

Aus der Klinik und Poliklinik für Zahnerhaltung, Parodontologie, Endodontologie,  
Kinderzahnheilkunde und Präventive Zahnheilkunde  
(Direktor: Prof. Dr. Thomas Kocher)  
der Universitätsmedizin der Universität Greifswald

**Bewertung des Dentinabtrages durch die Wurzelkanalpräparation  
mit drei verschiedenen Nickel-Titan-Aufbereitungssystemen.**

**Eine Mikro-Computertomographie-Studie.**

Inaugural - Dissertation

zur

Erlangung des akademischen

Grades

Doktor der Zahnmedizin

(Dr. med. dent.)

der

Universitätsmedizin

der

Universität Greifswald

2020

vorgelegt von:

Anne Lorenz

geb. am: 30.05.1986

in: Pirna

Aus der Abteilung für Endodontologie

Dekan: Prof. Dr. med Karlhans Endlich

1. Gutachter: Prof. Dr. Thomas Kocher

2. Gutachter: Prof. Dr. Sebastian Bürklein

Ort, Raum: Greifswald, W.- Rathenau- Str. 42a, Hörsaal Zahnklinik

Tag der Disputation: 12.01.2021

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielstellung .....	1
2. Literaturübersicht .....	3
2.1. Anatomische Grundlagen .....	3
2.1.1. Anatomie des Wurzelkanalsystems unterer Molaren .....	3
2.1.2. Berücksichtigung der Furkation in der Endodontie .....	6
2.2. Wurzelkanalaufbereitung .....	9
2.3. Nickel-Titan-Instrumente.....	10
2.3.1. ProTaper Next® .....	12
2.3.2. F6 SkyTaper® .....	14
2.3.3. WaveOne® .....	15
2.4. Mikro-Computertomographie.....	17
2.4.1. Technische Grundlagen der Mikro-Computertomographie .....	17
2.4.2. Bedeutung der Mikro-Computertomographie in der Endodontie.....	17
3. Material und Methoden .....	19
3.1. Vorbereitung der Proben .....	19
3.2. Wurzelkanalaufbereitung.....	20
3.2.1. Aufbereitung mit ProTaper Next®.....	22
3.2.2. Aufbereitung mit F6 SkyTaper®.....	22
3.2.3. Aufbereitung mit WaveOne®.....	22
3.3. Mikro- Computertomographie.....	23
3.4. Visualisierungssoftware Amira 5.6.....	24
3.4.1. Vermessung des Dentinabtrages im Wurzelkanalsystem .....	24
3.4.2. Vermessung des Dentinabtrages an der Furkation .....	26
3.5. Statistische Auswertung.....	27
4. Ergebnisse .....	29
4.1. Dentinabtrag in allen Wurzelkanälen.....	29
4.1.1. Vergleich der Feilensysteme .....	30
4.1.2. Vergleich der Messrichtungen.....	32
4.2. Dentinabtrag in mesialen und distalen Wurzelkanälen.....	32
4.3. Dentinabtrag in distalen Wurzelkanälen.....	35
4.3.1. Vergleich der Feilensysteme .....	36
4.3.2. Vergleich der Messrichtungen.....	37
4.4. Dentinabtrag in mesialen Wurzelkanälen .....	41
4.4.1. Vergleich der Feilensysteme .....	42
4.4.2. Vergleich der Messrichtungen.....	43
4.5. Dentinabtrag an der Furkation .....	47

4.5.1. Vergleich der Feilensysteme .....	48
4.5.2. Vergleich der Messrichtungen.....	49
4.5.3. Vergleich der Messrichtungen je Slice .....	52
5. Diskussion .....	57
5.1. Diskussion der Methode.....	57
5.2. Diskussion der Ergebnisse.....	60
5.2.1. Dentinabtrag in den Wurzelkanälen .....	60
5.2.2. Dentinabtrag an der Furkation.....	66
5.3. Schlussfolgerungen.....	70
6. Zusammenfassung .....	71
7. Literaturverzeichnis.....	73
8. Anhang .....	86
9. Eigenständigkeitserklärung .....	93

## Abkürzungsverzeichnis

B	- Regressionskoeffizienten
ca.	- circa
cm <sup>3</sup>	- Kubikzentimeter
dicom	- Digital Imaging and Communications in Medicine
engl.	- englisch
ISO	- International Organization for Standardization
K-Feile	- Kerrfeile
KHN	- KNOOP Hardness Number
KI	- Konfidenzintervall
kV	- Kilovolt
Max	- Maximum
Mikro-CT	- Mikro-Computertomographie
Min	- Minimum
min	- Minute
ml	- Milliliter
mm	- Millimeter
Ncm	- Newton Zentimeter
Ni	- Nickel
NiTi	- Nickel-Titan
NiTiNOL	- Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory
p	- Signifikanz
rpm	- rotations per minute
sec	- Sekunde
VH	- Vickershärte

W	- Watt
2-D	- Zweidimensional
3-D	- Dreidimensional
$\mu\text{A}$	- Mikroampere

## 1. Einleitung und Zielstellung

Vor dem Hintergrund des Wunsches nach dem Erhalt der eigenen Zähne wächst die Bedeutung der Endodontie innerhalb der Zahnmedizin stetig. Eine der großen Herausforderungen endodontischer Behandlungen ist dabei die Instrumentierung und Formgebung der Wurzelkanäle mit entsprechenden Aufbereitungsinstrumenten. Moderne Behandlungsmöglichkeiten wie beispielsweise flexiblere Instrumente, veränderte Instrumentenformen und -materialien oder maschinelle Feilensysteme können die Wurzelkanalbehandlung beschleunigen und erleichtern. Seit der Einführung von Nickel-Titan-Instrumenten in der Endodontie wurden diverse Aufbereitungssysteme entwickelt, die sich in ihrer Metallurgie, Feilenquerschnitt, Gestaltung der Schneiden, Spanräume, Schneidenanzahl und weiteren Aspekten, unterscheiden. All diese Eigenschaften haben Einfluss auf das Verhalten der Instrumente während der mechanischen Präparation der Wurzelkanäle. Keine Feile kann alle Anforderungen erfüllen, da der Vorteil einer Eigenschaft oft einen Nachteil in einem anderen Punkt bedeutet. Ein wichtiger Aspekt jedes Feilensystems ist das Verhalten im Hinblick auf den Dentinabtrag an der Wurzelkanalwand. Einerseits soll so viel infiziertes Wurzelkanaldentin wie möglich durch die mechanische Bearbeitung mit der Feile von der Wurzelkanalwand entfernt werden, andererseits muss ausreichend Restdentin erhalten bleiben, um die Stabilität des Zahnes nicht zu gefährden. Durch maschinelle endodontische Instrumente oder aggressive Obturationstechniken kann es zu mikroskopischen Dentinfrakturen im Sinne von „microcracks“ oder „craze lines“ kommen, die letztendlich zur Wurzelfraktur führen können.

Die überwiegende Mehrzahl der Nickel-Titan-Instrumente arbeitet vollrotierend oder reziprok. Unter anderem stehen Ein-Feilen-Systeme zur Verfügung, die unter den praktisch tätigen Zahnärzten gern und häufig genutzt werden. Die Hersteller dieser Systeme stellen eine adäquate Wurzelkanalpräparation mit lediglich einer Feile in Aussicht, was die Handhabung vereinfacht und den Zeitaufwand verringert. Während einer endodontischen Behandlung besteht die Gefahr der Perforation durch Instrumentation beispielsweise im Bereich der „danger zone“. Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der vollrotierenden Nickel-Titan-Systeme ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA), F6 SkyTaper® (Komet, Brasseler GmbH, Lemgo, Deutschland) und dem reziproken System WaveOne® (Dentsply Sirona, York, USA). Die etablierten und gut untersuchten Feilensysteme ProTaper Next® und WaveOne® sollen mit dem noch wenig untersuchten und neu auf dem Dentalmarkt erschienenen Feilensystem F6 SkyTaper® hinsichtlich ihrer Fähigkeit, Dentin von der Wurzelkanalwand abzutragen, verglichen werden. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf den Dentinabtrag im Bereich der Furkation

beziehungsweise der „danger zone“ gelegt. Die Restdentinstärke spielt hierbei eine wichtige Rolle, der in dieser Untersuchung Rechnung getragen werden soll. In der vorliegenden Arbeit soll folgende Hypothese überprüft werden: „Das Ein-Feilen-System F6 SkyTaper® (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Deutschland) weist signifikante Unterschiede bezüglich des Dentinabtrages im Vergleich zu den Feilensystemen ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA) sowie WaveOne® (Dentsply Sirona, York, USA) auf.“



## **2. Literaturübersicht**

### **2.1. Anatomische Grundlagen**

#### **2.1.1. Anatomie des Wurzelkanalsystems unterer Molaren**

Die Form des Wurzelkanalsystems stellt die vereinfachte und verkleinerte Zahnform dar (Hess, 1917; Euler, 1934). In der Regel sind erste Unterkiefermolaren zweiwurzlig (siehe Abbildung 2.1) mit jeweils einer mesialen und einer distalen Wurzel (Hess, 1917; Stock et al., 2005). Selten kann eine dritte distolinguale Wurzel aufgefunden werden (Parthasarathy et al., 2011). Diese als Radix entomolaris bezeichnete Makrostruktur wurde erstmals 1844 von Carabelli beschrieben (Carabelli, 1844) und tritt zu 3-5% auf (Parthasarathy et al., 2011). In der mongolischen Population liegt die Prävalenz bei über 30% (Parthasarathy et al., 2011). Seltener als die Radix entomolaris kann eine zusätzliche bukkale Wurzel, die sogenannte Radix paramolaris, mit einer Prävalenz von 1,5-3% beobachtet werden (Carlsen & Alexandersen, 1991; Parthasarathy et al., 2011). Skidmore & Bjorndal (1971) wiesen in der mesialen Wurzel des ersten Unterkiefermolaren meist zwei (93,3 %) selten einen Wurzelkanal (6,7 %) nach. Ein dritter, zwischen mesiolingualem und mesiobukkalem befindlicher Wurzelkanal – auch als „middle mesial“ bezeichnet, tritt mit einer Prävalenzrate von 1 bis 15% auf (Baugh & Wallace, 2004).

Zu 79% haben der mesiobukkale und der mesiolinguale Wurzelkanal die gleiche Länge. In 21% der Fälle ist der mesiobukkale Wurzelkanal um durchschnittlich 0,75 mm länger als der mesiolinguale Wurzelkanal (Cunningham & Senia, 1992). Die durchschnittliche Länge der mesialen Wurzelkanäle beträgt 21,56 mm (Sauáia et al., 2010). Sie sind oft durch feine Isthmen miteinander verbunden (Hess, 1917; Baumann & Beer, 2008; Hülsmann & Tulus, 2010). Bei jüngeren Patienten stellt sich dieser Isthmus sehr weit dar. Im Laufe des Lebens wird er durch die Ausbildung sklerotischen Dentins (Arnold, 2017) immer enger (Pineda & Kuttler 1972), bis der mesiobukkale und der mesiolinguale Wurzelkanal schließlich getrennt verlaufen (Hülsmann & Tulus, 2010). Im Bereich ehemaliger Isthmen können noch bestehende Verbindungen zwischen den Wurzelkanälen oder auch apikale Verschmelzungen, beispielsweise in Form von konfluierenden Wurzelkanälen, auftreten (Furri, 2008). Schon Hess (1917) zeigte, dass das Wurzelkanalsystem unterer Molaren einer enormen anatomischen Komplexität unterliegt. Er beschrieb unter anderem netzartige oder C-förmige Kanalstrukturen sowie akzessorische Kanäle und multiple Foramina (Hess, 1917).

Selten ist der Wurzelkanal rund. Häufig treten ovale, schlitz- oder nierenförmige Kanalformen auf. Davis et al. (1972) untersuchten extrahierte menschliche Zähne, davon 86 Molaren.

Sie konnten laterale Seitenkanäle innerhalb aller Wurzeln nachweisen. Das Wurzelkanalsystem der Molaren zeigte akzessorische Kanäle, die sich vom Pulpenkammerboden bis zum Furkationsbereich zogen. Außerdem wiesen alle untersuchten Zähne flossenartige Ausbuchtungen, webartige Verbindungen innerhalb der Wurzeln und irregulär geformte Foramina auf.

