und Recall PAI 1 nach 6 Monaten (rechts)

WaveOne™

Aus der Analyse der Werte geht hervor, dass die Misserfolgsquote insgesamt bei 20 % liegt. Insgesamt 80 % der Fälle sind als Erfolg zu werten. Ein Beispiel zeigt Abbildung 20 und Abbildung 21. Bei einer Differenz von -2 bis -3 sind die Zähne in der Regel nicht mehr therapierbar und mussten extrahiert werden. In diese Gruppe fallen 0,7 % (n = 1) und 3,6 % (n = 5). Bei neun Zähnen (6,4 %) hat sich der Ausgangszustand geringfügig verschlechtert (Abbildung 22). Als Misserfolg gelten auch die Fälle, die zu

Beginn apikale Veränderungen aufwiesen und diese beim Recalltermin unverändert zu diagnostizieren waren. In diese Kategorie fallen 13 Zähne, was einem Prozentsatz von 9,3 % entspricht. Zum Zeitpunkt der Wurzelfüllung und bei Nachkontrolle waren 55 Zähne (39,3 %) röntgenologisch ohne pathologischen Befund. Insgesamt 40,7 % (n = 57) wiesen eine apikale Knochenregeneration auf.



Abbildung 20 Beispiel Erfolg (2) mit Ausgang PAI 2 und Recall PAI 4 nach 28 Monaten



Abbildung 21 Beispiel Erfolg (0) mit Ausgang PAI 4 und Recall PAI 4 nach 3 Monaten



Abbildung 22 Beispiel Misserfolg (-1) mit Ausgang PAI 3 und Recall PAI 2 nach 15 Monaten

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Erfolgsquote von WaveOne™-therapierten Zähnen um 20 % höher ist, als diejenige der ProTaper®-behandelten Zähne. Beim Einfeilensystem sind 20,3 % mehr Patientenfälle, die einen Erfolg im Sinne von Regeneration der periapikalen Region aufzeigen. Die Prozentangaben in Bezug auf Erfolg 0, bei gleichbleibender apikaler Unauffälligkeit gleichen sich bei beiden Systemen. Es liegt lediglich eine Differenz von 0,2 % vor.

3.2. Explorative Statistik

3.2.1. TTest und Korrelationskoeffizienten

Zunächst wurden die einzelnen Merkmale in ihre Untergruppen unterteilt und dadurch die Anzahl der Variablen vervielfacht. Folglich sind diese numerisch und nicht mehr beschreibend. Dadurch sind sie für Korrelationen und TTests nutzbar.

Infolgedessen wurden mittels TTest die zwei Aufbereitungssysteme hinsichtlich der erhobenen Parameter verglichen, um signifikante Unterschiede in der Verteilung der Werte zu detektieren.

Tabelle 11 Signifikanz der Unterschiede in der Verteilung der Werte berechnet mit TTest bezogen auf Feilensystem und Erfolg; signifikante Werte sind hervorgehoben, durchgestrichene Zellen $p \geq 0,05$

TTest bezogen auf	Feilensystem p-Wert	Erfolg p-Wert
Differenz Recall/WF in Monaten	< 0,001	-
Ausgangssituation apikal	0,014	0,003
Keine Vorbehandlung	0,038	0,038
Homogenität (homogen)	0,01	0,035
Homogenität (teilweise inhomogen)	0,014	-
Wurzelfülllänge (zu lang)	-	< 0,001
Wurzelfülllänge (zu kurz)	0,001	0,018
Wurzelfülllänge (lege artis)	< 0,001	< 0,001
Kanalverlauf (nur Kanalverlauf beibehalten)	-	0,032
Kanalverlauf (Kanalverlauf beibehalten, kontinuierliche und konische Wurzelkanalaufbereitung)	-	0,017
PAI bei Wurzelfüllung (apikale Lyse)	0,016	-
PAI bei Wurzelfüllung (erweiterter PA-Spalt)	-	< 0,001
PAI bei Wurzelfüllung (normale Struktur)	0,01	0,002
PAI bei Recall (sehr große Lyse)	0,025	< 0,001
PAI bei Recall (apikale Lyse)	0,046	< 0,001
PAI bei Recall (erweiterter PA-Spalt)	-	0,012
PAI bei Recall (normale Struktur)	-	< 0,001
Feilensystem	-	< 0,001

Die Tabelle 11 listet die Parameter auf, die in ihrer Verteilung der Werte signifikante Unterschiede aufwiesen bezüglich Feilensystem und Erfolg. Ziel der Untersuchung war es, Zusammenhänge zwischen dem Erfolg (Differenz PAI) und den genutzten Feilensystemen abzuleiten und diese von Auswirkungen unterschiedlicher Ausgangslagen abzugrenzen. Die signifikanten p-Werte in den oben aufgeführten Kategorien geben erste Hinweise darauf, dass direkte Zusammenhänge bestehen können.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Angabe der nicht-signifikanten Werte verzichtet.

Anschließend erfolgte die Berechnung der Korrelation der erhobenen Parameter mit dem Feilensystem und dem endodontischen Erfolg, um mögliche Zusammenhänge zwischen den Variablen zu verdeutlichen.

3.2.2. Korrelationen nach Pearson

Tabelle 12 Korrelationskoeffizient zu Erfolg / Feilensystem

Variable	Korrelationskoeffizient zu	
	Erfolg	Feilensystem
Feilensystem	0,218	1
Keine Vorbehandlung	0,121	0,122
Länge WF (zu lang)	0,217	0,099
Länge WF (zu kurz)	0,138	0,201
Länge WF (lege artis)	0,228	0,23
Kanalverlauf 1	0,114	0,005
Kanalverlauf 3	0,125	0,08
Qualitätsscore	0,205	0,288
PAI WF (apikale Lyse)	0,05	0,141
PAI WF (erweiterter PA-Spalt)	0,261	0,025
PAI WF (normale Struktur)	0,18	0,15
PAI Recall (sehr große Lyse)	0,472	0,132
PAI Recall (apikale Lyse)	0,553	0,117
PAI Recall (erweiterter PA-Spalt)	0,14	0,082
PAI Recall (normale Struktur)	0,787	0,098
Differenz Recall/WF	0,083	0,468

Die in der Tabelle 12 markierten Variablen spiegeln Korrelationen zum Erfolg versus Feilensystem wieder. Alle Variablen mit einem Korrelationskoeffizienten $> 0,1$ wurden weiter untersucht, weil sich erst ab diesem Wert der Korrelationskoeffizient signifikant von null unterscheidet. Werte > 0 stellen eine positive Abhängigkeit der Variablen zueinander dar, Wert < 0 geben Hinweis auf eine negative Abhängigkeit. Alle Variablen mit Werten zwischen $-0,1$ und $0,1$ wurden nicht in die weiteren Berechnungen einbezogen, da hier von einer Unabhängigkeit auszugehen ist.

Nach den beiden Testverfahren konnten zunächst einige Variablen aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden.

Zentrieren und Standardisieren

Um die spätere Vergleichbarkeit und Interpretation der Daten zu erleichtern, wurden die numerischen Variablen zentriert und als z-Faktorwert für die weitere Analyse genutzt. Die Mittelwerte wurden auf 0, die Standardabweichung auf 1 gesetzt.

3.2.3. Logistische Regressionsanalyse mit SPSS

Bestimmung der Zielvariablen

Die abhängige Variable ist der Erfolg, welcher dichotom kodiert wurde (0 = Misserfolg, 1 = Erfolg). Es wurde das binär logistische Regressionsverfahren angewandt.

Unabhängige Variablen

Alle Variablen, die in den T-Tests und bei den Korrelationen signifikante Werte aufwiesen, wurden als unabhängige Variablen bestimmt. Dazu zählen zunächst alle in den Tabellen 11 und 12 aufgeführten Faktoren.

Berechnung

Zunächst wurden alle Variablen mit in die Regressionsanalyse einbezogen. Die errechneten Werte zeigten extreme Werte für Standardfehler und Regressionskoeffizienten auf, welche eine Trefferquote von 100 % erreichten. Die berechneten Signifikanzen deuteten darauf hin, dass eine Vielzahl an Einflüssen zufällig wäre.

Die Umstellung der Herangehensweise führte zu einem statistisch repräsentativen Ergebnis.

Nullmodell

Tabelle 13 Nullmodell (ohne unabhängige Variablen)

Klassifizierungstabelle^{a,b}

Beobachtet		Vorhergesagt			
		Misserfolg	Erfolg	Prozentsatz der Richtigen	
Schritt 0	Erfolg/Misserfolg	Misserfolg	0	89	0,0
		Erfolg	0	203	100,0
Gesamtprozentsatz					69,5

a. Konstante in das Modell einbezogen.

b. Der Trennwert lautet 0,500

Das Nullmodell (Tabelle 13) präsentiert eine Trefferquote von 69,5 %. In diesem Fall sind noch keine Einflussfaktoren berücksichtigt. Ziel ist es mit den untersuchten Einflussfaktoren die Vorhersagewerte zu verbessern und damit eine exaktere Aussage hinsichtlich der Erfolgswahrscheinlichkeit treffen zu können.

Modell mit Einschluss der unabhängigen Variablen

Tabelle 14 Klassifizierungstabelle mit Einschluss der unabhängigen Variablen

Klassifizierungstabelle^a

Beobachtet		Vorhergesagt			
		Misserfolg	Erfolg	Prozentsatz der Richtigen	
Schritt 1	Erfolg/Misserfolg	Misserfolg	34	55	38,2
		Erfolg	17	186	91,6
Gesamtprozentsatz					75,3

a. Der Trennwert lautet 0,500

Anhand der Tabelle 14 wird ersichtlich, dass sich der Prozentsatz der Vorhersageschätzung auf 75,3 % verbessert hat. Dies entspricht einer Steigerung von 5,8 %. Die

unabhängigen Variablen Feilensystem, periapikaler Index 3 (erweiterter PA-Spalt) bei der Wurzelfüllung und die Länge der Wurzelfüllung haben einen signifikanten Einfluss auf das Endergebnis. 220 Fälle wurden richtig vorhergesagt, 72 dagegen falsch. Damit konnten 17 Patientenfälle besser vorhergesagt werden.

Variablen in der Gleichung

Tabelle 15 SPSS – Output – Regressionskoeffizienten

	Regressions- koeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.
Feilensystem	0,460	0,148	9,725	1	0,002
Erweiterter PA-Spalt bei WF	-0,599	0,134	19,954	1	0,000
Wurzelfülllänge (zu lang)	-0,282	0,143	3,910	1	0,048
Wurzelfülllänge (lege artis)	0,346	0,145	5,705	1	0,017
Konstante	0,960	0,145	43,797	1	0,000

Die Regressionskoeffizienten (B) geben uns einen Hinweis auf die Einflussnahme der jeweiligen Variablen. Da die Werte in der Regressionsfunktion nicht linear eingehen, kann lediglich das Vorzeichen interpretiert werden. Hier wird deutlich, dass das Feilensystem einen positiven Einfluss auf die Erfolgswahrscheinlichkeit hat, wird das Feilensystem 2 genutzt ist die Wahrscheinlichkeit für das Ergebnis „Erfolg“ erhöht. Auch die Länge der Wurzelfüllung hat einen positiven Einfluss. Ist die Wurzelfüllung lege artis gelegt worden, steigt die Wahrscheinlichkeit eine Behandlung erfolgreich abzuschließen. Im Gegenzug wirkt sich die Überstopfung des Wurzelfüllmaterials negativ aus. Auch ein apikaler Befund an der Wurzelspitze zum Zeitpunkt der Wurzelfüllung reduziert die Erfolgswahrscheinlichkeit. Die Regressionskoeffizienten werden für die Berechnung der Erfolgswahrscheinlichkeit bezüglich der Feilensysteme benötigt. Die statistische Absicherung, ob die gewählten unabhängigen Variablen einen signifikanten Einfluss haben oder nicht, erfolgt über den Wald-Test. Die errechneten Signifikanzen liegen alle bei $p < 0,05$.

3.2.4. Modellgüte

Omnibustest der Modellkoeffizienten

Die Ausgabe des Omnibus-Tests bestätigt die Auswahl der unabhängigen Variablen. Er vergleicht anhand des ChiQuadrat-Tests das Nullmodell mit dem Variablenmodell. Die Werte der Signifikanzen liegen $p < 0,001$ und lassen darauf schließen, dass die Wahl der Variablen die Vorhersagekraft signifikant steigern lässt.

Modellübersicht

Anhand der Pseudo-*R*-Quadrat-Werte können Aussagen über die Modellgüte getroffen werden. Die *R*-Quadrat-Werte nehmen Werte zwischen 0 und 1 an. Je höher der Wert liegt, desto besser ist die Passung der Daten mit dem Modell. In der Literatur werden Werte ab 0,2 als akzeptabel beurteilt [79]. Die Werte können nur richtig interpretiert werden, wenn andere Modelle zum Vergleich gegeben sind. Im Modell beträgt das Nagelkerke *R*-Quadrat 0,222. Die Werte waren verglichen zu den anderen Berechnungen mit weiteren Variablen hier am repräsentativsten. Trotzdem ist davon auszugehen, dass es weitere unabhängige Variablen gibt, die Einfluss auf das Ergebnis haben, in dieser Studie aber nicht erhoben wurden.

Hosmer-Lemeshow-Test (Goodness-of-fit Test)

Der Goodness-of-fit Test nimmt einen *p*-Wert von 0,91 an. Dies bedeutet, dass keine signifikante Abweichung der Daten vom Modell vorliegt. Dies bestätigt die Modellanpassung und verdeutlicht, dass die Modellvorhersage und die tatsächlichen Daten korrespondieren.

3.2.5. Formulierung des Regressionsmodells und Berechnung der Erfolgswahrscheinlichkeit

Mit der Formulierung des Regressionsmodells soll erörtert werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein erfolgreiches Ergebnis erreicht wird. Hierbei wurden die Regressionskoeffizienten der Konstante und des Feilensystems aus Tabelle 15 und der standardisierte Wert des jeweiligen Feilensystems genutzt.

Die Regressionsfunktion lautet:

$$1. p(\text{Erfolg}) = \frac{1}{1 + e^{-z(p)}}$$

$$2. z(p) = z_0 + z_{FS} * w(\text{FS})$$

$p(\text{Erfolg})$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Wert 1 (Erfolg) erreicht wird

z_0 = Konstante der Regressionskoeffizienten B

z_{FS} = Regressionskoeffizient B für die Variable Feilensystem

$w(\text{FS})$ = Standardisierter Wert für das jeweilige Feilensystem

$$W_{\text{ProTaper}^\circledast} = -0,95807$$

$$W_{\text{WaveOne}^\text{TM}} = 1,04019$$

Daraus ergibt sich für die Berechnung der Erfolgswahrscheinlichkeit von ProTaper[®] folgende Gleichung:

$$p(\text{Erfolg}) = \frac{1}{1 + e^{-(0,96 + (0,46 * (-0,95807))}}$$

$$p(\text{Erfolg}) = 0,62698122$$

$$p(\text{Erfolg}) = 62,7 \%$$

Für WaveOneTM wurde die Berechnung analog durchgeführt und ergibt folgende Gleichung:

$$p(\text{Erfolg}) = \frac{1}{1 + e^{-(0,96 + (0,46 * (1,04019))}}$$

$$p(\text{Erfolg}) = 0,80822031$$

$$p(\text{Erfolg}) = 80,8 \%$$

Die Erfolgswahrscheinlichkeit von ProTaper[®] ergibt einen Wert von 62,7 %. WaveOneTM liegt bei einer Erfolgswahrscheinlichkeit von 80,8 %. Die Differenz beträgt 18,1 %. Damit sind die Ergebnisse des Einfeilensystems deutlich besser als derer von ProTaper[®].

4. Diskussion

4.1. Bewertung der Ergebnisse

Allgemeine Merkmale

Patientenalter und Geschlechterverteilung

Die Auswertung der Geschlechterverteilung ergab eine annähernd homogene Bemessung und ist verglichen mit anderen Studien ähnlich [80-83]. Die Altersverteilung ist in den vorgegebenen Gruppen von 30 – 75 Jahren vergleichbar bezüglich ProTaper® und WaveOne™. Das Durchschnittsalter ist verglichen mit anderen Untersuchungen verhältnismäßig hoch [80, 81]. Bezogen auf den Erfolg haben das Geschlecht und das Alter des Patienten keinen signifikanten Einfluss auf den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung. Auch andere Studien können dies untermauern [80, 83-85].

Zahnverteilung

Klinische Erfolgsstudien beschränken sich häufig nicht auf einen bestimmten Zahntypus [80, 83, 85-88]. In der vorliegenden Untersuchung wurden nur Molaren betrachtet. Die Zähne wurden als eine Einheit gesehen und analysiert. Einige Untersuchungen teilen die Molaren in ihre einzelnen Wurzeln auf. Das Risiko einen Misserfolg zu dokumentieren, wenn der Zahn als Ganzes gesehen wird, steigt erheblich, da der periapikale Befund der schlechtesten Wurzel die gesamte Behandlung einstuft [89]. Wohingegen durch die Aufteilung in einzelne Wurzeln die Gesamtzahl der untersuchten Fälle multipliziert wird [90]. Die Ergebnisse aus anderen Untersuchungen ergaben kontroverse Bilanzen. Benenati et al. und Peak et al. beschrieben die endodontische Behandlung von Frontzähnen erfolgreicher als die Molarenbehandlung [80, 88]. Bei Benenati et al. konnte ein signifikanter Einfluss ($p < 0,05$) des Zahntypus auf das Behandlungsergebnis analysiert werden [80]. Die Unterkiefermolaren haben tendenziell schlechtere Erfolgsraten [80, 82, 84]. Die Ausdehnung des distalen Kanals in bucco-lingualer Richtung ist im Vergleich zur mesio-distalen Ausrichtung oft größer, während im Oberkiefer die Kanäle eher kreisförmig sind [91]. Somit kann das Risiko für einen Misserfolg durch unzureichende Aufbereitung in bucco-lingualer Dimension

mit folglich inadäquater Füllung steigen [92]. Dies wurde in der vorliegenden Studie bestätigt. Die Behandlung von Unterkiefermolaren zeigte eine höhere Misserfolgsquote als die der Oberkiefermolaren, wenn auch nicht signifikant. Kerekes et al. kam zu dem Ergebnis, dass die Erfolgsraten bei Molaren sogar besser sind im Vergleich zum Frontzahnbereich [86]. Schlussfolgernd ist der Vergleich der Erfolgsbilanzen zu anderen Studien als kritisch zu betrachten. Denn die Wahrscheinlichkeit des Misserfolgs ist bei Molaren schon allein durch die Anzahl der Wurzelkanäle, verglichen mit Frontzähnen gesteigert [88, 93]. Die Erfolgsbilanzen im Molarenbereich sind den Resultaten aus der vorliegenden Studie, bezogen auf die Therapie mit WaveOne™-Feilen, ähnlich [88].

Recallzeitraum

Der Erfolg einer endodontischen Behandlung kann erst nach einiger Zeit festgestellt werden. Der Heilungsprozess dauert einige Zeit und kann zudem zwischen den Wurzeln variieren [94]. Nach abgeschlossener endodontischer Behandlung sind geringe röntgenologische Veränderungen diffizil zu erkennen. Erst nach einer 30 % Mineralisation des Knochens können diese mit bloßem Auge radiologisch erkannt werden [95]. Der durchschnittliche Recallzeitraum dieser Studie liegt bei den ProTaper®-behandelten Zähnen bei 44 Monaten. Der Beobachtungszeitraum für WaveOne™ bei 17 Monaten. Betrachtet man die Werte im Vergleich zu anderen Studien, liegen die Zahlen im Mittelfeld [80, 83, 84, 86, 88]. Studien mit Nichtangaben des Recallzeitraums oder Recallzeiträumen ≥ 6 Monaten liegen auch vor [80, 86, 87, 94]. In Zukunft könnte man den Recallzeitraum vereinheitlichen und alle Patienten nach einem bestimmten Intervall erneut röntgenologisch untersuchen, um diesen Einflussfaktor zu minimieren. Die explorative Statistik ergab jedoch keine signifikante Einflussnahme des Recallzeitraums auf das Endergebnis. Da eine retrospektive klinische Untersuchung durchgeführt wurde, wäre es ethisch nicht vertretbar gewesen, Patienten ein weiteres Mal zu röntgen, um lediglich ein einheitliches Intervall vorliegen zu haben

Vorbehandlung

Welche Vorbehandlung die Zähne vor Trepanation des Zahnes erfuhren, wurde in anderen Studien nicht einheitlich untersucht. Deshalb sind Vergleiche hinsichtlich

dieses Einflussfaktors schwer zu erstellen. In der *in vivo* Studie von Quadros et al. wurde Karies mit 78,8 % mit der Einleitung einer endodontischen Therapie assoziiert. Nur 8,8 % standen im Zusammenhang mit indirekten Restaurationen und 12,4 % der Behandlungsfälle waren einer misslungenen orthograden Wurzelkanalbehandlung geschuldet [96]. In dieser Studie wurden insgesamt 65,7 % der Zähne in Zusammenhang mit einer Kariestherapie endodontisch behandelt. Die *in vivo* Studie von Ridell et al. bestätigt Karies mit 56,4 % als größten Risikofaktor für die Einleitung einer Therapie [97]. Umanah et al. untersuchten in der retrospektiven *in vivo* Analyse die Gründe für die Notwendigkeit einer endodontischen Therapie. Die irreversible Pulpitis ist mit circa 47 % Hauptursache [98]. Dies wird ebenfalls durch andere Studien bestätigt [96, 99]. Auch in der vorliegenden Analyse ist dies mit 62 % (Gesamtzahl) zutreffend. Statistisch hat die Vorbehandlung in dieser Studie keinen signifikanten Einfluss auf das Endergebnis.

Vitalität

Die behandelten Zähne waren bei Einleitung der Wurzelkanalbehandlung überwiegend vital. Bei ProTaper® fielen in diese Kategorie 66 %. Insgesamt 57 % der WaveOne™-behandelten Zähne waren Vitalexstirpationen. Die Testung wurde vor Beginn der Behandlung mit einem Kältespray und Schaumstoffpellet durchgeführt. Ob es sich um eine Restvitalität einzelner Kanäle handelte oder das gesamte Kanalsystem noch vital war, konnte nicht analysiert werden. In der Studie von Barbakow et al. ergab die Unterscheidung in vital versus devital keinen signifikanten Unterschied bezogen auf den Erfolg [84]. Auch Kerekes et al. kamen zu diesem Ergebnis [87]. In der Meta-Analyse von Kojima et al. wurden Vitalexstirpationen signifikant besser eingeordnet in Korrelation zum Erfolg [100]. Der Vitalitätszustand hat in dieser Studie keinen signifikanten Einfluss auf den Erfolg.