Pineda & Kuttler (1972) untersuchten radiologische Aufnahmen von 4183 menschlichen Zähnen. Darunter befanden sich jeweils 300 erste und zweite untere Molaren. Bei 85% der untersuchten Wurzelkanäle konnte im apikalen Wurzel Drittel eine Krümmung nachgewiesen werden. In 83% der untersuchten Proben befand sich das apikale Foramen bis zu 3 mm seitlich der Wurzelspitze. Auch Cunningham et al. (1992) untersuchten 100 erste und zweite Unterkiefermolaren hinsichtlich der Krümmung ihrer mesiobukkalen und mesiolingualen Wurzelkanäle. Der mesiobukkale Wurzelkanal wies dabei eine durchschnittlich signifikant höhere Wurzelkrümmung auf. An 60 von 200 (30%) der untersuchten Wurzelkanäle konnte eine zusätzliche zweite Wurzelkrümmung nachgewiesen werden.

In der distalen Wurzel lassen sich meist ein oder zwei, selten sogar drei Wurzelkanäle auffinden. Skidmore & Bjorndal (1971) untersuchten 45 extrahierte menschliche erste Unterkiefermolaren und fanden in 38,5% der Proben in der distalen Wurzel zwei Wurzelkanäle mit getrennt verlaufenden Wurzelkanälen und jeweils separatem apikalen Foramen. Die restlichen 61,5% der untersuchten Unterkiefermolaren mit zwei distalen Wurzelkanälen wiesen im unteren Wurzel Drittel eine Vereinigung auf, die in ein gemeinsames apikales Foramen mündeten.



*Abbildung 2.1: Links und mittig zweiwurzelige Unterkiefermolaren, rechts dreiwurzelliger Unterkiefermolar.*

Der zweite Unterkiefermolar ist anatomisch dem ersten Unterkiefermolaren ähnlich. Er weist jedoch kürzere Wurzeln mit stärker gekrümmten Wurzelkanälen und einer höheren Variationsbreite auf (Melton et al., 1991). Eine Besonderheit des zweiten Unterkiefermolaren stellen C-förmige Wurzelkanäle dar (Melton et al., 1991, Lynn, 2006). Diese wurden erstmals 1979 durch Cooke und Cox mit einer Prävalenz von 7% beschrieben (Cooke & Cox, 1979).

Es handelt sich um einen mehrere Millimeter langen konfluierenden Kanaleingang in Form des Buchstaben „C“ (siehe Abbildung 2.2), in den sich die Pulpa tiefer als gewöhnlich fortsetzt (Beer & Baumann 1994).



Abbildung 2.2: Melton-Klassifikation, links Kategorie I, mittig Kategorie II, rechts Kategorie III.

Eine wiederholt verwendete Klassifikation der C-förmigen Kanalkonfiguration wurde durch Melton et al. (1991) erarbeitet. Es werden dabei folgende drei Kategorien basierend auf der Querschnittsform unterschieden (Melton et al., 1991).

Kategorie I: *Continuous*

C-förmiger Kanal von koronal nach apikal

Kategorie II: *Semicolon*

C-förmiges Orifizium und davon deutlich von Dentin abgegrenzter separater Kanaleingang

Kategorie III: *Separate*

zwei oder mehr separate Kanäleingänge, koronal in Form eines „C“ angeordnet

Die wohl am häufigsten genutzte Klassifikation der Wurzelkanalmorphologie, bei der in der Einzelwurzel zwischen 8 Wurzelkanaltypen unterschieden wird, entwickelte Vertucci 1984 (Vertucci, 1984; Vertucci, 2005) (siehe Abbildung 2.3).

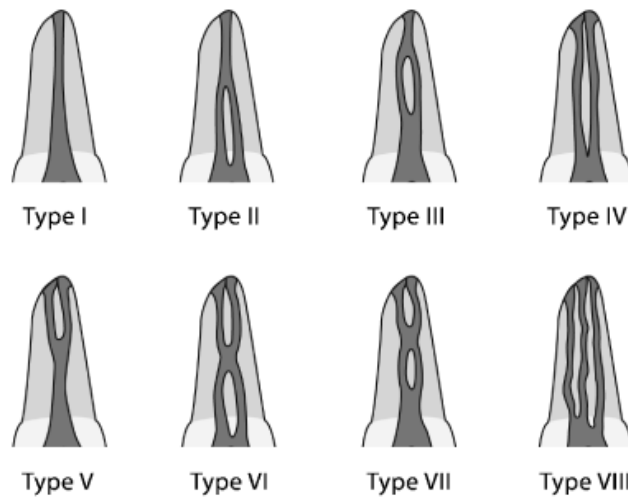


Abbildung 2.3: Wurzelkanalkonfigurationen nach Vertucci (2005).

Wurzelkanalkonfigurationen nach Vertucci:

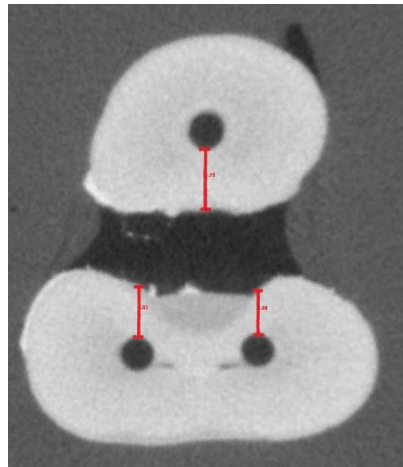
- Typ I: 1 einzelner Kanal
- Typ II: 2 separate Kanäle vereinigen sich kurz vor dem Apex zu einem Kanal
- Typ III: 1 Kanal teilt sich innerhalb der Wurzel und vereinigt sich wieder
- Typ IV: 2 separate Kanäle
- Typ V: 1 Kanal teilt sich kurz vor Apex in zwei Kanäle
- Typ VI: 2 Kanäle fusionieren im Zentrum der Wurzel und teilen sich kurz vor dem Apex wieder
- Typ VII: 1 Kanal der sich auf zweigt, vereinigt und wieder teilt
- Typ VIII: 3 separate Kanäle

### 2.1.2. Berücksichtigung der Furkation in der Endodontie

Als Furkation bezeichnet man den Bereich, an dem sich die Wurzeln bei mehrwurzeligen Zähnen im koronalen Bereich aufteilen (Becher et al., 1986). Bei zweiwurzeligen Zähnen spricht man von einer Bifurkation (Becher et al., 1986). Bei dreiwurzeligen Zähnen wird der Bereich der Wurzelteilung als Trifurkation bezeichnet.

Für den endodontischen Behandler ist die Kenntnis über die Morphologie der Furkation der unteren Molaren eine wichtige Voraussetzung, um iatrogene Verletzungen der Wurzel (Perforationen) während der Wurzelkanalbehandlung zu vermeiden. Diese senken die Prognose des Zahnes. Untersuchungen an ersten unteren Molaren ergaben, dass sich die geringste Dentindicke 1,5 mm apikal der Furkation befindet. Im distalen Bereich der mesialen Wurzel beträgt sie nur 1,2-1,3 mm (Kessler et al., 1983; Berutti & Fedon, 1992; Harris et al., 2013).

Die zur Furkation zeigenden Kanalwände werden deshalb auch als „danger zone“ bezeichnet (siehe Abbildung 2.4) (Abou-Rass et al., 1980).



*Abbildung 2.4: „Danger zone“ eines unteren Molaren (rote Pfeile).*

Um Komplikationen bei der Wurzelkanalaufbereitung zu reduzieren, sollte die Zugangskavität der Ausdehnung der Kronenpulpa entsprechen (Stock, 1979; Ruddle, 2007). Das Pulpenkammerdach, Pulpagewebe und Dentinüberhänge müssen vollständig entfernt werden, um alle Kanaleingänge auffinden zu können (Stock, 1979; Abou-Rass et al., 1980; Ruddle, 2007; Ingle et al., 2008). Der Zugang zu jedem Orifizium sollte, wenn nötig, erweitert werden, sodass alle Aufbereitungsinstrumente spannungsfrei in den Wurzelkanal eingeführt werden können (Stock, 1979; Abou-Rass et al., 1980; Ruddle, 2007; Ingle et al., 2008).

Die strukturelle Integrität im Bereich der Furkation muss allerdings gewahrt bleiben (Abou-Rass et al., 1980; Ingle et al., 2008). Wird während der Wurzelkanalaufbereitung im Bereich der „danger zone“ zuviel Dentin abgetragen, kann es zur Schwächung der Wurzelstruktur mit erhöhtem Risiko der Wurzelfraktur, Perforation oder Strip-Perforation kommen (Abou-Rass et al., 1980; Kessler et al., 1983; Assif & Gorfil, 1994; Isom et al., 1995; Garcia Filho et al., 2003; Kuttler et al. 2004; Mahran & AboEl-Fotouh, 2008). Frühere Studien haben den Erhaltungswert des Wurzeldentins hervorgehoben, um die strukturelle Integrität der endodontisch behandelten Zähne zu erhalten (Wilcox et al., 1997; Sathorn et al., 2005).

Wilcox et al. (1997) untersuchten an 34 Oberkieferfrontzähnen, wie die Menge des verbliebenen Wurzeldentins nach Wurzelkanalaufbereitung die Entwicklung von vertikalen Wurzelfrakturen beeinflusst. Die Arbeitsgruppe konnte einen Zusammenhang zwischen der Erweiterung des Wurzelkanals und Dentinschädigungen durch die Krafteinwirkung eines Spreaders nachweisen. Je größer aufbereitet wurde, desto mehr Dentinrisse konnten beobachtet werden. Dentinfrakturen entstehen, wenn die Zugspannung in der Wurzelkanalwand die

verbleibende Zugfestigkeit des Dentins übersteigt (Capar et al., 2014). Auch die Untersuchungsergebnisse von Holcomb et al. (1987) zeigten, je weiter der Wurzelkanal aufbereitet wurde, desto größer ist die Tendenz zur Wurzelfraktur bei Belastung.

Kishen (2006) sieht Unebenheiten in der Wurzelkanalwand wie Rillen, Vorsprünge oder Risse, die im Dentin während der Wurzelkanalpräparation entstehen, als Ursache für eine mögliche Ermüdungsfraktur des Zahnes. Er fügt an, dass aus biomechanischer Sicht eine Fraktur ein sehr komplexer Prozess ist, der die Bildung und das Wachstum von Mikro- und Makrodentinrissen beinhaltet. Selbst mikroskopische Dentinrisse wie „microcracks“ oder „craze lines“ können sich mit wiederholter Beanspruchung durch okklusale Kräfte ausbreiten und schließlich zur Wurzelfraktur führen (Kishen, 2006; Yoldas et al., 2012).

Eine Perforation im Gebiet der Furkation mehrwurzeliger Zähne hat aufgrund der dadurch stark verminderten Integrität des Zahnes eine schlechtere Prognose als weiter apikal gelegene Wurzeldefekte (Sinai, 1977; Petersson et al., 1985; Kvinnsland et al., 1989; Bogaerts, 1997). Noch ungünstiger gestaltet sich die Prognose bei Auftreten einer Strip-Perforation. Sie stellt einen ovalen oder schlitzförmigen dünnwandigen Defekt der Wurzeloberfläche dar (Kvinnsland et al., 1989; Allam, 1996). Im Gegensatz zu andersartigen Perforationen sind die Defekte, an denen Deckungsmaterialien kaum Retention finden, hier größer und breiter, (Kvinnsland et al., 1989; Allam, 1996).

Kuttler et al. (2004) konnten eine Korrelation zwischen verbliebener Dentindicke und Perforationen im Bereich der „danger zone“ nach Wurzelkanalbehandlung nachweisen. Sie untersuchten 26 erste und zweite wurzelkanalbehandelte humane Unterkiefermolaren hinsichtlich des Dentinabtrages durch Gates-Glidden-Bohrer im Bereich der mesialen Wurzeloberfläche in der distalen Wurzel. Bei Verwendung eines Gates-Glidden-Bohrers Größe 4 konnte bei 7,3% der untersuchten Wurzeln eine Strip-Perforation nachgewiesen werden. Je höher der Durchmesser des Gates-Glidden-Bohrers war, desto häufiger traten Perforationen im Bereich der „danger zone“ auf. Nach endodontischer Behandlung betrug die Dentindicke im Furkationsbereich in 82% der Proben weniger als 1 mm.

In einer anderen Studie durch Mahran & AboEl-Fotouh (2008) wurden die mesiobukkalen Wurzelkanäle von 45 ersten Unterkiefermolaren untersucht. Anhand von CT-Scans wurde die zervikale Dentindicke und das Kanalvolumen vor und nach Wurzelkanalaufbereitung durch die NiTi-Feilensysteme ProTaper® (Dentsply Sirona, York, USA), Hero Shaper® (Micro-Mega, Besancon Cedex, Frankreich) sowie durch die Flex-R®-Handfeile (Integra® Miltex®, York, USA) und Gates-Glidden-Bohrer (Dentsply Sirona, York, USA) untersucht. Es zeigte sich ein

höherer Dentinabtrag im Bereich der „danger zone“ durch die Flex-R®-Handfeile in Kombination mit dem Gebrauch des Gates-Glidden-Bohrers im Gegensatz zu den NiTi-Feilensystemen.

In weiteren Untersuchungen an ersten unteren Molaren konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen Wurzellänge und Dentindicke im Bereich der „danger zone“ besteht. Molaren mit langen Wurzeln (Sauáia et al. 2010: 24,14 mm ± 0,85 mm, Dwivedi et al. 2014: 24,2 mm ± 1,8 mm) wiesen dabei eine geringere Dentindicke 2 mm unterhalb der Furkation an der distalen Kanalwand der mesiobukkalen Wurzel auf im Vergleich zu ersten unteren Molaren mit kürzeren Wurzeln (Sauáia et al. 2010: 19,97 mm ± 0,75 mm, Dwivedi et al. 2014: 16,8 mm ± 1,8 mm) (Sauáia et al., 2010; Dwivedi et al., 2014).

## **2.2. Wurzelkanalaufbereitung**

Ziel einer endodontischen Behandlung ist die Entfernung des Pulpagewebes und des infizierten Wurzelkanalwanddentins durch mechanische Bearbeitung sowie die möglichst vollständige Elimination von Mikroorganismen aus dem Kanalsystem mittels antimikrobiell wirkender Spüllösungen (Ruddle, 2007; Young et al., 2007; Uzunoglu & Görduysus, 2014).

Die chemomechanische Reinigung des Kanalsystems spielt während der Wurzelkanalbehandlung eine dominierende Rolle (Stewart, 1955; Uzunoglu & Görduysus, 2014), da ungeachtet der Aufbereitungsmethode nicht alle Bereiche der Wurzelkanalwand von Aufbereitungsinstrumenten, erreicht werden können (Haga, 1968; Peters et al., 2001; Hübscher et al., 2003; Peters et al., 2003).

Das Aufbereitungssystem ProTaper® (Dentsply Sirona, York, USA) wurde unter anderem durch die Arbeitsgruppe Peters et al. (2003) hinsichtlich dieser Fragestellung untersucht. Es zeigte sich, dass 43 bis 49 % der Wurzelkanaloberfläche unbearbeitet bleiben (Peters et al., 2003). Dies betrifft vor allem Unregelmäßigkeiten des Wurzelkanalsystems wie flossenförmige Ausbuchtungen (Gutierrez & Garcia, 1968), Ramifikationen, C-oder S-förmige und ovale Kanalformen.

Eine ständige Gefahr während der Aufbereitung stellt die Verblockung des Wurzelkanals mit Debris und Dentinspänen dar. Eine Verblockung des Wurzelkanals schränkt den Zugang für Spülflüssigkeit in diesen Bereichen ein und kann apikal zu einem Verlust an Arbeitslänge führen (Young et al., 2007). Um dies zu vermeiden sollte der Wurzelkanaleingang optimal erweitert und das Wurzelkanalsystem kontinuierlich gespült werden. Die Spülkanüle sollte locker in den Wurzelkanal eingeführt werden können, um einen koronalen Rückfluss der Spülflüssigkeit zu

ermöglichen (Ruddle, 2007, Hülsmann et al., 2009). Dadurch sinkt das Risiko, Spülflüssigkeit über den Apex hinaus zu pressen und Debris, Dentinspäne und Mikroorganismen werden so aus dem Wurzelkanalsystem gespült (Ruddle, 2007; Hülsmann et al., 2009). Nur ein ausreichend ausgeformter Wurzelkanal ist in der Lage, ein ausreichendes Volumen an Spülflüssigkeit aufzunehmen, die im Wurzelkanalsystem zirkulieren und ins Dentin penetrieren kann (Ruddle, 2007). Das bedeutet, dass eine Aufbereitung bis mindestens ISO 25/.08 oder 30/.06 erfolgen muss, damit die Spülflüssigkeit bis zum Apex gelangen kann.

Weitere Ziele bei der Wurzelkanalaufbereitung sind das Beibehalten des ursprünglichen Wurzelkanalverlaufes, ein zirkulär gleichmäßiger Abtrag von Dentin und die konische Ausformung des Wurzelkanalsystems für die Aufnahme einer dauerhaften bakteriendichten Wurzelfüllung (Stellungnahme DGZMK & DGZ, 2005; Sonntag et al., 2006; Young et al., 2007; Uzunoglu & Görduysus, 2014).

Durch die möglichst vollständige Füllung des Wurzelkanalsystems in allen Dimensionen soll eine flüssigkeitsdichte Obturation geschaffen werden, die das erneute Eindringen von Bakterien und deren Toxinen (Michaud et al., 2008; Özok et al., 2008) sowie ihre Penetration in die periapikalen Gewebe verhindern soll (James et al., 2007).

### **2.3. Nickel-Titan-Instrumente**

Für Wurzelkanalinstrumente wird die Legierung Nickel-Titan im Verhältnis 56 % Nickel und 44% Titan verwendet (Thombson, 2000). Nickel-Titan, auch NiTiNOL („NOL“ aus dem US-amerikanischen Naval Ordnance Laboratory, 1963) genannt, bietet gegenüber Stahl viele positive Eigenschaften wie ein niedriges Elastizitätsmodul, Formgedächtnis und Superelastizität (Walia et al., 1988; Thombson, 2000; Gutmann & Gao, 2012). Bei ansteigender elastischer Deformation kommt es zu einer Kristallgitterumwandlung. Das kubisch-flächenzentrierte Kristallgitter der Austenit-Phase wird zur tetragonalen Gitterstruktur der Martensit-Phase (m-wire®) umgewandelt (Bürklein & Schäfer, 2013). Diese enthält im Vergleich zu herkömmlichen austenitischen NiTiNOL-Legierungen eine tetragonale Gitterstruktur, das Martensit (Alapati et al., 2009). Martensit zeichnet sich durch sein enormes Rückstellvermögen, auch „Memory-Effekt“ genannt, aus. So kann sich der Werkstoff auch nach starker Verformung an seine ursprüngliche Form „erinnern“ und kehrt in diese zurück. Durch eine spezielle thermomechanische Nachbehandlung (Erhitzung auf Temperaturen von 350–500 °C) kann aus konventionellem Austenit-NiTi m-wire®-NiTi hergestellt werden (Gutmann & Gao, 2012; Bürklein & Schäfer, 2013). Diese Legierung gilt durch ihre hohe Vickers-Härte als besonders flexibel bei gleichbleibend hoher Schneidleistung und zeichnet



sich als besonders widerstandsfähig aus (positives zyklisches Ermüdungsverhalten). Sie verleiht der Feile daher die Fähigkeit, auch Wurzelkanäle mit starker Krümmung aufzubereiten (Liu et al., 2009; Ehrensberger, 2014). Bei Entlastung erfolgt eine elastische Rückstellung.

Diese werkstofflichen Eigenschaften ermöglichen die sichere und schnelle Anwendung vollrotierender Instrumente für die Wurzelkanalaufbereitung (Bürklein et al., 2011; Bürklein et al., 2013, Kaval et al., 2016). Die schwierige Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle wird durch die fünfmal flexibleren Nickel-Titan-Instrumente, im Vergleich zu Stahlinstrumenten, deutlich erleichtert (Walia et al., 1988; Stock et al., 2004). Im Vergleich zu Stahlinstrumenten wird auch die Begradigung des Kanalverlaufes verringert (Yoo & Cho, 2012; Bürklein et al., 2013; Bürklein et al., 2019).

Allerdings weisen NiTi-Instrumente verglichen mit Stahlinstrumenten auch klinisch relevante Nachteile auf. Sie verfügen über eine geringere Oberflächenhärte und damit geringere Schneidleistung sowie keine oder nur geringfügige plastische Formänderung (Bürklein et al., 2013). Dies bedeutet einen höheren Materialverschleiß. Außerdem können konventionelle NiTi-Feilen im Gegensatz zu Stahlinstrumenten in der Regel nicht vorgebogen werden (Glosson et al., 1995) um beispielsweise Stufen zu überwinden. Die NiTi-Feilen wie ProFile Vortex oder Hyflex™ CM mit Formgedächtnis lassen sich wie klassische Edelstahlfeilen vorbeugen und mittels Wärme in die Ursprungsform zurückführen (Ba-Hattab, 2013).

Auch bezüglich des Frakturverhaltens unterscheiden sich maschinelle NiTi-Instrumente von Stahlinstrumenten. Erstere neigen dazu, aufgrund zyklischer Ermüdung, unerwartet und ohne äußerlich erkennbare Anzeichen zu frakturieren (Arens et al., 2003; Ankrum et al., 2004; Young & Van Vliet, 2005). Beispielsweise kann bei NiTi-Instrumenten eine spontane Torsionsfraktur auftreten, wenn die Instrumentenspitze im Wurzelkanal klemmt, während sich der Schaft weiterdreht. Infolge kommt es zur Überschreitung der elastischen Grenze und zur plastischen Verformung des Metalls, gefolgt von der Fraktur des Instrumentes (Sattapan et al., 2000). Edelstahlfeilen zeigen im Gegensatz zu NiTi-Feilen vor einer drohenden Fraktur äußerlich erkennbare plastische Deformationen (Parashos & Messer, 2006). Bei Einmalgebrauch ist die Frakturgefahr deutlich herabgesetzt.

Die in dieser Studie verwendeten Feilensysteme werden folgend ausführlicher beschrieben.

### 2.3.1. ProTaper Next®

Das Feilensystem ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA) existiert seit 2013 auf dem Dentalmarkt. Es besteht aus fünf Feilen zur Aufbereitung (X1-X5) (siehe Abbildung 2.5) mit entsprechender, an die ISO-Norm angelehnte, Farbkodierung.

Es handelt sich um ein Feilensystem der 5. Generation, welches durch einen versetzten Massen- und Rotationsmittelpunkt gekennzeichnet ist. Der rechteckige Querschnitt (siehe Abbildung 2.6) bietet einen großen Spanraum. Die Feilenspitze ist nicht schneidend. Die Feile bewegt sich dank ihres exzentrischen Designs schlängelnd im Wurzelkanal ähnlich einer Sinuswelle (Saber et al., 2014). Die Schneidkraft verteilt sich dadurch auf zwei Schneidekanten was zu weniger Kontaktpunkten im Wurzelkanal führt.



Abbildung 2.5: ProTaper Next® Sequenz.

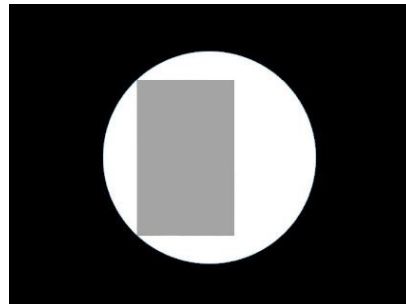


Abbildung 2.6: Viereckiger Querschnitt bei ProTaper Next®, exzentrisch rotierend.