Apikale Ausgangssituation

Die apikalen Ausgangssituationen von den behandelten Zähnen stehen in einem umgekehrten Verhältnis zueinander bezüglich der Feilensysteme. Mit WaveOne™ wurden 57 % (n = 80) apikal auffällige Zähne behandelt. Die Datenbank von ProTaper® weist 43 % (n = 65) der Zähne mit periapikaler Destruktion auf. Dabei waren die erweiterten Parodontalspalten bei beiden Ausgangszahlen vorrangig. Zähne mit

periapikalen Aufhellungen, bei welchen die Gefahr der Exazerbation bestand, waren nachrangig. Der Zustand der periapikalen Region hat in der vorliegenden Studie einen signifikanten Einfluss ($p < 0,001$) auf das Endergebnis. Diese Aussage lässt sich auch durch andere wissenschaftliche Arbeiten bestätigen [82, 83, 87, 100]. Ein Faktor für das Versagen der endodontischen Therapie könnten die Mikroorganismen, die sich im periradikulären Gewebe etabliert haben, sein. Diese sind für endodontische Desinfektionsverfahren unzugänglich [101]. Außerdem spielt die Ausdehnung der apikalen Läsion in Bezug auf Ausheilungschancen eine Rolle. Je größer die Läsion, desto geringer ist das Regenerationspotenzial [82, 89]. Die Studie von Peak et al. widerspricht der Aussage von den vorhergenannten Forschungen, hier waren die Behandlungen von Zähnen mit periapikalen Lysen erfolgsversprechender als die apikal unauffälligen [88]. Allerdings lag in diesem Fall das Verhältnis der Zähne 69 % zu 31 %, welches ein Grund für dieses konträre Ergebnis sein könnte. Auch Morse et al. entdeckten, dass devitale Zähne ohne apikaler Lyse mehr Misserfolge aufwiesen, als diejenigen devitalen mit periapikaler Destruktion [102].

Erfolg

Es liegen zahlreiche Untersuchungen zum Thema Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung vor [80, 83, 84, 87, 88, 101]. Dabei reichen die Erfolgsquoten von 31 % - 96 % [76, 83, 87]. Erstere stammen aus einem systematischen Review von 2007, welches 63 Publikationen miteinander verglich. Die erheblichen Unterschiede in der Erfolgsquote können von den differierenden Studiendesigns, klinischen Verfahren, Kriterien für die Bewertung der periapikalen Heilung und der postendodontischen Beobachtungsphase abhängen [83]. Damit ist eine Vergleichbarkeit und standardisierte Auswertung nicht vollständig möglich [76]. Die Erfolgsraten haben sich laut Untersuchung in den letzten Jahrzehnten unwesentlich geändert. In der Endodontologie ist Erfolg nicht klar definiert [103]. In der vorliegenden Untersuchung wurde als Erfolgskriterium die knöcherne Regeneration des periapikalen Gewebes nach Wurzelkanalfüllung gewählt. Die Behandlung gilt auch als erfolgreich, wenn eine Verbesserung des periapikalen Index´ stattfand, sich der Parodontalspalt aber noch nicht in seiner ursprünglichen Breite röntgenologisch darstellte. In der Meta-Analyse von Kojima et al. wurde das Kriterium für Erfolg gleichermaßen definiert [100]. Auch Marending et al. wertete seine Studie binär aus, sodass zwischen Erfolg und Misserfolg unterschieden wurde [104]. Solange eine sichtbare Verkleinerung der periapikalen

Läsion zu verzeichnen und der Patient beschwerdefrei ist, gibt es keinen Anlass die Behandlung als Misserfolg einzustufen [105]. Morse et al. stimmt der Betrachtungsweise des Erfolgs ebenfalls zu [102]. Hier wurden die Zähne unterteilt in die jeweiligen Wurzelkanäle, wodurch eine Erfolgsquote von bis zu 98,1 % erreicht werden konnte. Benenati et al. unterteilt den Erfolg in gelungen (vollständige Regeneration ohne verbreiterten Parodontalspalt), akzeptabel, fraglich und misslungen [80]. Eine andere Studie definiert Erfolg anhand der vollständigen Regeneration ohne Verbreiterung des Parodontalspalts [84]. Bei WaveOne™ liegt eine Erfolgsrate von 80 % vor. ProTaper® erreicht einen Wert von 59,9 %. Dieser ist in Bezug auf andere Untersuchungen deutlich schlechter. Kontrovers ist die zuvor beschriebene erhöhte Versagensrate bei Zähnen mit apikaler Aufhellung zu betrachten, da die ProTaper®-behandelten Zähne tendenziell mehr apikal unauffällig waren. Trotzdem ist die Erfolgsquote geringer als derer von WaveOne™. Ein Grund für das Versagen einer Wurzelkanalbehandlung können die intrakanalären Mikroorganismen sein, die die Ausbildung der periradikulären Lysen begünstigen [101]. Die Chancen, dass ein positives Ergebnis einer Wurzelkanalbehandlung erreicht wird, sind signifikant höher, wenn die Infektion wirksam beseitigt wurde, bevor das System verschlossen wird. Sind während der Wurzelfüllung noch Mikroorganismen im Kanal vorhanden, ist das Risiko eines Misslingens erhöht [105, 106]. Verbleiben lebensfähige Mikroorganismen im Kanalsystem, ist die Gefahr einer persistierenden Aufhellung gegeben [101]. Auch bei unzureichender Wurzelfüllung ist die Gefahr der Reinfektion gesteigert [107]. Es ist nicht auszuschließen, dass es Bakterien gibt, die gegen die chemo-mechanische Reinigung des Kanals resistent sind und somit einen Misserfolg der Behandlung begünstigen. Auch der Verbleib in unzugänglichen Bereichen wie Seitenkanälen, Isthmen, Aufzweigungen, Aussackungen oder Dentintubuli ist als kritisch anzusehen [101]. Studien betrachten häufig alle Zahntypen von Front- bis Molarenbereich, was die Vergleichbarkeit erschwert und wahrscheinlich die Gesamterfolgsrate der Studie verbessert [80, 84, 102]. In Hinblick auf die vorliegende Studie wurden nur Molaren untersucht, welche technisch schwieriger zu behandeln sind. Außerdem wurden einige Untersuchungen mit Endodontologen durchgeführt, die in ihrem Fachbereich spezialisiert sind. Auch die intensive Betreuung in den Studierendenkursen mit einem ausgedehnten Zeitrahmen für jede Behandlung, lassen die Versagensraten möglicherweise sinken. In der vorliegenden Studie haben nicht endodontisch spezialisierte Zahnärzte die Wurzelkanalbehandlungen durchgeführt. Außerdem stehen in der freien Praxis der Zeitaspekt

und die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund, was ein Grund für eventuelle Misserfolge sein könnte, auch wenn die Behandlungen nach aktuellen Standards und gewissenhaft durchgeführt wurden. Betrachtet man die beiden zu untersuchenden Aufbereitungssysteme, muss ein Augenmerk auf die Qualität der Wurzelkanalfüllung in Bezug auf die verhältnismäßig unbefriedigenden Ergebnisse gelegt werden. Jordal et al. erklären, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen einer qualitativ hochwertigen Wurzelfüllung und radiologischen Erfolg besteht [3].

Kanalsituation

Die Kanalsituation ist kein direktes Qualitätsmerkmal, sondern bezieht sich prinzipiell auf den Schwierigkeitsgrad einer Wurzelkanalbehandlung. Sind die Wurzelkanäle stark gekrümmt, ist die Gefahr der Instrumentenfraktur erhöht. Auch können Probleme bei der Formgebung und Reinigung des Kanalsystems entstehen. Durch das zweidimensionale Röntgenverfahren ist die vollständige Beleuchtung der Wurzelanatomie unmöglich und erschwert damit die präendodontische Diagnostik. Krümmungen können im apikalen Bereich, doppelseitig oder den gesamten Kanal betreffen [108]. Die tatsächliche Anzahl der Wurzelkanäle, aber auch die Morphologie der Kanalsysteme kann röntgenologisch nicht festgehalten werden [108]. In der vorliegenden Studie wurden die Krümmungen der Wurzelkanäle, soweit dies die zweidimensionale Röntgendiagnostik zuließ, bestimmt. Dabei wurde die Bestimmung nach Schneider angewandt [78]. Stark gekrümmte Kanäle waren in der Untersuchung nachrangig. Anhand der vorliegenden Röntgenbilder konnten die Wurzelkrümmungen im Wesentlichen eingeordnet werden. Eine genaue Analyse ist dennoch nicht möglich, da die vorhandenen Studien und Berechnungshilfen an extrahierten Zähnen getestet wurden [78, 109, 110]. Weiterhin ist für eine exakte Berechnung der Radius und die Länge der Krümmung von Bedeutung [109]. Krümmungen, die in Richtung des Strahlengangs verlaufen, konnten nicht erfasst werden [77]. Die Anzahl der WaveOne™-behandelten Zähne mit leichter bis normaler Krümmung beläuft sich auf 50 %, wobei die leichte Krümmung (44 %) vorrangig auftrat. Bei ProTaper® Zähnen wiesen 67 % Krümmungen auf, davon 55 % leicht gekrümmt. Dies könnte ein Indiz für die geringere Erfolgsquote sein. Da in der Literatur keine analogen Untersuchungen zu finden sind, ist die Vergleichbarkeit nicht gegeben. Weil die statistische Auswertung keinen signifikanten Einfluss dieses Parameters auf den Erfolg erörtern konnte, ist nicht von einem direkten Zusammenhang auszugehen.

Qualität der Wurzelkanalfüllungen

Kanallänge

Die Länge der Wurzelfüllungen hat laut einigen Studien einen signifikanten Einfluss auf das Endergebnis einer endodontischen Behandlung [83, 84, 88]. In dieser Untersuchung waren 77 % der WaveOne™-Wurzelfüllungen im Bereich von 0 – 2 mm vom Apex entfernt. Was nach den Richtlinien der European Society of Endodontology (ESE) als *lege artis* eingestuft wird [2]. Die mit ProTaper®-instrumentierten Zähne wiesen nur einen prozentualen Anteil von 55 % auf. Massive Überstopfung von mehreren Millimetern kam nur bei einem Zahn der WaveOne™-Gruppe vor. Trotzdem waren weitere 3 % der Füllungen zu lang. ProTaper® wies sogar bei 7 % der Füllungen eine leichte apikale Extrusion des Wurzelfüllmaterials oder Sealers auf. Eine in der Türkei erstellte Studie hat Ergebnisse von 69,6 % erfolgreich gelegter Wurzelfüllungen erlangt [81]. Hier lag der Abstand auch bei 0 – 2 mm vom röntgenologischen Apex. In der Studie wurden jedoch alle Zahntypen untersucht und zeitgleich ein signifikanter Einfluss der Wurzelkrümmung in Zusammenhang mit einer zu kurzen Wurzelfüllung erörtert. In der Studie von Barbarkow et al. wurden 56,7 % der Wurzelfüllungen in dem Bereich von 0 – 2 mm gelegt [111]. Kerekes et al. beschrieben Werte von 75 % - 97 % bei einer erzielten Distanz von 0 – 1 mm vom Apex [87]. Die Variationen kommen durch unterschiedliche Voraussetzungen je nach Zustand des Zahnes zustande. Auffällig in der ProTaper®-Gruppe ist die im Vergleich zu WaveOne™ verhältnismäßig große Anzahl von 39 % an zu kurzen (> 2 mm Abstand vom Apex) Wurzelfüllungen. WaveOne™-behandelte Zähne hatten zu 19 % zu kurze Füllungen, was verglichen mit anderen Untersuchungen ein gutes Ergebnis ist. In einer Studie von Kerekes et al., in welcher Studentenfüllungen mit derer von nicht spezialisierten Zahnärzten verglichen wurden, waren 25 % > 1 mm, bei den Zahnärzten 49 % > 3 mm und nochmal 23 % zwischen 1 – 3 mm vom Apex entfernt [86]. Ist die Wurzelfüllung in einem zu großen Abstand zum röntgenologischen Apex, wurde höchstwahrscheinlich auch die Instrumentierung nur bis zu diesem Punkt durchgeführt, was eine Kolonisation und Proliferation von infiziertem Pulpagewebe ermöglicht [88]. Sjørgen et al. und weitere Untersuchungen bestätigen die Aussage, dass eine Wurzelfüllung mit einem Abstand von bis zu 2 mm mit einer höheren Erfolgsrate assoziiert ist [82-84, 88, 100]. Ricucci et al. berichtet, dass bei vitalen Zähnen die optimale Länge 1 – 2 mm vor Apex sei [82]. Nekrotische Zähne sollten Wurzelfüllungen in einem Abstand von 0,5 – 1,5 mm

erhalten. Betrachtet man die Ergebnisse der vorliegenden Studie mit den soeben beschriebenen, wurde ein Konsens erreicht. Die Werte sind ähnlich der anderen Untersuchungen. Auch in dieser Studie beeinflusst die Wurzelfülllänge die Erfolgsquote signifikant ($p < 0,05$). Jedoch wurde hier nicht die zu kurze Wurzelfüllung als signifikanter Einfluss erörtert. Die überstopften Wurzelfüllungen ergaben einen signifikanten Wert, mit negativem Einfluss auf das Endergebnis. Gleichzeitig ergab der Wert einer lege artis gelegten Füllung einen signifikant positiven Einfluss auf das Ergebnis. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Erreichen der richtigen Wurzellänge auch wahrscheinlicher einen Erfolg nach sich zieht.