Außerdem besitzt ProTaper Next® eine progressive Konizität, d.h. dass die Konizität der Feile entlang der Drehachse entweder innerhalb einer Feile ansteigt oder abnimmt, was die Flexibilität steigert und während der Wurzelkanalaufbereitung die Dentinsubstanz schont (Ruddle et al., 2013). Das Feilendesign erleichtert den Transport von Debris aus dem Wurzelkanal (Ruddle et al., 2013).

Der Hersteller empfiehlt für die Anwendung des Feilensystems im Vorfeld die Erstellung eines reproduzierbaren Gleitpfades. Anschließend kann die Präparation mit der Feile ProTaper Next® X1 (17/.04) beginnen. Ist die Arbeitslänge passiv erreicht, folgt ein zweiter

Präparationsdurchgang mit der ProTaper Next® X2 (025/.06) bis auf Arbeitslänge. Ist der apikale Schneidenbereich der ProTaper Next® X2 mit Dentin gefüllt, so ist die Aufbereitung beendet. Ist der apikale Schneidenbereich nicht mit Dentin gefüllt oder sitzt eine Handfeile ISO-Größe 25 bei erreichter Arbeitslänge locker, sollte die Präparation mit ProTaper Next® X3 (30/.07) und gegebenenfalls mit ProTaper Next® X4 (40/.06) oder ProTaper Next® X5 (50/.06) fortgeführt werden.

Capar et al. (2014) untersuchten das Auftreten von Rissen im Wurzeldentin nach der Wurzelkanalaufbereitung mit den rotierenden NiTi-Feilensystemen ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA), HyFlex™ (Coltène/Whaledent AG, Altstätten, Schweiz) und ProTaper® Universal (Dentsply Sirona, York, USA). Die Feilensysteme ProTaper Next® und HyFlex™ verursachten signifikant weniger Dentinrisse (28%) als ProTaper® Universal (56%) ( $P < 0,05$ ).

ProTaper Next® besteht aus der Legierung m-wire® NiTi. Dieser Werkstoff zeichnet sich durch seine einzigartige nanokristalline martensitische Mikrostruktur aus, welche die Flexibilität der Feile bei gleichbleibend hoher Schneidleistung erhöht (Alapati et al., 2009).

Pérez-Higueras et al. (2014) überprüften diese Aussage, indem sie die NiTi-Feilensysteme ProTaper® Universal (Dentsply Sirona, York, USA) und ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA) bezüglich ihrer Widerstandsfähigkeit gegen zyklische Ermüdung untersuchten. Alle Feilen wurden bei einer Rotation von 300 rpm bis zur Feilenfraktur gebracht. ProTaper Next® zeigte einen signifikant höheren Widerstand gegen zyklische Ermüdung als ProTaper® Universal.

Saber et al. (2014) verglichen die rotierenden NiTi-Feilensysteme ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA), iRaCe (FKG Dentaire SA, La Chaux-de-Fonds, Schweiz) und HyFlex™ (Coltène/Whaledent AG, Altstätten, Schweiz) bezüglich der Kanalbegradigung in stark gekrümmten Wurzelkanälen (25 bis 35 Grad). Die Autoren der Studie kamen zu dem Ergebnis, dass alle untersuchten Feilensysteme sicher in der Anwendung waren, da während der Wurzelkanalpräparation kein Instrument frakturierte. Alle Feilensysteme waren in der Lage, die ursprüngliche Wurzelkanalkrümmung zu erhalten.

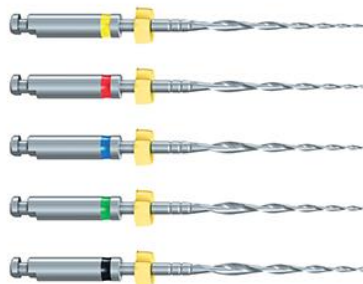
### 2.3.2. F6 SkyTaper®

Beim Feilensystem F6 SkyTaper® (Komet, Gebrüder Brasseler GmbH, Lemgo, Deutschland) handelt es sich um ein vollrotierendes Ein-Feilen-System mit einem doppel-S-förmigen Querschnitt (siehe Abbildung 2.7) ohne schneidende Instrumentenspitze (Roggendorf et al., 2015).



*Abbildung 2.7: S-förmiger Querschnitt bei F6 SkyTaper®.*

Es wurde 2015 von der Firma Komet auf den Markt gebracht. Das System verfügt über fünf Feilen in den ISO-Größen 20, 25, 30, 35 und 40 mit einer konstanten Konizität von 6 % (siehe Abbildung 2.8).



*Abbildung 2.8: F6 SkyTaper® Sequenz.*

Das System besteht aus einer konventionellen austenitischen Nickel-Titan-Legierung. Durch das Design wird der ursprüngliche Kanalverlauf auch bei gekrümmten Kanalverläufen beibehalten (Bürklein et al., 2017; Voigt, 2017; Sajad et al., 2018).

Der Hersteller empfiehlt vor Anwendung der F6 SkyTaper-Feilen die Herstellung eines Gleitpfades. Die passende F6 SkyTaper®-Feile wählt man anhand der zuvor verwendeten Handfeilengröße. Bei engeren Wurzelkanälen (initial Handfeile ISO 10) wird die Aufbereitung mit der F6 SkyTaper®-Feile bis 20/.06 empfohlen. Bei mittleren Kanaldurchmessern (initial Handfeile ISO 15) empfiehlt der Hersteller die Bearbeitung mit der F6 SkyTaper®-Feile 25/.06 und bei initialer Sondierung mit einer Handfeile ISO 20 die F6 SkyTaper®-Feile 30/.06.

Für weite Wurzelkanäle werden optional die F6 SkyTaper®-Feilen 35/.06 und 40/.06 empfohlen.

Das Feilensystem gewährleistet eine sichere Wurzelkanalaufbereitung (Single-Use-Instrumente) in Bezug auf Instrumentenfrakturen und Perforationen (Bürklein et al., 2017; Kaval et al., 2017; Voigt, 2017; Sajad et al., 2018; Bürklein et al., 2019).

Bürklein et al. (2017) konnten außerdem eine deutliche Reduktion der Behandlungszeit mit F6 SkyTaper® (Komet, Gebrüder Brasseler GmbH, Lemgo, Deutschland) als Ein-Feilen-System gegenüber Mtwo® (VDW, München, Deutschland) nachweisen.

Es finden sich bisher nur wenige Veröffentlichungen, in denen F6 SkyTaper® mit anderen Feilensystemen verglichen wurden.

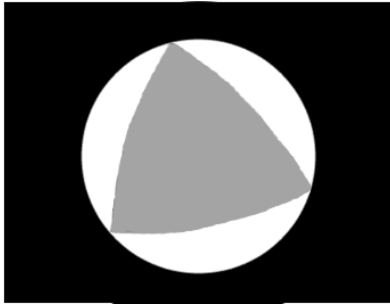
### **2.3.3. WaveOne®**

Das Feilensystem WaveOne® (Dentsply Sirona, York, USA) wird seit 2011 auf dem Dentalmarkt vertrieben und verfügt über drei Feilen für die Wurzelkanalaufbereitung (SMALL file 21/.06, PRIMARY file 25/.08, LARGE file 40/.08) (siehe Abbildung 2.9).

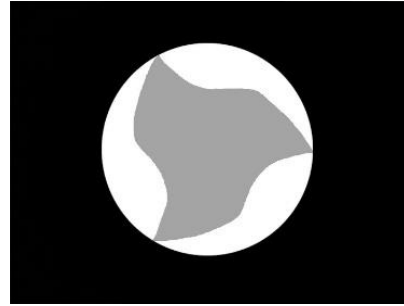


*Abbildung 2.9: WaveOne® Sequenz.*

Das System WaveOne® (Dentsply Sirona, York, USA) orientiert sich am bekannten ProTaper-Design. Alle Instrumente besitzen einen dreieckförmigen Querschnitt mit stumpfem Instrumentenende (Schlichting, 2013). Der koronale Teil des Arbeitsbereiches ist konvex gestaltet; apikal (1 mm) ändert sich der Querschnittsdesign und wird konkav. (Webber et al., 2011; Schlichting, 2013) (siehe Abbildung 2.10a und 2.10b). Als Legierung kommt auch hier, wie bei ProTaper Next®, eine spezielle NiTi-Legierung (sogenannte m-wire®-Legierung) zum Einsatz. Es handelt sich um ein Single-File-System mit reziproker Arbeitsweise (Webber et al., 2011; Roggendorf et al., 2015).



*Abbildung 2.10a: koronaler konvexer dreieckiger Querschnitt bei WaveOne®.*



*Abbildung 2.10b: konkaver Querschnitt am apikalen Ende bei WaveOne®.*

Unter einer Arbeitsweise in reziproker Bewegung wird die kontinuierliche Änderung der Drehrichtung der Feile während der Aufbereitung verstanden. Der Rotationswinkel in Schneidrichtung ( $170^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn) ist größer als der Winkel entgegen der Schneidrichtung ( $50^\circ$  im Uhrzeigersinn). Nach drei Schneidezyklen hat die Feile eine volle Umdrehung von  $360^\circ$  ausgeführt. Die koronalwärts gerichtete Bewegung wird durch die wiederholten Rückwärtsbewegungen des Instrumentes immer wieder unterbrochen und somit der Dentinkontakt gelöst (Roggendorf et al., 2015).

Der Hersteller empfiehlt vor dem Einsatz der Feilen das Erstellen eines Gleitpfades mit einer K-Handfeile. Wenn eine K-Handfeile der ISO-Größe 10 auf starken Widerstand stößt (Gebrauchsanweisung WaveOne™ Instrumente, S.2) empfiehlt der Hersteller die Aufbereitung des Wurzelkanals mit der WaveOne® Small file 21/.06. Gleitet die K-Handfeile mit der ISO-Größe 10 bis auf Arbeitslänge, kann mit der WaveOne® PRIMARY file 25/.08 aufbereitet werden. Kann initial eine K-Handfeile mit der ISO-Größe 20 problemlos bis auf Arbeitslänge sondiert werden, ist die Aufbereitung mit der WaveOne® LARGE file 40/.08 durchführbar.

Der ursprüngliche Kanalverlauf wird auch bei gekrümmten Kanalanatomien beibehalten (Bürklein et al., 2012; Lim et al., 2013). Die Aufbereitung mit WaveOne® ist schnell und durch die Materialeigenschaften von m-wire® und der reziproken Bewegung sicher in Bezug auf Feilenfrakturen (You et al., 2010; Bürklein et al., 2012; Saber et al., 2015). Kim et al. 2012 konnten zeigen, dass WaveOne® eine höhere Torsionsfestigkeit gegenüber Reciproc® (VDW, München, Deutschland) und ProTaper® (Dentsply Sirona, York, USA) aufweist. Die reziproke Bewegung von WaveOne® und seine mechanischen Eigenschaften waren dem vollrotierenden Feilensystem ProTaper® überlegen (Kim et al., 2012). In der zyklischen Ermüdungsbeständigkeit war Reciproc® dem System WaveOne® überlegen. Jedoch verhielten es sich bei beiden Feilensystemen hinsichtlich der Torsionsfestigkeit umgekehrt (Kim et al., 2012).

## **2.4. Mikro-Computertomographie**

### **2.4.1. Technische Grundlagen der Mikro-Computertomographie**

Bei der Computertomographie (CT) handelt es sich um ein röntgenbasiertes Schnittbildverfahren. Die Mikro-Computertomographie (Mikro-CT) besitzt im Vergleich zur humanen Ganzkörper-CT ein deutlich höheres Auflösungsvermögen und damit eine größere Detailschärfe. Dies wird durch das Anfertigen von wesentlich mehr und dünneren Scanschichten erreicht. Scanzeit und Strahlenbelastung sind folglich erhöht (Ford et al., 2003; Baumann & Beer, 2008; Euchner, 2014). Bei der klinischen CT wird der Scanner um das Objekt rotiert, wohingegen bei der Mikro-CT das Objekt vor dem Scanner rotiert wird. Mit der Verwendung der Mikro-CT kann die Wurzelkanalmorphologie dreidimensional, zerstörungsfrei und präzise untersucht werden (Rhodes et al., 1999).

Im Mikrocomputertomographen dient die Röntgenröhre als Strahlungsquelle, deren emittierte Strahlen das zu untersuchende Objekt auf dem Probenschlitten durchdringen. Zum Einsatz kommen Synchrotronstrahlungsquellen oder optimierte Fein- und Mikrofokusröntgenröhren. Je nach Röntgenquelle handelt es sich um eine Parallelstrahl-, Fächer- bzw. Kegelstrahlgeometrie (Engelke et al., 1999). Außerdem beinhaltet das Gerät einen Objektivrevolver und den damit verbundenen Detektor. Die von der Röntgenröhre entsandte Röntgenstrahlung kann durch die variable Stromstärke und Spannung reguliert werden (Voigt 2017). Nach Durchdringen des Objektes treffen die Strahlen auf einen sogenannten Charged-Coupled-Detektor (CCD-Kamera) (Engelke et al., 1999; Schneck, 2013). Dieser wandelt Strahlung in elektrische Signale um und sendet diese an einen Computer (Engelke et al., 1999; Schneck, 2013). Das durchstrahlte Messfeld ist in der Regel 2 cm<sup>3</sup> groß (Buzug, 2004). Die Messkammer ist mit Bleiwänden isoliert (Buzug, 2004; Schneck, 2013).

Am Computer können die Daten rekonstruiert und bearbeitet werden. Durch die orts- und zeitfeste Überlagerung der Schnittbilder mittels einer speziellen Computersoftware können anhand der verschiedenen Schwächungswerte der durchstrahlten Gewebe, dreidimensionale Bilddaten rekonstruiert werden (Schneck, 2013).

### **2.4.2. Bedeutung der Mikro-Computertomographie in der Endodontie**

Die Morphologie des menschlichen Wurzelkanalsystems unterliegt einer großen Variationsbreite und Komplexität. Es lassen sich unter anderem netzartige oder C-förmige Kanalstrukturen sowie akzessorische Kanäle oder multiple Foramina beobachten (Hess, 1917). Grundlage für eine erfolgreiche endodontische Behandlung ist daher das vollständige

Verständnis über die dreidimensionale Wurzelkanalanatomie und deren Veränderung durch endodontische Maßnahmen (Peters et al., 2000; Swain & Xue, 2009).

Durch die Mikro-Computertomographie als zerstörungsfreies Untersuchungsverfahren (Rhodes et al., 1999) sind Vorher-Nachher-Untersuchungen an extrahierten Zähnen möglich. Ältere Untersuchungserfahren wie Färbungen, das Transparentmachen oder Zahnschliffe haben den Nachteil, dass die Gewebe im Zuge der Untersuchung mechanisch oder chemisch zerstört werden müssen. Durch konventionelles Röntgen (Zahnfilm, OPG, etc.) können dentale Gewebe nur zweidimensional wiedergegeben werden (Peters et al., 2000). Die durch die Mikro-CT gelieferten Daten können sowohl in dreidimensionaler als auch zweidimensionaler Ansicht rekonstruiert und in den einzelnen Scanschichten (Slices) in allen Raumebenen mit sehr hoher Auflösung betrachtet werden. Die exakte Darstellung und Untersuchung der inneren und äußeren Anatomie eines Zahnes wird so möglich (Dowker et al., 1997; Rhodes et al., 1999). Moderne Software ermöglicht die farbige Darstellung von Pulpa und Wurzelkanälen in allen Ebenen sowie eine transparente Darstellung der Zahnhartgewebe und umgekehrt (Bjørndal et al., 1999). Die inneren Strukturen eines Zahnes können unter anderem auf Parameter bezüglich Oberflächenbeschaffenheit, Kanalverlauf, Volumen und Durchmesser untersucht werden (Peters et al., 2000). Die gewonnenen Daten dienen als Grundlage für weitere Analysen der Wurzelkanalanatomie in der experimentellen Endodontie, präklinischen Erforschung für endodontische Verfahren und mathematische Erfassung der Zahnmorphologie. Auch die Effektivität von Wurzelkanalinstrumenten für die Wurzelkanalaufbereitung (Peters et al., 2001; Peters et al., 2003; Hübscher et al., 2003; Peters et al., 2010), sowie die Wirksamkeit von Spülungen (Tay et al., 2010), Entfernbarekeit von medikamentösen Einlagen (Ma et al., 2015; Silva et al., 2015), Effektivität endodontischer Revisionsbehandlungen (Roggendorf et al. 2010; Rödiger et al., 2012) und Wurzelfüllung (Hammad et al., 2009) können mithilfe der Mikro-CT untersucht werden (Swain & Xue, 2009).



### **3. Material und Methoden**

#### **3.1. Vorbereitung der Proben**

Aus einem Pool von extrahierten menschlichen Molaren wurde eine Auswahl von 18 Unterkiefermolaren mit je drei Wurzelkanälen getroffen. Diese Unterkiefermolaren stammen aus zahnärztlichen Praxen in Greifswald und Umgebung, wurden nach Extraktion in 0,9%iger physiologischer Natriumchlorid-Lösung gelagert und der Universitätsmedizin Greifswald zur Nutzung für Forschung und Lehre überlassen.

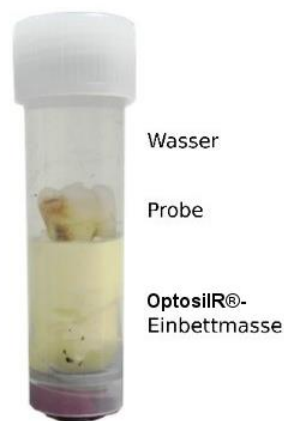
Der Versuchsplan wurde bei der Ethikkommission der Universitätsmedizin Greifswald eingereicht. Es gab seitens dieser Kommission keine ethischen und rechtlichen Bedenken zur Durchführung der vorliegenden Studie (siehe Anhang).

Auswahlkriterien für die Probenzähne der vorliegenden Arbeit waren ein abgeschlossenes Wurzelwachstum sowie intakte und morphologisch ähnliche, leicht gekrümmte Wurzeln. Zähne mit prothetischer Versorgung, Wurzelstiften oder Wurzelfüllung wurden ausgeschlossen.

Alle Arbeitsschritte wurden nacheinander und von demselben Behandler durchgeführt. Mit einem diamantierten zylindrischen Schleifer (5881.314.016 VPE 5, 016 1/10 mm, Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Deutschland) wurde unter Wasserkühlung von koronal eine Zugangskavität geschaffen. Anschließend wurde mit einem Langschaftrosenbohrer (HM Bohrer WSL H1SEM.205.014, Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Deutschland) ein geradliniger Zugang zu den Wurzelkanälen erstellt sowie Dentinüberhänge entfernt. Die Wurzelkanaleingänge wurden zusätzlich mit Gates-Glidden-Bohrern der Größe 1 und 2 erweitert und die Wurzelkanäle mit K-Feilen ISO 10/.02 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) bis zur apikalen Konstriktion auf Durchgängigkeit überprüft. Es wurden nur Zähne mit drei eigenständigen Wurzelkanaleingängen und drei durchgängigen Wurzelkanälen verwendet.

Um den durchschnittlichen Dentinabtrag bei der Wurzelkanalaufbereitung der drei zu vergleichenden Feilensysteme zu ermitteln, wurde die nicht invasive Mikro-Computertomographie in Kombination mit einer computergestützten Visualisierung genutzt. Dafür wurden die Zähne zunächst vor der Aufbereitung mittels Mikro-Computertomographen gescannt. Jeder Zahn wurde in eine Schraubröhre eingebettet (Sarstedt, Nümbrecht, Deutschland), welche mit OptosilR®, einem C-Silikon (Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland), befüllt war (siehe Abbildung 3.1). Um ein Austrocknen der Proben und die Entstehung von Trocknungsartefakten zu vermeiden, wurden die Zähne in der Schraubröhre in Wasser gelagert.

OptosilR® ermöglichte zudem die individuelle Einbettung jedes Zahnes. Die Proben wurden vor dem ersten Scanvorgang von 1 bis 18 nummeriert, randomisiert und durch die Mitarbeiter des Zoologischen Instituts und Museums der Universität Greifswald, verblindet (siehe Tabelle 8.1 im Anhang). Alle 18 Proben wurden erneut nach der Aufbereitung der Wurzelkanäle mittels Mikro-CT gescannt. Durch die Einbettung der Proben in OptosilR® war eine exakt reproduzierbare Reposition der Zähne möglich. Ein allgemeines Schema zum Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.2 dargestellt.



*Abbildung 3.1: Objekthalterung mit eingebettetem Zahn.*

### **3.2. Wurzelkanalaufbereitung**

Die Bestimmung der Arbeitslänge erfolgte durch Insertion einer K-Feile ISO 10/.02 (Dentsply Sirona, York, USA) in die Wurzelkanäle, bis die Feilenspitze über die apikale Konstriktion hinausragte und sichtbar am Kanalende von außen zu erkennen war. Dann wurde ein koronaler Referenzpunkt gewählt und die Länge des Kanals am Messblock abgelesen. Von dieser gemessenen Länge wurde 0,5 mm abgezogen und so die endgültige Arbeitslänge bestimmt. Zur instrumentellen Aufbereitung wurden die drei zu untersuchenden maschinellen Feilensysteme verwendet.

Die 18 Zähne wurden zufällig in drei Gruppen zu je 6 Zähnen eingeteilt. Jeder Gruppe wurde zufällig eines der drei Feilensysteme zugeordnet (siehe Abbildung 3.2). Die Aufbereitung der Wurzelkanäle wurde entsprechend den Herstellerangaben durchgeführt. Für jeden Zahn kamen fabrikneue sterile Feilen zum Einsatz. Die Handhabung der jeweiligen Feilensysteme wurde vor Beginn der Studie an Kunststoffblöcken und Probezähnen geübt. Es erfolgte während der Aufbereitung eine kontinuierliche Spülung mit 2,5%iger Natriumhypochlorid-Lösung und eine Zwischenreinigung der Instrumente nach jedem Arbeitsschritt. Auch bei gefülltem Spanraum oder einem Feilenwechsel wurde gespült. Wurde während der ersten Instrumentierung die

Arbeitslänge nicht erreicht oder stieß die Feile auf Widerstand, so wurde ebenfalls gespült und mit der zuletzt verwendeten Feile die Arbeitslänge rekapituliert. Alle Zähne wurden nacheinander und vom selben Behandler aufbereitet. Es wurden mindestens 6ml Spüllösung pro Zahn verwendet.