Die Menge an falschdimensionierten Füllungen könnte auch an der Betrachtung der Röntgenbilder liegen. Liang et al. eruierten einen signifikanten Unterschied in der Beurteilung von Wurzelfüllungen bezüglich der Länge [112]. Ausschlaggebend war die Auswertung durch zweidimensionale Röntgenbilder verglichen mit der dreidimensionalen Volumentomographie (DVT). Erschienen die Wurzelfüllungen in der konventionellen Röntgentechnik als lege artis, waren einige in der dreidimensionalen Aufnahme überfüllt. Lediglich 20 % der konventionell eingeschätzten zu kurzen Füllungen, konnten durch das DVT bestätigt werden. Ein Grund für die vermeintliche Fehleinschätzung ist die schlechte Sichtbarkeit der röntgenologischen Apices im zweidimensionalen Bild. Möglicherweise wäre die Einführung der dreidimensionalen Technik für weitere Studien von Interesse.

Laut Sjörgen et al. und Lin et al. hat die Überstopfung des Materials keinen Einfluss auf den Ausgang der Behandlung [106, 113]. Auch weitere Untersuchungen fanden keinen negativen Effekt [84, 102]. Jedoch sollte trotzdem auf die Vermeidung dieser geachtet werden, da Komplikationen wie Übertritt des infizierten Materials oder ein Wiederaufflammen von Schmerzen eintreten können [101]. Häufig ist die Abdichtung in überfüllten Wurzelkanälen unzureichend, wodurch ein Zuwachs der restlichen Bakterien durch einfließende Gewebeflüssigkeit gegeben ist. Damit kann eine Verschiebung der Bakterien nach apikal stattfinden und weitere Entzündungsprozesse initialisieren. Vielfach setzt die Überstopfung des Wurzelfüllmaterials eine Überinstrumentierung der Feilen während der Aufbereitung voraus. Dadurch gelangen infiziertes Material und Dentinspäne in die periapikale Region und induzieren gleichermaßen Inflammationen [101]. Die Überstopfung von Debris geht mit einer Beeinträchtigung der apikalen Regeneration einher [114, 115]. Auch das Übertreten von Wurzelfüllmaterial steht in Zusammenhang mit dieser Aussage. Wie bereits in der Einleitung

beschrieben stellt die Extrusion der Wurzelfüllmaterialien bei der Thermafiltechnik ein Hindernis in der Anwendung dar [42-44]. Waren es in der ProTaper®-Gruppe noch 7 %, wurde die Anzahl der extendierten Wurzelfüllungen bei WaveOne™ auf 4 % reduziert. Dies kann unter Umständen an der Lernkurve der Behandler im Laufe der Anwendung dieser Technik liegen. Aber auch die minimale Kürzung an der apikalen Seite des Stiftes erklärt die relativ geringen Zahlen. In Anbetracht der geringeren Erfolgsquote der ProTaper®-behandelten Zähne im Vergleich zu WaveOne™, ist die Länge der Wurzelfüllung von entscheidender Bedeutung. Gründe für die unterdimensionierten Füllungen können vielfach sein. Zum einen konnten in einer Studie von Tang et al. die Faktoren Kalzifizierung und Wurzelkrümmung als signifikante Einflüsse auf die Wurzelfülllänge beschrieben werden [116]. Je gekrümmter ein Kanal, umso schwieriger ist es die richtige Arbeitslänge zu erreichen. Der prozentuale Anteil an gekrümmten Wurzelkanälen liegt bei den ProTaper®-Zähnen bei 67 %, WaveOne™-Zähne sind zu 51 % gekrümmt. Hier könnte eine Ursache für die Differenzen liegen. Außerdem wurde bei obliterierten und kalzifizierten Kanälen, welche häufiger bei älteren Patienten auftreten, in geringerer Anzahl die gewünschte Arbeitslänge erreicht [116]. In unserer Studie wurde die Kalzifizierung anhand der Röntgenbilder nicht untersucht, dies könnte aber auch hier einen Einfluss darstellen. Das Durchschnittsalter der behandelten Patienten lag bei 52 – 55 Jahre, wobei bei beiden Systemen über 35 % der Patienten älter als 60 Jahre sind. Auch die Messungen mit den elektronischen Längenbestimmungsgeräten RayPex4 und RayPex5 können Fehlerquellen enthalten und das Ergebnis der Wurzelfülllänge beeinflussen. Auch wenn in Studien [117, 118] die Verwendung von Apexlokatoren als verlässlich nachgewiesen wurde, sind diese nicht unfehlbar. Folglich spielen bei der Bestimmung der Wurzellänge einige Umstände eine Rolle und jeder Zahn ist individuell anzusehen mit unterschiedlichsten Voraussetzungen und Gegebenheiten.

Homogenität

Ziel ist es eine randständige Wurzelfüllung zu erreichen, um eventuell verbliebenden Bakterien keine Überlebenschancen zu bieten. Ist dies nicht gegeben, ist das Risiko eines Versickerns der restlichen Gewebeflüssigkeiten und damit Substraten für die Bakterien gegeben. Wenn diese Bakterien eine gewisse Anzahl überschreiten, ist ein durchdringen in den periapikalen Bereich und folglich eine Reinfektion des Systems diffizil aufzuhalten [101, 119]. In der vorliegenden Studie waren 42 % der ProTaper®-

Zähne homogen und wandständig gefüllt. In der Gruppe der WaveOne™-Zähne wurden 56 % adäquat gefüllt. Es wurden weitere drei Kategorien bestimmt. Dabei wiesen bei ProTaper® 57 % leichte Inhomogenitäten bzw. Randunständigkeiten auf. Inhomogen und Apikal verdichtet wurde nicht analysiert, jedoch bei 1% erschien die Wurzelfüllung röntgenologisch inhomogen und apikal undicht. In der WaveOne® Gruppe ist die Kategorie leicht inhomogen bzw. randunständig mit 43 % vertreten, die anderen Kategorien gleichen sich mit der ProTaper®-Gruppe. Die Unterschiede in der Verteilung der beiden Gruppen sind signifikant ($p < 0,05$). Die Gruppe der WaveOne™-Zähne zeigt in diesem Qualitätsmerkmal bessere Ergebnisse auf. Andere Studien unterteilen die Homogenität lediglich in inadäquat und adäquat. Was aufgrund der 1 % Abweichung von einer Gruppe auch hier zusammenzufassen wäre. Bei Eskandarloo et al. waren 67,7 % der Molaren adäquat gefüllt [120]. Er et al. konnten eine Homogenität bei 47,9 % der Oberkiefermolaren und 49,1 % bei Unterkiefermolaren erörtern [81]. Die Werte der WaveOne™-behandelten Zähnen sind den in der Literatur beschriebenen Ergebnissen ähnlich. Stoll et al. beschreiben in ihrer retrospektiven Studie die Homogenität der Wurzelfüllung mit einem signifikanten Einfluss auf die Erfolgsquote [121]. Bei dem Faktor der Homogenität muss die eingeschränkte Beurteilung aufgrund von zweidimensionalen Aufnahmen hervorgehoben werden. Die Bewertung der Wurzelfüllungen ist lediglich in mesio-distaler Richtung praktikabel, bucco-oral kann keine repräsentative Aussage getroffen werden. Auch hier wäre eine dreidimensionale Aufnahme notwendig, um exaktere Aussagen treffen zu können. Liang et al. konnten in ihrer Studie erhebliche Unterschiede in der Diagnostik der Homogenitäten darstellen [112]. Trotzdem ist auch bei anderen Untersuchungen die konventionelle Röntgenaufnahme fortwährend Mittel der Wahl. Die Studien, die sich mit der Erfolgsquote von endodontischen Behandlungen befassten, nutzten zum Großteil laterale Kondensation als Methodik zur Wurzelfüllung. In der vorliegenden Arbeit wurde die Thermafil-Technik angewandt. Die Thermafilobturatoren zeigen die Abdichtung betreffend, ähnliche [122, 123] oder sogar bessere [37] Werte gegenüber der lateralen Kondensationstechnik mittels Guttapercha. Auch eine besonders hohe Abtötung von negativen Bakterienkulturen, durch Nutzung der erwärmten Guttapercha wird in der aktuellen Literatur beschrieben [124]. Auch in der retrospektiven *in vivo* Analyse von Pirani et al. wurden mit dieser Wurzelfülltechnik im Vergleich zur konventionellen lateralen Kondensation analoge Erfolgsquoten analysiert [125].

Kanalverlauf

Der Kanalverlauf als solches wird in den meisten Studien nicht berücksichtigt. Einige Studien vergleichen allenfalls die Konizität der Wurzelkanalfüllung [81, 126]. Unterschieden wird dort in adäquat und inadäquat, ob die Aufbereitung von koronal nach apikal ohne Aberrationen kontinuierlich verläuft. Untergruppen wie sie in der vorliegenden Studie vorkommen, sind nicht beschrieben. Die Ergebnisse der Studie geben jedoch auch markante Werte wieder. In der ProTaper®-Gruppe sind 95 % (n = 144) der Zähne kontinuierlich und konisch aufbereitet, wobei der Kanalverlauf beibehalten wurde. Die WaveOne™-Gruppe zeigt mit einem Prozentsatz von 98,6 % (n = 138) sogar noch bessere Werte auf. Perforationen und Instrumentenbrüche sind mit nur 1 % bei beiden Gruppen nachrangig. In der Studie von Barrieshi-Nusair et al. erreichten 85,3 % der Kanäle einen guten Verlauf [126]. Er et al. beschrieben dagegen nur 68,3 % mit adäquaten Taper [81]. Bei beiden Untersuchungen waren die Ergebnisse bei gekrümmten Kanälen und auch bei Molaren minder. Dies widerspricht sich mit den vorliegenden Ergebnissen. Es wurden nur Molaren untersucht, und man würde eine Negativverschiebung der Ergebnisse erwarten. In den in der Literatur beschriebenen Analysen, in welchen der Taper ein Untersuchungskriterium darstellte, waren Studenten der Zahnmedizin die Behandler. Das richtige Handling bei einer endodontischen Behandlung ist ein Entwicklungsprozess und korreliert mit der Erfahrung des Behandlers, besonders der Umgang mit maschinellen Nickel-Titan-Instrumenten [127, 128]. Zudem wurden die Aufbereitungen mittels konventioneller Handinstrumentierung durchgeführt. Diverse Studien beschreiben eine kontinuierlichere Konizität bei der Aufbereitung mittels maschinelltem Verfahren [128, 129]. In der Studie von Musale et al. zeigen 96,7 % der ProTaper®-behandelten Kanäle einen intakten Taper auf, die handinstrumentierten Kanäle nur 85 % [129]. Dies gleicht sich mit den vorher beschriebenen Werten und erklärt die Differenzen. *In vivo* Studien zu der Konizität von aufbereiteten Kanälen mithilfe von maschinellen Systemen sind nicht in der Literatur beschrieben.