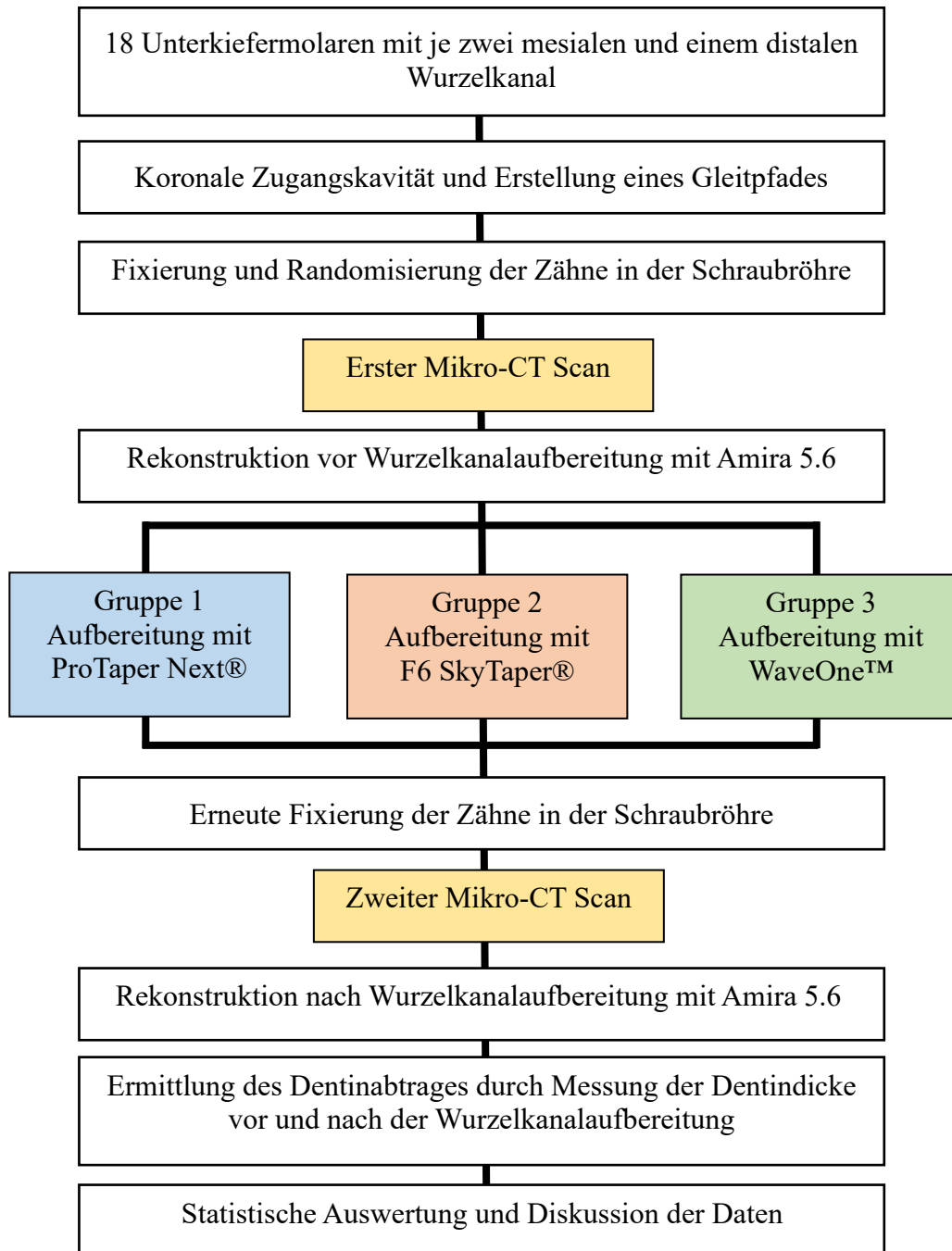


Abbildung 3.2: Schema zum Versuchsaufbau.

### **3.2.1. Aufbereitung mit ProTaper Next®**

Die Zähne der Gruppe 1 wurden mit dem Feilensystem ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA) nach Herstellerangaben aufbereitet. Es wurde zuvor ein Gleitpfad mit Hilfe der Pathfiles P1 13/.02 und P2 16/.02 (Dentsply Sirona, York, USA) hergestellt. Danach erfolgte die Kanalaufbereitung auf Arbeitslänge in aufsteigender ISO-Größe. Die Aufbereitung erfolgte mit dem Endo-Motor X-SMART® (Dentsply Sirona, York, USA) bei kontinuierlicher Rotation, einer Geschwindigkeit von 300 rpm und einem Drehmoment von 2,0 Ncm. Die Feilen wurden jeweils rotierend in allen Wurzelkanälen auf die Arbeitslänge eingebracht. Alle mesialen Wurzelkanäle wurden bis 25/.06 und alle distalen Wurzelkanäle bis 40/.06 aufbereitet.

### **3.2.2. Aufbereitung mit F6 SkyTaper®**

Die Zähne der Gruppe 2 wurden mit dem Feilensystem F6 SkyTaper® (Komet, Fa. Brasseler, Lemgo, Deutschland) nach Herstellerangaben aufbereitet. Es wurde ein Gleitpfad mit Hilfe des PathGliders 15/.02 (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Deutschland) hergestellt. Danach erfolgte die Kanalaufbereitung auf Arbeitslänge. Da es sich hier laut Hersteller um ein Ein-Feilen-System handelt, wurden die mesialen Wurzelkanäle mit der F6 SkyTaper® Feile 25/.06 (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Deutschland) und alle distalen Wurzelkanäle mit der F6 SkyTaper® Feile 40/.06 (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Deutschland) präpariert. Die Aufbereitung erfolgte mit dem Endo-Motor X-SMART® (Dentsply Sirona, York, USA) bei kontinuierlicher Rotation, einer Geschwindigkeit von 300 rpm und einem Drehmoment von 2,8 Ncm.

### **3.2.3. Aufbereitung mit WaveOne®**

Die Zähne der Gruppe 3 wurden mit dem Feilensystem WaveOne® (Dentsply Sirona, York, USA) nach Herstellerangaben aufbereitet. Es wurde ein Gleitpfad mit Hilfe der drei Pathfiles P1 13/.02, P2 16/.02 und P3 19/.02 (Dentsply Sirona, York, USA) in aufsteigender ISO-Größe hergestellt. Danach erfolgte die Kanalaufbereitung auf Arbeitslänge. Da es sich auch hier laut Hersteller um ein Ein-Feilen-System handelt, wurden alle mesialen Wurzelkanäle mit der WaveOne™ Feile Primary 25/.08 und alle distalen Wurzelkanäle mit der WaveOne™ Feile Large 40/.08 aufbereitet. Die Aufbereitung erfolgte mit dem Endo-Motor X-SMART® plus (Dentsply Sirona, York, USA) im reziproken Modus.

### 3.3. Mikro- Computertomographie

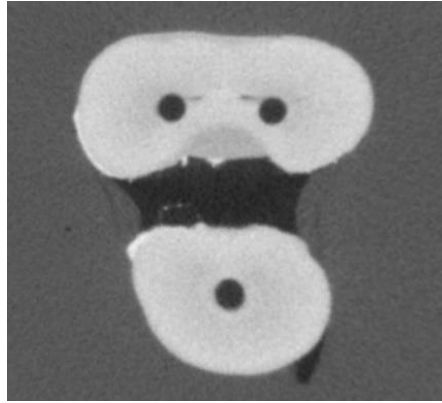
Für die Studie wurde der Mikro-Computertomograph XRadia XCT-200 X-Ray (Carl Zeiss, Jena, Deutschland) des Zoologischen Instituts und Museums der Universität Greifswald, genutzt (siehe Abbildung 3.3). Die im Vorfeld eingebetteten Zähne wurden in der Probenkammer auf dem Objektstisch fixiert (siehe Abbildung 3.3) und mit folgenden Parametern gescannt.

Röhrenspannung	80 kV / 8 W
Stromstärke	100 $\mu$ A
Anzahl der Ansichten	500
Durchstrahlzeit	2 sec
Detektor-RA Distanz	+75 mm
Quelle-RA Distanz	-75 mm
Scandauer	30 min
Räumliche Auflösung	33,75 $\mu$ m
Scanschritte	500 Schritte zu je 0.72 °



*Abbildung 3.3: Mikrocomputertomograph XRadia XCT-200 X-Ray (links),  
Probenschlitten mit Objekthalter (rechts).*

Die aus dem Scanvorgang resultierenden Rohdatensätze wurden in „dicom“-Datensätze umgewandelt und bestanden aus jeweils 1013 rekonstruierten Einzelbildern (Slices) pro Zahn (siehe Abbildung 3.4). Diese wurden exportiert und mit der Visualisierungssoftware Amira 5.6 (FEI, Visualisation Science Group, Hillsboro, USA) weiter bearbeitet. Nach der vollständigen Aufbereitung aller Wurzelkanäle wurden die Zähne unter Verwendung der gleichen Parameter erneut im Mikro-CT gescannt. Im Rahmen der Fragestellung der vorliegenden Arbeit wurden aus den so erhaltenen CT-Schnitten zunächst zweidimensionale „dicom-Rohdatensätze“ rekonstruiert.



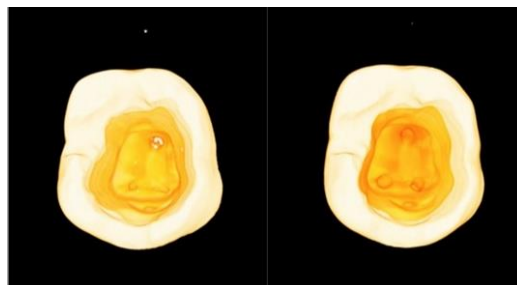
*Abbildung 3.4: Darstellung eines Einzelbildes (Slice) in Amira 5.6.*

### **3.4. Visualisierungssoftware Amira 5.6**

Mit der Visualisierungssoftware Amira 5.6 (FEI, Visualisation Science Group, Hillsboro, USA) können Bilddatensätze verschiedenster Formate (z.B. „dicom“) sowohl zweidimensional (2D), als auch dreidimensional (3D) dargestellt werden. Die Software ermöglicht dem Anwender dabei durch die Verwendung von „Software-Bausteinen“ (=Module) die gezielte Darstellung, Analyse und Bearbeitung spezifischer Daten (Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2011).

#### **3.4.1. Vermessung des Dentinabtrages im Wurzelkanalsystem**

Um die Restdentinstärke der Wurzelkanalwand zu ermitteln, wurden die Bilddaten der jeweiligen Zähne vor und nach Kanalaufbereitung durch eines der drei Feilensysteme einander gegenübergestellt. Dafür wurde die Darstellung im Modus Volren genutzt. Im Volren-Modus wird der Datensatz als Punktwolke dargestellt, basierend auf den Grauwertstufen. Es wurde darauf geachtet, dass beide Zähne achsengerecht dargestellt sind. Im linken Bildausschnitt wurde der Datensatz für den Zahn vor und rechts nach der Aufbereitung dargestellt (siehe Abbildung 3.5).



*Abbildung 3.5: Darstellung im Volren-Modus, achsengerechtes Einstellen der Zähne, links Zahn vor der Aufbereitung, rechts Zahn nach der Aufbereitung.*

Es folgte der Wechsel in die Darstellung der spezifischen Grauwerte und der sogenannte Orthoslice-Modus wurde zur Streckenmessung hinzugefügt. Im Orthoslice-Modus ist es möglich, lineare Strecken zu definieren. Die Software berechnet automatisch die gemessene Strecke in mm. Der Startpunkt der Messung war die Ansicht eines vollständig geschlossenen Wurzelkanals am Foramen apikale in koronaler Richtung. Der Endpunkt der Messung war der Punkt, an dem es nicht mehr möglich war eine definierte Strecke zu erstellen. Dieser Punkt liegt koronal im Bereich der Furkation und ergibt sich aus der Vereinigung der Wurzelkanäle am Pulpenkammerboden (siehe Abbildung 3.6).

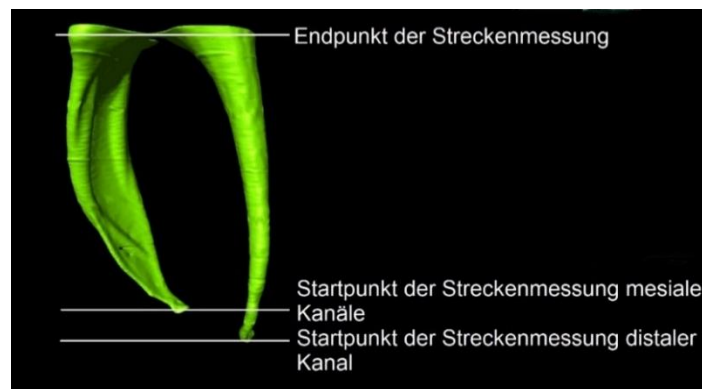


Abbildung 3.6: Start- und Endpunkt der Streckenmessung.

Es wurde in je 10 anatomischen Richtungen eine Strecke zur Messung der Restdentinstärke der Wurzelkanalwand gelegt. Dies erfolgte an der distalen Wurzel nach distal, mesial, bukkal und lingual und an den mesialen Wurzeln nach bukkal oder lingual und jeweils nach distal und mesial (siehe Abbildung 3.7). Ab dem apikalen Startpunkt wurden im Abstand von 15 Slices (entspricht 0,5 mm) jeweils 10 Messstrecken bis zum koronalen Endpunkt gelegt. Die Streckenmessung erfolgte durch das Fällen eines Lotes von der inneren Kanalwand zur äußeren Wurzeloberfläche.

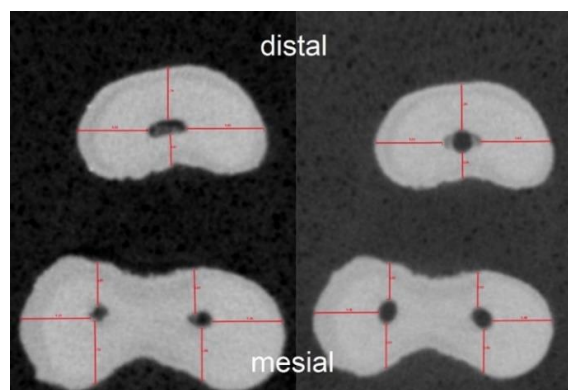
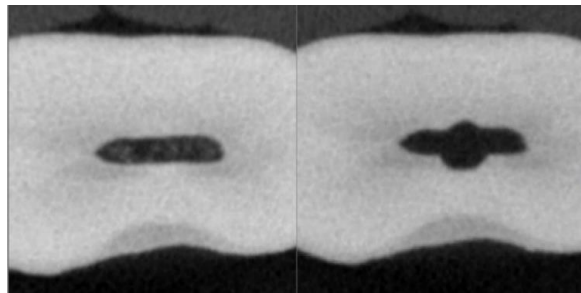


Abbildung 3.7: Konstruktion der Messstrecken (rot dargestellt) in anatomischen Richtungen im Orthoslice-Modus, Gegenüberstellung der gleichen Slice links vor und rechts nach Aufbereitung.

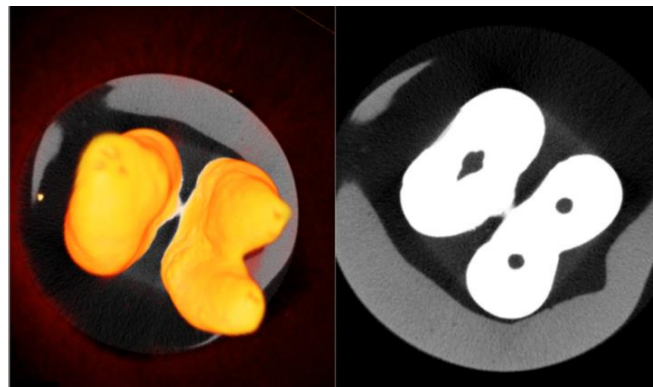
Die Messstrecken lagen im rechten Winkel zueinander. Die Streckenmessung wurde am aufbereiteten Wurzelkanalsystem im rechten Bildausschnitt begonnen. Um die Dentindicke zu ermitteln, wurde die kürzeste Distanz zwischen der inneren Kanalwand und der korrespondierenden äußeren Wurzeloberfläche gemessen. Anschließend wurden diese Strecken auf die Darstellung des Wurzelkanals vor der Aufbereitung im linken Bildausschnitt übertragen. Die Differenz der Messstrecken im rechten und linken Bildausschnitt beschreibt den Dentinabtrag. Das oben beschriebene Messverfahren wurde an allen 18 Zähnen in dieser Weise durchgeführt.



*Abbildung 3.8: links Zahn vor Aufbereitung, rechts Zahn nach Aufbereitung mit Darstellung des Feilenganges.*

### **3.4.2. Vermessung des Dentinabtrages an der Furkation**

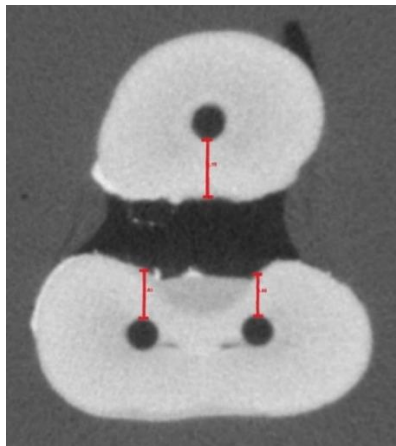
Um den Dentinabtrag auch im Bereich der Furkation bestimmen zu können, wurden zusätzliche Messstrecken konstruiert. Startpunkt war hier die Furkation (Slice 1), die mit Hilfe des Volren-Modus visuell ermittelt wurde (siehe Abbildung 3.9).



*Abbildung 3.9: Darstellung der Furkation als Bestimmung des Startpunktes für die Ermittlung des Dentinabtrages im Bereich der Furkation. Links mit Ansicht der Volumendarstellung der Wurzeln des entsprechenden Zahnes.*



Nach Ermittlung des koronalen Startpunktes wurde nun in drei Richtungen gemessen. Am distalen Kanal von der inneren Kanalwand nach mesial zur äußeren Wurzeloberfläche und an den mesialen Wurzelkanälen jeweils von der inneren Kanalwand nach distal zur äußeren Wurzeloberfläche (siehe Abbildung 3.10). Ab dem koronalen Startpunkt erfolgte die Konstruktion der Strecken im Abstand von 15 Slices (entspricht 0,5 mm). Der Endpunkt war nach fünf Messungen erreicht. Dies entspricht dem Bereich 2 mm unterhalb der Furkation. Die Streckenkonstruktion erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie bei der Vermessung des Dentinabtrages des gesamten Kanalsystems (siehe 3.4.1.).



*Abbildung 3.10: Messtrecken im Bereich der Furkation (rot dargestellt).*

### **3.5. Statistische Auswertung**

Folgende Nullhypothese wurde aufgestellt: „Das Ein-Feilen-System F6 SkyTaper® (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Deutschland) weist signifikante Unterschiede im Vergleich zu den Feilensystemen ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA) sowie WaveOne® (Dentsply Sirona, York, USA) bezüglich des Dentinabtrages auf.“

Untersucht wurden sowohl der Dentinabtrag an der gesamten Wurzelkanalwand als auch der im Bereich der Furkation. Ein Signifikanzniveau von  $p=0,05$  wurde für alle statistischen Tests festgelegt. Die Darstellung der kontinuierlichen Daten erfolgte als Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung sowie als Median mit 25%- und 75%-Quantil. Kategoriale Daten wurden als Häufigkeit und in Prozent angegeben. Um Unterschiede der Messwerte vor und nach der Aufbereitung mit Wurzelkanalinstrumenten stratifiziert nach Wurzelkanal und Messrichtung zu ermitteln, wurden Wilcoxon Rangsummentests für gepaarte Daten durchgeführt, ungeachtet der Clusterung der Werte innerhalb der Slices und der Zähne. Letztlich wurde in einem linearen gemischten Modell der Zusammenhang zwischen Gruppe (ProTaper Next®, F6 SkyTaper®, WaveOne®) und Zeit (vor und nach der Kanalaufbereitung) auf die Messwerte untersucht. Gemischte Modelle enthalten feste und zufällige Effekte. Feste Effekte entsprechen denen in

einer gewöhnlichen linearen Regression und werden direkt geschätzt [Angabe der Regressionskoeffizienten B mit 95%, Konfidenzintervall (KI)]. Als feste Effekte in diesem Modell wurden Gruppe (ProTaper Next® versus F6 SkyTaper®, ProTaper Next® versus WaveOne®), Zeit (vor und nach der Kanalaufbereitung), deren Interaktion (wenn  $p < 0,10$  für die Interaktion) und die ISO-Größe berücksichtigt. Weiterhin wurde durch die Hinzunahme zufälliger Effekte die komplexe hierarchische Struktur der Daten berücksichtigt: Zahn-Slice-Wurzelkanal-Messrichtung. Im Verlauf der Modellierung wurden die Slices gegebenenfalls teilweise zusammengefasst, da ansonsten keine Schätzung der Varianzen der zufälligen Effekte möglich war. Zufällige Effekte wurden als zufällige Intercepts (individueller Schnittpunkt der Geraden mit der y-Achse für die Messungen innerhalb der jeweiligen Slices) oder als Kombination zufälliger Intercepts und zufälliger Slopes (individueller Anstieg der Geraden für die Messungen innerhalb der entsprechenden Slice) berücksichtigt. Die zufälligen Effekte werden nicht direkt geschätzt, werden aber anhand ihrer Varianzen und Kovarianzen angegeben.

Alle Varianzen und Kovarianzen für die zufälligen Effekte wurden eindeutig geschätzt. Bei der Bestimmung der vorhergesagten Werte für die Abbildungen wurden nur die festen Effekte berücksichtigt.

Für die Analysen wurden Microsoft Excel 2013 (Microsoft Corporation, Redmond, USA), R (c/o Institute for Statistics and Mathematics, Wien, Österreich) und Stata/SE 14.2 (StataCorp. 2015. Stata Statistical Software: Release 14. College Station, TX: StataCorp LP.) verwendet.

## **4. Ergebnisse**

Die Dicke des Dentins wurde vor und nach der mechanischen Aufbereitung durch die drei untersuchten Aufbereitungssysteme gegenübergestellt und verglichen. Dies erfolgte für alle Wurzelkanäle sowie für distale und mesiale Wurzelkanäle getrennt. Die Dentindicken im Bereich der Furkation wurden gesondert betrachtet.

### **4.1. Dentinabtrag in allen Wurzelkanälen**

Um den Dentinabtrag zu ermitteln, wurden an jedem Zahn jeweils vor und nach der Wurzelkanalaufbereitung Messstrecken konstruiert (siehe Abbildung 3.6). In die statistische Analyse wurden die Streckenmessungen aller 18 Zähne eingeschlossen und der Dentinabtrag an der Wurzelkanaloberfläche betrachtet.

Es wurde ein Überblick über die Anzahl der untersuchten Zähne und ihre Einteilung in eine der drei Gruppen erstellt (siehe Tabelle 4.1). Jede Gruppe steht für die Wurzelkanalaufbereitung mit einem der drei untersuchten Feilensysteme: ProTaper Next®, F6 SkyTaper® und WaveOne®. Die Anzahl der Slices unterscheidet sich unter den untersuchten Zähnen, da ihre Wurzellängen variierten. Daraus ergibt sich auch eine unterschiedliche Anzahl an Streckenmessungen. Die Messwerte der Dentindicke wurden vor und nach der Wurzelkanalaufbereitung gepoolt über alle drei Feilensysteme im allen Wurzelkanälen, betrachtet. Es ergab sich vor der Aufbereitung ein Median von 1,44 mm (25%- Quantil 1,17 mm; 75%-Quantil 1,88 mm). Der Mittelwert lag bei 1,535 mm bei einer Standardabweichung von 0,551 mm. Nach der Wurzelkanalaufbereitung wurde ein Median von 1,38 mm ermittelt (25%- Quantil 1,05 mm; 75%-Quantil 1,82 mm). Der Mittelwert lag bei 1,464 mm bei einer Standardabweichung von 0,575 mm.

Tabelle 4.1: Übersicht, alle Wurzelkanäle.

	Zahn	Slices je Zahn	Anzahl Doppelmessungen je Zahn (vorher und nachher)
<b>ProTaper Next®</b>			
	1	13	118
	6	14	131
	12	19	174
	13	18	156
	15	16	154
	16	18	173
<b>F6 SkyTaper®</b>			
	2	23	219
	4	22	208
	7	14	130
	9	21	188
	10	17	152
	17	14	134
<b>WaveOne®</b>			
	3	15	147
	5	17	155
	8	14	134
	11	20	167
	14	18	157
	18	21	176
<b>Gesamt</b>	<b>18 Zähne</b>	<b>314 Slices</b>	<b>2873 Streckenmessungen</b>

#### 4.1.1. Vergleich der Feilensysteme

Es wurde ein gemischtes Modell aufgestellt, um den Einfluss des jeweiligen Feilensystems auf den intrakanalären Dentinabtrag vor und nach der Aufbereitung im Verhältnis zur externen Wurzelkanaloberfläche zu schätzen (siehe Tabelle 4.2). Anhand der p-Werte ist zu erkennen, ob eine Variable signifikant mit der abhängigen Variablen (Dentindicke) assoziiert war und ob eine Interaktion zwischen dem Feilensystem und der Variable Zeit (vor und nach der Aufbereitung) vorlag. Anhand der Effektgrößen kann die Stärke der Assoziationen geschätzt werden.

Im Mittel reduzierte das Feilensystem ProTaper Next® die Dentinwand an der gesamten Wurzelkanaloberfläche von 1,520 mm auf 1,465 mm. Die durchschnittliche Reduktion der Dentindicke lag somit bei 0,055 mm. Im Mittel reduzierte das Feilensystem F6 SkyTaper® die Dentinwand an der gesamten Wurzelkanaloberfläche von 1,486 mm auf 1,409 mm um damit 0,077 mm. Das Feilensystem WaveOne® reduzierte die Dentinwand an der gesamten Wurzelkanaloberfläche im Mittel von 1,503 mm auf 1,422 mm um 0,081 mm.