In diesem Zusammenhang sollte auch die Präparationsgröße der Kanäle in Bezug auf das Eindringen der Spülflüssigkeit bis ins apikale Drittel diskutiert werden. Bei der Betrachtung der Röntgenbilder fiel auf, dass die Aufbereitung der ProTaper®-behandelten Zähne – rein subjektiv betrachtet – schmaler dargestellt wurde. In den Daten der Analyse konnte nicht immer die Masterfeile evaluiert werden. Es ist aber davon auszugehen, dass die letzte Feile bei der Aufbereitung häufig die

F1-Feile aus dem Portfolio der ProTaper®-Reihe war. Die apikale ISO-Größe der Feile ist #20. Eine Studie von Khademi et al. beschreibt eine minimale Aufbereitungsgröße von ISO #30, um eine maximale Reinigungseffektivität durch Spülflüssigkeit zu erreichen [130]. Damit steigt die Reduktion des Smear Layers und der Bakterien erheblich. Yared et al. wiesen nach, dass es zwischen ISO-Größen #25 und #40 keine signifikanten Unterschiede in der Penetration der Spülflüssigkeit gäbe [131]. Albrecht et al. untersuchten zusätzlich zu der ISO-Größe den Taper der Feile und kamen zu dem Ergebnis, dass bei einer ISO-Größe von #20 und einem Taper von mindestens 0.08 keine signifikanten Unterschiede in der Penetrationstiefe der Spüllösungen im Vergleich zu #40 auftreten [132]. Vielleicht wäre eine größere Aufbereitung der Zähne mit einer höheren Erfolgswahrscheinlichkeit einhergehend. Dies könnte in weiteren Studien mitberücksichtigt werden.

4.2. Ordinale logistische Regressionsanalyse

Die lineare logistische Regressionsanalyse wird in einigen Studien verwendet [93, 104], um Zusammenhänge zwischen einer abhängigen binären Variablen und weiteren unabhängigen Variablen darzustellen. In dieser Studie wurde der Erfolg dichotom kodiert. Unterschieden wurde in Erfolg und Misserfolg. Die unabhängigen Variablen wurden zunächst alle in die Analyse einbezogen. Das Modell mit den besten Werten wurde nach Prüfung der Modellgüte gewählt. Ergebnis der Analyse ist der signifikante Einfluss der Variablen präendodontischer PAI, Wurzelfülllänge und Feilensystem. In der Studie von Kirkevang et al. wurde der präendodontische PAI auch als ein signifikanter Faktor für den Erfolg erörtert [93]. Bereits eine geringe Destruktion der apikalen Region in Form eines apikal erweiterten PA-Spalts hat einen negativen Einfluss auf das Ergebnis. Auch die Wurzelfülllänge wies einen signifikanten Einfluss auf. Anders als in der vorliegenden Studie waren die Faktoren Homogenität, Zahntyp und Kiefer ebenfalls ausschlaggebende Faktoren. Marending et al. beschrieben die Faktoren Qualität der Wurzelfüllung (Homogenität und Länge der Wurzelfüllung) und PAI als signifikante Variable [104]. Interessant ist hier den signifikanten Einfluss des Immunstatus der Patienten zu erwähnen. Eine andere Studie von Azim et al. kann keinen signifikanten Einfluss durch das Immunsystem feststellen [133]. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie sind in einigen Punkten konsensuell zu anderen Autoren.

Bemerkenswert ist der Zusammenhang des signifikanten Einflusses von dem Feilensystem zum Erfolg der Behandlung zu sehen. Nach aktuellem Wissensstand sind zu diesem Aspekt klinische *in vivo* Studien bisher nicht durchgeführt worden. Die Feilensysteme ProTaper® und WaveOne™ wurden hinsichtlich ihrer Qualität in der Aufbereitung hinreichend untersucht. In der vorliegenden Qualitätsanalyse fielen die Werte der ProTaper®-behandelten Zähne ähnlich der anderen Gruppen aus. Trotzdem hat die Wahl des Mehrfeilensystems eine geringere Erfolgswahrscheinlichkeit, als das Einfeilensystem. Dies kann zum einen am größeren Anteil der zu kurzen Wurzelfüllungen liegen. Zum anderen müssen weitere Faktoren, welche sich auf die allgemeine Erfolgswahrscheinlichkeit beider Systeme bezieht, eine Rolle spielen. Diese wurden in dieser Studie nicht näher untersucht. Diskutabel ist der Faktor Behandlererfahrung mit rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten. So kann es sein, dass die Behandler im Laufe der Jahre eine bessere Arbeitsqualität im Umgang mit der maschinellen Aufbereitungsmethode erlernt haben. Aber auch der Aspekt der schmaleren Aufbereitung bei den ProTaper®-Zähnen sollte nicht außer Acht gelassen werden. Weiterhin spielt womöglich die Patientencompliance bezogen auf die Mitarbeit während der Behandlung, wie Mundöffnung, Schluckreflex oder eingeschränkte Lagerung des Patienten eine Rolle. Besonders im Hinblick auf die Altersstruktur der behandelten Patienten. Das Immunsystem des Patienten scheint vielleicht auch für die Ausheilung periapikaler Destruktionen relevant zu sein. Eventuell spielt auch der Behandler selbst eine große Rolle. Dies konnte in der vorliegenden Studie aufgrund der unterschiedlichen Fallzahlen und der Schwierigkeit in der Auswertung nicht weiter berücksichtigt werden. Trotz gegebenenfalls anderer Variablen kann eindeutig festgestellt werden, dass die Behandlung mit WaveOne™-Feilen ein vielversprechenderes Ergebnis vorhersagt als die Behandlung mit dem Mehrfeilensystem. In der Einleitung wurden hinreichend vergleichende Parameter zwischen WaveOne™ und ProTaper® aufgezeigt. Beide Systeme zeigen hinsichtlich einiger Faktoren wie extrudiertes Debris, Microcracks oder Reinigungseffizienz vergleichbare Ergebnisse. Hervorgehoben wird in der Literatur wiederkehrend die verkürzte Behandlungsdauer, welche in Bezug auf den zahnärztlichen Praxisalltag von immenser Bedeutung ist [45-47].

4.3. Vergleich zu anderen Studien

Wie bereits in der Einleitung erwähnt wurde, gibt es für die vorliegende Studie wenige vergleichbare Untersuchungen. Allerdings wurde in einigen Studien, unabhängig vom Aufbereitungssystem, Qualität und Erfolg von Wurzelkanalbehandlungen evaluiert. Es wurden ähnliche Kriterien angewandt [80, 134, 135]. *In vivo* Untersuchungen zum Thema ProTaper® und WaveOne™ beschränken sich auf die postendodontischen Beschwerden der Patienten [64, 65, 136]. Die Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen ist demnach nur in Teilgebieten möglich [85].

4.4. Limitationen der Studie

Patienten

Die Anzahl der untersuchten Patientenfälle beläuft sich auf 292. Diese ist verglichen mit anderen Studien, bezogen auf die Untersuchung des Erfolgs teilweise geringer [80, 87, 134]. Allerdings sind die Studiendesigns sehr abweichend. In der Analyse von Kerekes et al. wurden 333 Patienten untersucht. Allerdings ist diese Untersuchung bereits 1971 erstellt worden und damit nicht mehr aktuell. Durch die Wahl eines größeren Patientenguts, könnten eventuell weitere signifikante Unterschiede in den verschiedenen Variablen festgestellt werden [80]. Wenn man die Daten in den einzelnen Gruppen weiter kategorisiert, wären die Studienpopulationen für eine statistische Auswertung zu gering.

Röntgen

Die Wertung der Qualität und des Erfolges der Wurzelkanalbehandlungen erfolgte ausschließlich durch Röntgenaufnahmen. Für die Auswertung der endodontologischen Behandlungen bedienen sich auch andere Untersuchungen ausschließlich der Nutzung von Röntgenunterlagen [80, 120, 137]. Die Analyse der Bilder erfolgte von einem Betrachter, welcher zum Teil auch Behandler war. Um die Objektivität zu unterstreichen, wurden 10 % der Patientenfälle durch einen unabhängigen Betrachter ein weiteres Mal ausgewertet. Die Anfertigung der Röntgenbilder erfolgte durch verschiedene zahnmedizinische Fachangestellte. In der Praxis wird konventionell in der Paralleltechnik geröntgt. Anatomie, Befinden der Patienten, aber auch die Fertigkeiten

der Angestellten können das Röntgenergebnis bezüglich der Qualität beeinflussen. Neben Einzelbildern wurden für die Auswertung zum Teil auch Orthopantogramme genutzt. Die Untersuchungen von Muhammed et al. und Molander et al. machen deutlich, dass Orthopantogramme auch für die Untersuchung apikaler Regionen geeignet sind, wobei der Frontzahnbereich ausgeschlossen werden muss [138, 139]. Studien an extrahierten Zähnen sind betreffend ihrer Qualitätsbeurteilung valider einzuschätzen. Die angefertigten 2D-Röntgenbilder sind in ihrer Aussagekraft limitierend [140]. So kann es insbesondere im Oberkiefer durch die individuelle Anatomie (zum Beispiel flacher Gaumen) zu Verzerrungen und Überlagerungen kommen, die die genaue Auswertung der Bilder einschränkt [140]. Um korrektere Aussagen über die periapikale Region und Anatomie des Kanalsystems treffen zu können, wäre die Anwendung eines DVTs möglich [140, 141]. Auch in dem Review von Wu et al. wird die Gefahr der Fehleinschätzung insbesondere der periapikalen Lysen durch Nutzung des 2D-Röntgenverfahrens hervorgehoben [142]. Schlussfolgernd können auch bei der Bestimmung von Krümmungsgraden des Kanals und Bestimmung der Längen Diskrepanzen auftreten. Trotzdem ist die radiologische Darstellung die einzige Methode, um die Qualität der Wurzelfüllung in der klinischen Situation zu beurteilen [92]. Um die Ergebnisse besser auswertbar zu gestalten, hätte man im Rahmen einer prospektiven Studie für jeden Patienten eine Bissnahme in Kombination mit einem Röntgenhalter herstellen können. So wären die Positionen des Röntgenkegels und des Röntgenhalters beim Recall reproduzierbarer und damit besser vergleichbar [95]. Da die Studie retrospektiv durchgeführt wurde, ist dies nur ein Vorschlag für weitere Untersuchungen.

Schlussfolgerung

Änderungen im Studiendesign könnten eventuell weitere und verlässlichere Aussagen nach sich ziehen. Prospektive klinische Studien sollten durchgeführt werden, um interessante Variablen von Beginn an erheben zu können. Individuelle Röntgenhalter, festgelegte Recallzeiträume, sowie die Beschränkung auf einen Behandler würde das Ergebnis unter Umständen nochmals etwas verändern. Mit dem vorliegenden Studiendesign werden in der Literatur beschriebene Ergebnisse in zahlreichen Aspekten bestätigt. Aufgrund der demographischen Entwicklung werden in Zukunft vermehrt Patienten mit Bedarf an endodontischer Behandlung in der Praxis therapiert werden [143]. Dafür sollten die wissenschaftlichen Grundlagen bezüglich der Feilensysteme

weiter untersucht werden, um effektiv arbeiten zu können. Außerdem sollte das Ziel stets eine qualitativ hochwertige Behandlung sein. Die maschinellen Systeme haben sich in den letzten Jahren gut in der universitären Ausbildung etabliert. Vor Anwendung dieser Verfahren sollten angebotene Fortbildungsmaßnahmen zielführend wahrgenommen werden. Die durchgeführte Studie zeigt auf, dass besonders die Erfolgsquoten in der nichtspezialisierten Zahnarztpraxis verbesserungswürdig sind. Deshalb wären besonders klinische Studien mit einheitlichen Studiendesigns für die Zukunft von großer Bedeutung. Hervorzuheben ist nochmals die Variable des periapikalen Index, welcher negativen Einfluss auf die Erfolgswahrscheinlichkeit ausübt. Diese Gegebenheit ist durch den Behandler nicht beeinflussbar und sollte demzufolge in der Beratung des Patienten eine Rolle spielen. Gemeinsam mit dem Patienten sollte über den Versuch des Zahnerhalts diskutiert und mögliche Alternativen besprochen werden. Die Variable der Wurzelfülllänge kann aktiv durch den Behandler beeinflusst werden. Womöglich sollte, den ESE-Richtlinien entsprechend, zu der rein endometrischen Längenbestimmung eine zusätzliche röntgenologische Messaufnahme erstellt werden. Dies minimiert das Risiko der Fehlbestimmung. Weiterhin ist eine größere Aufbereitung des Wurzelkanals, soweit dies die Kanalanatomie zulässt, zu überlegen. Damit würde die Penetration der Spüllösungen, wie in Studien bewiesen, verbessert werden. Auch die Nutzung verschiedener Spüllösungen könnte einen weiteren Therapieansatz darstellen, wobei der Effekt *in vivo* noch nicht nachgewiesen werden konnte [144, 145]. Weiterhin wurde in dem systematischen Review von Mozo et al. der positive Effekt der passiven ultraschallaktivierten Spülung auf die Reinigungseffizienz hervorgehoben [146]. Vielleicht würden diese Änderungen die Erfolgswahrscheinlichkeiten noch einmal erheblich erhöhen. So wäre das reziproke Einfeilensystem nahezu uneingeschränkt empfehlenswert. Inzwischen sind von den beiden untersuchten Systemen Weiterentwicklungen erhältlich. WaveOne™ Gold wirbt mit einer höheren Flexibilität und weiteren ISO-Größen.

In Hinblick auf die Arbeitshypothesen der Untersuchung kann die Empfehlung gegeben werden, dass Einfeilensysteme bei besserer Qualität mit einer höheren Erfolgswahrscheinlichkeit einhergehen. WaveOne™ ist dem Mehrfeilensystem ProTaper® vorzuziehen. Die Hypothesen wurden demzufolge widerlegt.

Fazit für die Praxis

Nach aktuellem wissenschaftlichem Stand sind die reziproken Einfeilensysteme den vollrotierenden Mehrfeilensystemen gleichgestellt. Aus den Recherchen und eigenen Untersuchungen ergeben sich einige Vorteile, die die Nutzung in der Praxis und Universitäten attraktiv machen. Speziell die Faktoren der enorm verkürzten Arbeitszeit [45, 47] und Nutzung als Einmalprodukt ohne aufwendige Sterilisationsverfahren heben das Produkt hervor. Auch die verminderten Kosten im Vergleich zum Mehrfeilensystem sind von Vorteil. Durch die reziproke Feilenbewegung ist das Frakturrisiko minimiert. Die leichte Erlernbarkeit macht die Technik auch für Universitäten interessant.

5. Literaturverzeichnis

1. Orstavik D; Kerekes K; Eriksen HM. The periapical index: a scoring system for radiographic assessment of apical periodontitis. *Endodontics & dental traumatology*. 1986;2(1):20-34.
2. European Society of E. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *International endodontic journal*. 2006;39(12):921-30.
3. Jordal K; Valen A; Ørstavik D. Periapical status of root-filled teeth in Norwegian children and adolescents. *Acta Odontologica Scandinavica*. 2014;72(8):801-5.
4. Bürklein S; Schäfer E. Single-File-Systeme zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. *wissen kompakt*. 2013;7(2):13-26.
5. Hülsmann M; Historische Entwicklung der Endodontie; Endodontie: 20 Tabellen; Stuttgart; 2008: 7-9
6. Walia H; Brantley WA; Gerstein H. An initial investigation of the bending and torsional properties of nitinol root canal files. *Journal of endodontics*. 1988;14(7):346-51.
7. Hülsmann M; Wurzelkanalpräparation; Endodontie: 20 Tabellen; Stuttgart; 2008: 122-46
8. Baumann MA; Beer R; Konventionelle Instrumente; Farbatlant der Zahnmedizin Endodontologie; Stuttgart: Wolf, H.; 2008: 76-7
9. Hellwig E; Klimek J; Attin T; Methoden der manuellen Wurzelkanalaufbereitung; Einführung in die Zahnerhaltung : Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie; Köln; 2009: 386-94
10. Roane JB; Sabala CL; Duncanson MG. The "balanced force" concept for instrumentation of curved canals. *Journal of endodontics*. 1985;11(5):203-11.
11. Baumann M. WaveOne—First experiences of third-year students. *Roots*. 2012;2:20-3.
12. Canoglu H; Tekcicek MU; Cehreli ZC. Comparison of conventional, rotary, and ultrasonic preparation, different final irrigation regimens, and 2 sealers in primary molar root canal therapy. *Pediatric dentistry*. 2006;28(6):518-23.
13. Baumann MA; Beer R; Maschinelle Aufbereitungssysteme; Farbatlant der Zahnmedizin Endodontologie; Stuttgart: Wolf, H.; 2008: 139-46
14. Bergmans L; Van Cleynenbreugel J; Wevers M; Lambrechts P. Mechanical root canal preparation with NiTi rotary instruments: rationale, performance and safety. Status report for the American Journal of Dentistry. *American journal of dentistry*. 2001;14(5):324-33.
15. Thompson S. An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *Int Endod J*. 2000;33: 297-310.
16. Andreasen GF; Morrow RE. Laboratory and clinical analyses of nitinol wire. *American journal of orthodontics*. 1978;73(2):142-51.
17. Baumann MA; Beer R; Kristallgitter von Nickel-Titan und Stahl; Farbatlant der Zahnmedizin Endodontologie; Stuttgart: Wolf, H; 2007: 147-9

18. Schäfer E; Metallurgie und Eigenschaften von Nickel-Titan-Instrumenten; Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten; Berlin: Hülsmann, M; 2002: 35-46
19. Baumann MA; Beer R; Nickel-Titan: Werkstoffkunde; Farbatlanten der Zahnmedizin Endodontologie; Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2008: 78-83
20. Hülsmann M; Peters OA; Dummer PMH. Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics*. 2005;10(1):30-76.
21. Hellwig E; Klimek J; Attin T; Maschinelle Nickel-Titan-Systeme; Einführung in die Zahnerhaltung : Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie; Köln; 2009: 379-81
22. Schäfer E; Fritzenschaft B. Vergleichende Untersuchung zweier permanentrotierender Wurzelkanalaufbereitungssysteme auf Nickel-Titan-Basis. *Endodontie 8 Quintessenz Verlag*. 1999 Nr.3:213.
23. Schäfer E; Oitzinger M. Cutting Efficiency of Five Different Types of Rotary Nickel–Titanium Instruments. *Journal of endodontics*. 2008;34(2):198-200.
24. Hülsmann M; Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten-eine vorläufige Bilanz Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten; Berlin; 2002: 11-34
25. Sonntag D. Schneidengeometrie und Effizienz voll rotierender Nickel-Titan-Feilen. *Endodontie 12 Quintessenz Verlag*. 2003 Nr.3:229-42.
26. Sonntag D; Heithecker K. Korrosion von Nickel-Titan-Instrumenten *Endodontie 15 Quintessenz Verlag*. 2006:23-30.
27. Lee D-H; Park B; Saxena A; Serene TP. Enhanced surface hardness by boron implantation in nitinol alloy. *Journal of endodontics*. 1996;22(10):543-6.
28. Rapisarda E; Bonaccorso A; Tripi TR; Fragalk I; Condorelli GG. The effect of surface treatments of nickel-titanium files on wear and cutting efficiency. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2000;89(3):363-8.
29. Schäfer E. Effect of Physical Vapor Deposition on Cutting Efficiency of Nickel-Titanium Files. *Journal of endodontics*. 2002;28(12):800-2.
30. Gambarini G; Grande NM; Plotino G; Somma F; Garala M; De Luca M; Testarelli L. Fatigue Resistance of Engine-driven Rotary Nickel-Titanium Instruments Produced by New Manufacturing Methods. *Journal of endodontics*. 2008;34(8):1003-5.
31. Bürklein S; Hinschitza K; Dammaschke T; Schäfer E. Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. *International endodontic journal*. 2012;45(5):449-61.
32. Ye J; Gao Y. Metallurgical Characterization of M-Wire Nickel-Titanium Shape Memory Alloy Used for Endodontic Rotary Instruments during Low-cycle Fatigue. *Journal of endodontics*. 2012;38(1):105-7.
33. Maillefer D. Gebrauchsanleitung (ProTaper® Universal Treatment) 2006 [Accessed 2017 02.03.2017]. Available from: http://dentsplymea.com/sites/default/files/ProTaper_Universal_Treatment_DFU_1.pdf.

34. Maillefer D. Gebrauchsanleitung WaveOne™ Instrumente 2010 [Accessed 2017 3.2.2017]. 1-2]. Available from: <http://www.dentsplymailefer.com/wp-content/uploads/2016/10/Dentsply-Maillefer-WAVEONE-FILE-0115-DFU-DE.pdf>.
35. Kim H-C; Kwak S-W; Cheung GS-P; Ko D-H; Chung S-M; Lee W. Cyclic Fatigue and Torsional Resistance of Two New Nickel-Titanium Instruments Used in Reciprocation Motion: Reciproc Versus WaveOne. *Journal of endodontics*. 2012;38(4):541-4.
36. Varela-Patiño P; Ibañez-Párraga A; Rivas-Mundiña B; Cantatore G; Otero XL; Martín-Biedma B. Alternating versus Continuous Rotation: A Comparative Study of the Effect on Instrument Life. *Journal of endodontics*. 2010;36(1):157-9.
37. Jindal D; Sharma M; Raisingani D; Swarnkar A; Pant M; Mathur R. Volumetric analysis of root filling with cold lateral compaction, Obtura II, Thermafil, and Calamus using spiral computerized tomography: An in vitro Study. *Indian Journal of Dental Research*. 2017;28(2):175-80.
38. von Schroeter C. Wurzelkanalobturation mit der Thermafiltechnik–eine Übersicht. *Endodontie*. 2009;18(2):119-30.
39. Dummer PMH; Lyle L; Rawle J; Kennedy JK. A laboratory study of root fillings in teeth obturated by lateral condensation of gutta-percha or Thermafil obturators. *International endodontic journal*. 1994;27(1):32-8.
40. Gençoğlu N. Comparison of 6 different gutta-percha techniques (part II): Thermafil, JS Quick-Fill, Soft Core, Microseal, System B, and lateral condensation. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2003;96(1):91-5.
41. Nevares G; de Albuquerque DS; Bueno CE; Cunha RS. Is guttacore more easily removed from the root canal than thermafil? An ex-vivo study. *Journal (Canadian Dental Association)*. 2015;81:f22.
42. Gutmann JL; Saunders WP; Saunders EM; Nguyen L. An assessment of the plastic Thermafil obturation technique. *International endodontic journal*. 1993;26(3):173-8.
43. Da Silva D; Endal U; Reynaud A; Portenier I; Orstavik D; Haapasalo M. A comparative study of lateral condensation, heat-softened gutta-percha, and a modified master cone heat-softened backfilling technique. *International endodontic journal*. 2002;35(12):1005-11.
44. Schäfer E; Olthoff G. Effect of Three Different Sealers on the Sealing Ability of Both Thermafil Obturators and Cold Laterally Compacted Gutta-Percha. *Journal of endodontics*. 2002;28(9):638-42.
45. Troiano G; Dioguardi M; Cocco A; Giannatempo G; Laino L; Ciavarella D; Berutti E; Lo Muzio L. Influence of Operator's Experience on the Shaping Ability of Protaper Universal and Waveone Systems: A Comparative Study on Simulated Root Canals. *The open dentistry journal*. 2016;10:546-52.
46. Zhao D; Shen Y; Peng B; Haapasalo M. Root canal preparation of mandibular molars with 3 nickel-titanium rotary instruments: a micro-computed tomographic study. *Journal of endodontics*. 2014;40(11):1860-4.
47. Bartols A; Laux G; Walther W. Multiple-file vs. single-file endodontics in dental practice: a study in routine care. *PeerJ*. 2016;4:e2765.

48. Ehsani M; Farhang R; Harandi A; Tavanafar S; Raof M; Galledar S. Comparison of Apical Extrusion of Debris by Using Single-File, Full-Sequence Rotary and Reciprocating Systems. *Journal of dentistry (Tehran, Iran)*. 2016;13(6):394-9.
49. Bier CAS; Shemesh H; Tanomaru-Filho M; Wesselink PR; Wu M-K. The Ability of Different Nickel-Titanium Rotary Instruments To Induce Dentinal Damage During Canal Preparation. *Journal of endodontics*. 2009;35(2):236-8.
50. Bürklein S; Tsotsis P; Schäfer E. Incidence of Dentinal Defects after Root Canal Preparation: Reciprocating versus Rotary Instrumentation. *Journal of endodontics*. 2013;39(4):501-4.
51. Ashwinkumar V; Krithikadatta J; Surendran S; Velmurugan N. Effect of reciprocating file motion on microcrack formation in root canals: an SEM study. *International endodontic journal*. 2014;47(7):622-7.
52. Kansal R; Rajput A; Talwar S; Roongta R; Verma M. Assessment of dentinal damage during canal preparation using reciprocating and rotary files. *Journal of endodontics*. 2014;40(9):1443-6.
53. Wei X; Hu B; Peng H; Tang M; Song J. The incidence of dentinal cracks during root canal preparations with reciprocating single-file and rotary-file systems: A meta-analysis. *Dental materials journal*. 2017;36(3):243-52.
54. Li SH; Lu Y; Song D; Zhou X; Zheng QH; Gao Y; Huang DM. Occurrence of Dentinal Microcracks in Severely Curved Root Canals with ProTaper Universal, WaveOne, and ProTaper Next File Systems. *Journal of endodontics*. 2015;41(11):1875-9.
55. Cicek E; Kocak MM; Saglam BC; Kocak S. Evaluation of microcrack formation in root canals after instrumentation with different NiTi rotary file systems: a scanning electron microscopy study. *Scanning*. 2015;37(1):49-53.
56. Karatas E; Gunduz HA; Kirici DO; Arslan H; Topcu MC; Yeter KY. Dentinal crack formation during root canal preparations by the twisted file adaptive, ProTaper Next, ProTaper Universal, and WaveOne instruments. *Journal of endodontics*. 2015;41(2):261-4.
57. Rödiger T. Einfluss der Wurzelkanalpräparation auf die apikale Extrusion von Debris und Spülflüssigkeiten *Quintessenz Endodontie*. 2013;22(1):81-8.
58. Cicek E; Akkocan O; Furuncuoglu F. Comparison of apically extruded debris associated with several nickel-titanium systems after determining working length by apex locator. *Journal of conservative dentistry : JCD*. 2016;19(1):68-71.
59. Silva EJ; Carapia MF; Lopes RM; Belladonna FG. Comparison of apically extruded debris after large apical preparations by full-sequence rotary and single-file reciprocating systems. 2016;49(7):700-5.
60. Bürklein S; Schafer E. Apically extruded debris with reciprocating single-file and full-sequence rotary instrumentation systems. *Journal of endodontics*. 2012;38(6):850-2.
61. Surakanti JR; Venkata RC; Vemisetty HK; Dandolu RK; Jaya NK; Thota S. Comparative evaluation of apically extruded debris during root canal preparation using ProTaper, Hyflex and Waveone rotary systems. *Journal of conservative dentistry : JCD*. 2014;17(2):129-32.

62. Singh A; Arunagiri D; Pushpa S; Sawhny A; Misra A; Khetan K. Apical extrusion of debris and irrigants using ProTaper hand, M-two rotary and WaveOne single file reciprocating system: An ex vivo study. *Journal of conservative dentistry : JCD*. 2015;18(5):405-8.
63. Delvarani A; Mohammadzadeh Akhlaghi N; Aminirad R; Tour Savadkouhi S; Vahdati SA. In vitro Comparison of Apical Debris Extrusion Using Rotary and Reciprocating Systems in Severely Curved Root Canals. *Iranian endodontic journal*. 2017;12(1):34-7.
64. Krithikadatta J; Sekar V; Sudharsan P; Velumurugan N. Influence of three Ni-Ti cleaning and shaping files on postinstrumentation endodontic pain: A triple-blinded, randomized, controlled trial. *Journal of conservative dentistry : JCD*. 2016;19(4):311-6.
65. Pasqualini D; Corbella S; Alovisei M; Taschieri S; Del Fabbro M; Migliaretti G; Carpegna GC; Scotti N; Berutti E. Postoperative quality of life following single-visit root canal treatment performed by rotary or reciprocating instrumentation: a randomized clinical trial. *International endodontic journal*. 2016;49(11):1030-9.
66. Martinho FC; Gomes AP; Fernandes AM; Ferreira NS; Endo MS; Freitas LF; Camoes IC. Clinical comparison of the effectiveness of single-file reciprocating systems and rotary systems for removal of endotoxins and cultivable bacteria from primarily infected root canals. *Journal of endodontics*. 2014;40(5):625-9.
67. Marinho AC; Martinho FC; Goncalves LM; Rabang HR; Gomes BP. Does the Reciproc file remove root canal bacteria and endotoxins as effectively as multifile rotary systems? *International endodontic journal*. 2015;48(6):542-8.
68. Dahlhoff A. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung zur Aufbereitungsqualität von Wurzelkanälen nach Instrumentierung mit reziproken und vollrotierenden Wurzelkanalinstrumenten. Marburg: Philipps-Universität Marburg; 2014.
69. Jain A; Asrani H; Singhal AC; Bhatia TK; Sharma V; Jaiswal P. Comparative evaluation of canal transportation, centering ability, and remaining dentin thickness between WaveOne and ProTaper rotary by using cone beam computed tomography: An in vitro study. *Journal of conservative dentistry : JCD*. 2016;19(5):440-4.
70. Goldberg M; Dahan S; Machtou P. Centering Ability and Influence of Experience When Using WaveOne Single-File Technique in Simulated Canals. *International journal of dentistry*. 2012;2012:206321.
71. Herrmann HW. „Greater Taper“-Aufbereitung mit rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten bei höheren apikalen Durchmesser. *ZWR*. 2010;119(04):184-90.
72. Al-Hadlaq SM; Aljarbou FA; AlThumairy RI. Evaluation of cyclic flexural fatigue of M-wire nickel-titanium rotary instruments. *Journal of endodontics*. 2010;36(2):305-7.
73. da Frota MF; Espir CG; Berbert FL; Marques AA; Sponchiado-Junior EC; Tanomaru-Filho M; Garcia LF; Bonetti-Filho I. Comparison of cyclic fatigue and torsional resistance in reciprocating single-file systems and continuous rotary instrumentation systems. *Journal of oral science*. 2014;56(4):269-75.

74. Pedulla E; Grande NM; Plotino G; Gambarini G; Rapisarda E. Influence of continuous or reciprocating motion on cyclic fatigue resistance of 4 different nickel-titanium rotary instruments. *Journal of endodontics*. 2013;39(2):258-61.
75. Kwak SW; Cheung GS; Ha JH; Kim SK; Lee H; Kim HC. Preference of undergraduate students after first experience on nickel-titanium endodontic instruments. 2016;41(3):176-81.
76. Ng YL; Mann V; Rahbaran S; Lewsey J; Gulabivala K. Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature – Part 1. Effects of study characteristics on probability of success. *International endodontic journal*. 2007;40(12):921-39.
77. Hülsmann M; Schäfer E. Probleme bei der Wurzelkanalpräparation. *Der Freie Zahnarzt*. 2013;57(1):54-62.
78. Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1971;32(2):271-5.
79. Rohrlack C; *Logistische und Ordinale Regression; Methodik der empirischen Forschung*; Wiesbaden: Gabler; 2007: 199-214
80. Benenati FW; Khajotia SS. A Radiographic Recall Evaluation of 894 Endodontic Cases Treated in a Dental School Setting. *Journal of endodontics*. 2002;28(5):391-5.
81. Er O; Sagsen B; Maden M; Cinar S; Kahraman Y. Radiographic technical quality of root fillings performed by dental students in Turkey. *International endodontic journal*. 2006;39(11):867-72.
82. Ricucci D; Russo J; Rutberg M; Burleson JA; Spångberg LSW. A prospective cohort study of endodontic treatments of 1,369 root canals: results after 5 years. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2011;112(6):825-42.
83. Sjögren U; Hägglund B; Sundqvist G; Wing K. Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. *Journal of endodontics*. 1990;16(10):498-504.
84. Barbakow FH; Cleaton-Jones P; Friedman D. An evaluation of 566 cases of root canal therapy in general dental practice 2. Postoperative observations. *Journal of endodontics*. 1980;6(3):485-9.
85. Hoskinson SE; Ng Y-L; Hoskinson AE; Moles DR; Gulabivala K. A retrospective comparison of outcome of root canal treatment using two different protocols. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2002;93(6):705-15.
86. Kerekes K. Radiographic assessment of an endodontic treatment method. *Journal of endodontics*. 1978;4(7):210-3.
87. Kerekes K; Tronstad L. Long-term results of endodontic treatment performed with a standardized technique. *Journal of endodontics*. 1979;5(3):83-90.
88. Peak JD; Hayes SJ; Bryant ST; Dummer PM. The outcome of root canal treatment. A retrospective study within the armed forces (Royal Air Force). *British dental journal*. 2001;190(3):140-4.
89. Friedman S; Löst C; Zarrabian M; Trope M. Evaluation of success and failure after endodontic therapy using a glass ionomer cement sealer. *Journal of endodontics*. 1995;21(7):384-90.

90. Friedman S. Prognosis of initial endodontic therapy. *Endodontic Topics*. 2002;2(1):59-88.
91. Wheeler RC; Pulp cavities of the permanent teeth: an anatomical guide to manipulative endodontics; 1976:
92. Hörsted-Bindslev P; Andersen MA; Jensen MF; Nilsson JH; Wenzel A. Quality of Molar Root Canal Fillings Performed With the Lateral Compaction and the Single-Cone Technique. *Journal of endodontics*. 2007;33(4):468-71.
93. Kirkevang LL; Ørstavik D; Bahrami G; Wenzel A; Væth M. Prediction of periapical status and tooth extraction. *International endodontic journal*. 2015.
94. Ørstavik D; Qvist V; Stoltze K. A multivariate analysis of the outcome of endodontic treatment. *European Journal of Oral Sciences*. 2004;112(3):224-30.
95. Pettiette MT; Olutayo Delano E; Trope M. Evaluation of Success Rate of Endodontic Treatment Performed by Students with Stainless-Steel K-Files and Nickel-Titanium Hand Files. *Journal of endodontics*. 2001;27(2):124-7.
96. De Quadros I; Gomes BP; Zaia AA; Ferraz CC; Souza-Filho FJ. Evaluation of endodontic treatments performed by students in a Brazilian Dental School. *Journal of dental education*. 2005;69(10):1161-70.
97. Ridell K; Sundin B; Matsson L. Endodontic treatment during childhood and adolescence. A survey of 19-year-olds living in the city of Malmo, Sweden. *Swedish dental journal*. 2003;27(2):83-9.
98. Umanah A; Osagbemi B; Arigbede A. Pattern of demand for endodontic treatment by adult patients in port-harcourt, South-South Nigeria. *Journal of the West African College of Surgeons*. 2012;2(3):12-23.
99. Scavo R; Martinez Lalis R; Zmener O; Dipietro S; Grana D; Pameijer CH. Frequency and distribution of teeth requiring endodontic therapy in an Argentine population attending a specialty clinic in endodontics. *International dental journal*. 2011;61(5):257-60.
100. Kojima K; Inamoto K; Nagamatsu K; Hara A; Nakata K; Morita I; Nakagaki H; Nakamura H. Success rate of endodontic treatment of teeth with vital and nonvital pulps. A meta-analysis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2004;97(1):95-9.
101. Siqueira J. Aetiology of root canal treatment failure: why well-treated teeth can fail. *International endodontic journal*. 2001;34(1):1-10.
102. Morse DR; Esposito JV; Pike C; Furst ML. A radiographic evaluation of the periapical status of teeth treated by the gutta-percha-eucapercha endodontic method: A one-year follow-up study of 458 root canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1983;56(2):190-7.
103. Seltzer S; Bender IB; Smith J; Freedman I; Nazimov H. Endodontic failures—An analysis based on clinical, roentgenographic, and histologic findings. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1967;23(4):500-16.
104. Marending M; Peters OA; Zehnder M. Factors affecting the outcome of orthograde root canal therapy in a general dentistry hospital practice. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2005;99(1):119-24.

105. Byström A; Happonen RP; Sjögren U; Sundqvist G. Healing of periapical lesions of pulpless teeth after endodontic treatment with controlled asepsis. *Dental Traumatology*. 1987;3(2):58-63.
106. SjÖGren U; Figdor D; Persson S; Sundqvist G. Influence of infection at the time of root filling on the outcome of endodontic treatment of teeth with apical periodontitis. *International endodontic journal*. 1997;30(5):297-306.
107. Saunders WP; Saunders EM. Coronal leakage as a cause of failure in root-canal therapy: a review. *Dental Traumatology*. 1994;10(3):105-8.
108. Vertucci FJ. Root canal morphology and its relationship to endodontic procedures. *Endodontic Topics*. 2005;10(1):3-29.
109. Schafer E; Diez C; Hoppe W; Tepel J. Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth. *Journal of endodontics*. 2002;28(3):211-6.
110. Sadeghi S; Poryousef V. A novel approach in assessment of root canal curvature. *Iranian endodontic journal*. 2009;4(4):131-4.
111. Barbakow FH; Cleaton- Jones P; Friedman D. An evaluation of 566 cases of root canal therapy in general dental practice. 1. Diagnostic criteria and treatment details. *Journal of endodontics*. 1980;6(2):456-60.
112. Liang Y-H; Li G; Wesselink PR; Wu M-K. Endodontic Outcome Predictors Identified with Periapical Radiographs and Cone-beam Computed Tomography Scans. *Journal of endodontics*. 2011;37(3):326-31.
113. Lin LM; Skribner JE; Gaengler P. Factors associated with endodontic treatment failures. *Journal of endodontics*. 1992;18(12):625-7.
114. Yusuf H. The significance of the presence of foreign material periapically as a cause of failure of root treatment. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1982;54(5):566-74.
115. Holland R; De Souza V; Nery MJ; de Mello W; Bernabé PFE; Filho JAO. Tissue reactions following apical plugging of the root canal with infected dentin chips. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1980;49(4):366-9.
116. Tang L; Sun T-q; Gao X-j; Zhou X-d; Huang D-m. Tooth anatomy risk factors influencing root canal working length accessibility. *International Journal of Oral Science*. 2011;3(3):135-40.
117. ElAyouti A; Kimionis I; Chu AL; Löst C. Determining the apical terminus of root-end resected teeth using three modern apex locators: a comparative ex vivo study. *International endodontic journal*. 2005;38(11):827-33.
118. Gordon MPJ; Chandler NP. Electronic apex locators. *International endodontic journal*. 2004;37(7):425-37.
119. Sundqvist G; Figdor D; Persson S; Sjögren U. Microbiologic analysis of teeth with failed endodontic treatment and the outcome of conservative re-treatment. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 1998;85(1):86-93.
120. Eskandarloo A; Karkehabadi H; Hoseini Hashemi SZ; Ahmadi M; Hendi SS. Radiographic Quality of Root Canal Obturation Performed By Fifth Year Students of Hamadan Dental School. *Iranian endodontic journal*. 2017;12(2):236-41.

121. Stoll R; Betke K; Stachniss V. The Influence of Different Factors on the Survival of Root Canal Fillings: A 10-Year Retrospective Study. *Journal of endodontics*. 2005;31(11):783-90.
122. Dumani A; Yilmaz S; Yoldas O; Kuden C. Evaluation of various filling techniques in distal canals of mandibular molars instrumented with different single-file nickel-titanium systems. *Nigerian journal of clinical practice*. 2017;20(3):307-12.
123. Kandemir Demirci G; Caliskan MK. A Prospective Randomized Comparative Study of Cold Lateral Condensation Versus Core/Gutta-percha in Teeth with Periapical Lesions. *Journal of endodontics*. 2016;42(2):206-10.
124. Tennert C; Schurig T; Al-Ahmad A; Strobel SL; Kielbassa AM; Wrbas KT. Antimicrobial influence of different root canal filling techniques in experimentally infected human root canals. *Quintessence international (Berlin, Germany : 1985)*. 2017;48(4):273-80.
125. Pirani C; Friedman S; Gatto MR; Iacono F; Tinarelli V; Gandolfi MG; Prati C. Survival and periapical health after root canal treatment with carrier-based root fillings: five-year retrospective assessment. *International endodontic journal*. 2017.
126. Barrieshi-Nusair KM; Al-Omari MA; Al-Hiyasat AS. Radiographic technical quality of root canal treatment performed by dental students at the Dental Teaching Center in Jordan. *Journal of Dentistry*. 2004;32(4):301-7.
127. Peters OA. Current Challenges and Concepts in the Preparation of Root Canal Systems: A Review. *Journal of endodontics*. 2004;30(8):559-67.
128. Alrahabi M. Comparative study of root-canal shaping with stainless steel and rotary NiTi files performed by preclinical dental students. *Technology and health care : official journal of the European Society for Engineering and Medicine*. 2015;23(3):257-65.
129. Musale PK; Mujawar SAV. Evaluation of the efficacy of rotary vs. hand files in root canal preparation of primary teeth in vitro using CBCT. *European Archives of Paediatric Dentistry*. 2014;15(2):113-20.
130. Khademi A; Yazdizadeh M; Feizianfard M. Determination of the Minimum Instrumentation Size for Penetration of Irrigants to the Apical Third of Root Canal Systems. *Journal of endodontics*. 2006;32(5):417-20.
131. Yared GM; Bou Dagher FE. Influence of apical enlargement on bacterial infection during treatment of apical periodontitis. *Journal of endodontics*. 1994;20(11):535-7.
132. Albrecht LJ; Baumgartner JC; Marshall JG. Evaluation of Apical Debris Removal Using Various Sizes and Tapers of ProFile GT Files. *Journal of endodontics*. 2004;30(6):425-8.
133. Azim AA; Griggs JA; Huang GTJ. The Tennessee study: factors affecting treatment outcome and healing time following nonsurgical root canal treatment. *International endodontic journal*. 2016;49(1):6-16.
134. Imura N; Pinheiro ET; Gomes BPFA; Zaia AA; Ferraz CCR; Souza-Filho FJ. The Outcome of Endodontic Treatment: A Retrospective Study of 2000 Cases Performed by a Specialist. *Journal of endodontics*. 2007;33(11):1278-82.

135. Alley BS; Gray Kitchens G; Alley LW; Eleazer PD. A comparison of survival of teeth following endodontic treatment performed by general dentists or by specialists. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2004;98(1):115-8.
136. Farzaneh S; Parirokh M; Nakhaee N; Abbott PV. Effect of two different concentrations of sodium hypochlorite on postoperative pain following single-visit root canal treatment: a triple-blind randomized clinical trial. *International endodontic journal*. 2017.
137. Boucher Y; Matossian L; Rilliard F; Machtou P. Radiographic evaluation of the prevalence and technical quality of root canal treatment in a French subpopulation. *International endodontic journal*. 2002;35(3):229-38.
138. Muhammed AH; Manson-Hing LR. A comparison of panoramic and intraoral radiographic surveys in evaluating a dental clinic population. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1982;54(1):108-17.
139. Molander B; Ahlqwist M; Gröndahl HG; Hollender L. Comparison of panoramic and intraoral radiography for the diagnosis of caries and periapical pathology. *Dentomaxillofacial Radiology*. 1993;22(1):28-32.
140. Lofthag-Hansen S; Huumonen S; Gröndahl K; Gröndahl H-G. Limited cone-beam CT and intraoral radiography for the diagnosis of periapical pathology. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2007;103(1):114-9.
141. Kersten H; Wesselink P; Thoden van Velzen S. The diagnostic reliability of the buccal radiograph after root canal filling. *International endodontic journal*. 1987;20(1):20-4.
142. Wu MK; Shemesh H; Wesselink P. Limitations of previously published systematic reviews evaluating the outcome of endodontic treatment. *International endodontic journal*. 2009;42(8):656-66.
143. Schütte U; Walter M; Zahnverlust und Zahnersatz vor dem Hintergrund des demographischen Wandels; Prävention: Springer; 2006: 575-94
144. Hertel M; Sommer K; Kostka E; Imiolczyk SM; Ballout H; Preissner S. Outcomes of Endodontic Therapy Comparing Conventional Sodium Hypochlorite Irrigation with Passive Ultrasonic Irrigation Using Sodium Hypochlorite and Ethylenediaminetetraacetate. A Retrospective Analysis. *The open dentistry journal*. 2016;10:375-81.
145. Fedorowicz Z; Nasser M; Sequeira-Byron P; de Souza RF; Carter B; Heft M. Irrigants for non-surgical root canal treatment in mature permanent teeth. *The Cochrane database of systematic reviews*. 2012(9):CD008948.
146. Mozo S; Llana C; Forner L. Review of ultrasonic irrigation in endodontics: increasing action of irrigating solutions. *Medicina oral, patologia oral y cirugía bucal*. 2012;17(3):e512-6.

6. Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Lisa Andrä, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Retrospektive Vergleichende Analyse des Erfolgs von Wurzelkanalbehandlungen mit Mehrfeilensystemen und Einfeilensystemen“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit der Betreuerin, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

7. Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

8. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt zunächst meiner Betreuerin PD Dr. Saskia Preissner. Vielen Dank für die intensive Betreuung und die ständige Motivation. Durch die gute Zusammenarbeit war es erst möglich, ein solches Projekt durchführen zu können. Weiterhin danke ich der Zahnarztpraxis, die mir alle Unterlagen und Geräte, die für die Erstellung der Ergebnisse notwendig waren, zur Verfügung gestellt hat. Meinem Zweitbetreuer Dr. Daniel Pagel möchte ich für die gute Zusammenarbeit danken. Er stand mir jederzeit mit guten Ratschlägen zur Seite. Vielen Dank auch an Jean Claude Granval und Dr. Andrean Goede die mir die Nutzung von Excel und SPSS näher gelegt haben. Meinen Freunden und meiner Familie danke ich für die motivierenden Worte.