Die Abbildung 4.1 stellt die vorhergesagten Messwerte grafisch dar. Im Vergleich ProTaper Next® zu F6 SkyTaper® ergab sich kein signifikanter Unterschied ( $p=0,11$ ) bezüglich des Dentinabtrages. Im Vergleich ProTaper Next® zu WaveOne® ergab sich hingegen ein signifikanter Unterschied ( $p=0,017$ ). Für WaveOne® wurden 0,026 mm (95% KI: 0,005 mm; 0,048 mm) mehr Abtrag beobachtet als für ProTaper Next®. Ein Vergleich von F6 SkyTaper® mit WaveOne® ergab keinen signifikanten Unterschied ( $p=0,72$ ) zwischen beiden Feilensystemen.

Tabelle 4.2: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Gruppe (Feilensystem) und der Dentindicke (N=5746; p für Interaktion 0,03).

	B (95% KI)	P
<b>Feste Effekte</b>		
Feilensystem (Referenz ProTaper Next®)		
F6 SkyTaper®	-0,034 (-0,131; 0,062)	0,48
WaveOne®	-0,017 (-0,160; 0,126)	0,82
Zeit (nach versus vor der Aufbereitung)	-0,055 (-0,067; -0,043)	<0,001
Feilensystem X Zeit		
F6 SkyTaper® X Zeit	-0,021 (-0,047; 0,005)	0,11
WaveOne® X Zeit	-0,026 (-0,048; -0,005)	0,017
<b>Zufällige Effekte</b>		
Zahn-Level Varianz (SE)	0,008 (0,005)	
Slice-Level Varianz (SE)	0,084 (0,016)	
Messung-Level Varianz (SE) für Slope (Zeit)	0,004 (0,001)	
Messung-Level Varianz (SE) für Intercept	0,236 (0,028)	
Messung-Level Kovarianz (SE)	0,019 (0,003)	
Residuale Varianz (SE)	0,004 (0,001)	

B, Regressionskoeffizient; KI, Konfidenzintervall

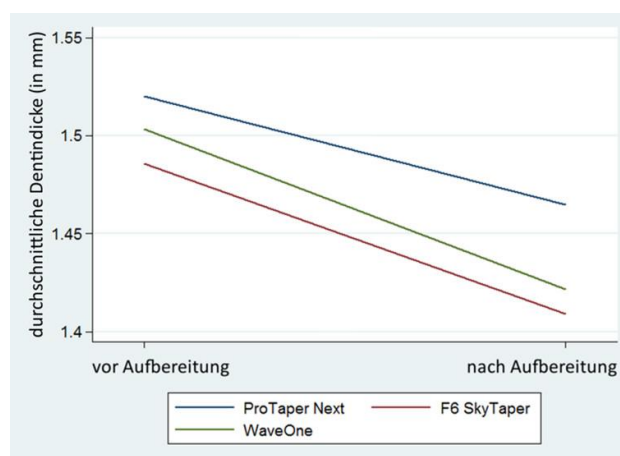


Abbildung 4.1: Darstellung des Dentinabtrages für die einzelnen Feilensysteme vor und nach Aufbereitung in allen Wurzelkanälen.

#### **4.1.2. Vergleich der Messrichtungen**

Für alle Kombinationen aus Wurzelkanälen und Messrichtungen ergab sich eine signifikante Reduktion ( $p < 0,0001$ ) der Messwerte durch die drei Feilensysteme (siehe Tabelle 4.3). Somit trugen alle drei Feilensysteme, unabhängig von Wurzelkanal und Messrichtung, Dentin an den Wurzelkanalwänden ab. Beispielsweise betrug der Dentinabtrag im Mittel im lingualen Wurzelkanal nach distal durch ProTaper Next® (N=91) 0,1 mm (vorher 1,22 mm  $\pm 0,30$ ; nachher 1,12 mm  $\pm 0,29$ ), durch F6 SkyTaper® (N=104) 0,15 mm (vorher 1,11 mm  $\pm 0,28$ ; nachher 0,96 mm  $\pm 0,25$ ), und durch WaveOne® (N=94) 0,15 mm (vorher 1,07 mm  $\pm 0,25$ ; nachher 0,92 mm  $\pm 0,21$ ).

#### **4.2. Dentinabtrag in mesialen und distalen Wurzelkanälen**

Für jedes der drei untersuchten Feilensysteme wurden für den distalen und die zwei mesialen Wurzelkanäle getrennte Modelle berechnet (siehe Tabelle 4.4). Die zufälligen Effekte wurden in der Tabelle nicht aufgeführt, um die Übersichtlichkeit zu verbessern. Zusätzlich wurde der Dentinabtrag zwischen den einzelnen Messrichtungen verglichen. Für alle Modelle ergab sich eine signifikante Interaktion zwischen vor und nach der Aufbereitung und der Messrichtung ( $p$  für Interaktion  $< 0,10$ ). Es lag also ein richtungsspezifischer Dentinabtrag vor. Daher wurde ein Interaktionsterm aufgeführt.

Tabelle 4.3: Übersicht der Messwerte (in mm) vor und nach Aufbereitung, getrennt nach Feilensystem, Wurzelkanal und Messrichtung (N=5746).

Feilensystem	Kanal	Richtung	Messwert		P*
			Vorher	Nachher	
<b>ProTaper Next®</b>					
	lingualer Kanal	distal (N=91)	1,22±0,30 1,21 (1,02-1,4)	1,12±0,29 1,08 (0,94-1,26)	<0,0001
		mesial (N=91)	1,24±0,35 1,29 (1,05-1,49)	1,20±0,35 1,22 (1,03-1,4)	<0,0001
		lingual (N=91)	1,76±0,40 1,78 (1,6-2,07)	1,73±0,40 1,75 (1,51-2,05)	<0,0001
	bukkaler Kanal	distal (N=87)	1,20±0,28 1,2 (1,1-1,36)	1,10±0,27 1,11 (0,96-1,24)	<0,0001
		mesial (N=87)	1,28±0,25 1,29 (1,13-1,45)	1,22±0,23 1,2 (1,11-1,36)	<0,0001
		Bukkal (N=87)	1,72±0,39 1,83 (1,57-2,01)	1,69±0,39 1,76 (1,54-1,99)	<0,0001
	distaler Kanal	distal (N=93)	1,35±0,33 1,4 (1,27-1,52)	1,29±0,32 1,34 (1,16-1,48)	<0,0001
		mesial (N=93)	1,40±0,42 1,35 (1,09-1,7)	1,30±0,41 1,24 (1,00-1,66)	<0,0001
		bukkal (N=93)	2,09±0,49 2,18 (1,81-2,45)	2,07±0,48 2,17 (1,80-2,43)	<0,0001
		lingual (N=93)	2,16±0,53 2,27 (1,86-2,55)	2,13±0,55 2,25 (1,81-2,55)	<0,0001
<b>F6 SkyTaper®</b>					
	lingualer Kanal	distal (N=104)	1,11±0,28 1,15 (0,97-1,32)	0,96±0,25 0,95 (0,79-1,09)	<0,0001
		mesial (N=104)	1,30±0,30 1,4 (1,13-1,49)	1,26±0,30 1,38 (1,07-1,48)	<0,0001
		lingual (N=104)	1,66±0,37 1,72 (1,49-1,88)	1,63±0,37 1,66 (1,42-1,85)	<0,0001
	bukkaler Kanal	distal (N=101)	1,14±0,29 1,21 (1,05-1,32)	0,99±0,30 1,05 (0,77-1,19)	<0,0001
		mesial (N=101)	1,38±0,32 1,4 (1,28-1,59)	1,30±0,30 1,29 (1,14-1,49)	<0,0001
		bukkal (N=101)	1,75±0,38 1,82 (1,65-1,96)	1,69±0,36 1,74 (1,57-1,9)	<0,0001
	distaler Kanal	distal (N=104)	1,43±0,34 1,46 (1,29-1,63)	1,34±0,32 1,37 (1,23-1,53)	<0,0001
		mesial (N=104)	1,17±0,35 1,13 (0,93-1,42)	1,06±0,32 1,00 (0,82-1,27)	<0,0001
		bukkal (N=104)	2,14±0,63 2,17 (1,73-2,59)	2,15±0,60 2,16 (1,82-2,59)	0,0001
		lingual (N=104)	2,15±0,51 2,16 (1,93-2,43)	2,10±0,56 2,17 (1,85-2,36)	<0,0001
<b>WaveOne®</b>					
	lingualer Kanal	distal (N=94)	1,07±0,25 1,07 (0,88-1,26)	0,92±0,21 0,91 (0,78-1,08)	<0,0001
		mesial (N=94)	1,31±0,27 1,34 (1,19-1,46)	1,22±0,26 1,24 (1,06-1,4)	<0,0001
		lingual (N=94)	1,97±0,44 2,04 (1,62-2,26)	1,94±0,44 1,98 (1,61-2,26)	<0,0001
	bukkaler Kanal	distal (N=86)	0,96±0,24 0,96 (0,85-1,09)	0,79±0,22 0,81 (0,65-0,9)	<0,0001
		mesial (N=86)	1,27±0,32 1,32 (1,09-1,45)	1,16±0,33 1,17 (0,94-1,4)	<0,0001
		bukkal (N=86)	2,07±0,45 2,11 (1,83-2,45)	2,02±0,46 2,08 (1,68-2,39)	<0,0001
	distaler Kanal	distal (N=99)	1,39±0,37 1,38 (1,14-1,65)	1,32±0,35 1,35 (1,08-1,59)	<0,0001
		mesial (N=99)	1,10±0,32 1,05 (0,94-1,27)	0,99±0,33 0,97 (0,73-1,18)	<0,0001
		bukkal (N=99)	2,11±0,52 2,19 (1,78-2,55)	2,08±0,52 2,12 (1,72-2,54)	<0,0001
		lingual (N=99)	2,09±0,59 2,09 (1,65-2,6)	2,07±0,60 2,08 (1,59-2,6)	<0,0001

\* Wilcoxon Rangsummentest für gepaarte Stichproben

Angabe der Messwerte als Mittelwert±Standardabweichung und Median (25%-75% Quantil)

Tabelle 4.4: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vorher/nachher) und Messrichtung und der Dentindicke (distaler Wurzelkanal: N=744; mesiale Wurzelkanäle: N=1068).

	ProTaper Next® (N=744 / 1068)		F6 SkyTaper® (N=832 / 1230)		WaveOne® (N=792 / 1080)	
	B (95% KI)	P	B (95% KI)	P	B (95% KI)	P
<b>distaler Kanal</b>						
Richtung (Ref. bukkal)	0 (Ref.)		0 (Ref.)		0 (Ref.)	
distal	-0,743 (-0,891; -0,600)	<0,001	-0,710 (-0,925; -0,496)	<0,001	-0,718 (-0,924; -0,512)	<0,001
lingual	0,066 (-0,102; 0,234)	0,44	0,004 (-0,118; 0,126)	0,95	-0,017 (-0,128; 0,094)	0,77
mesial	-0,687 (-0,783; -0,592)	<0,001	-0,974 (-1,260; -0,687)	<0,001	-1,002 (-1,233; -0,771)	<0,001
Zeit (nachher versus vorher)	-0,018 (-0,033; -0,004)	0,011	0,011 (-0,064; 0,086)	0,77	-0,031 (-0,052; -0,010)	0,003
Interaktion Richtung X Zeit						
distal X Zeit	-0,041 (-0,080; -0,001)	0,04	-0,100 (-0,181; -0,018)	0,016	-0,042 (-0,070; -0,015)	0,002
lingual X Zeit	-0,005 (-0,031; 0,021)	0,69	-0,063 (-0,210; 0,084)	0,40	0,007 (-0,017; 0,032)	0,56
mesial X Zeit	-0,081 (-0,142; -0,021)	0,009	-0,124 (-0,190; -0,058)	<0,001	-0,083 (-0,134; -0,033)	0,001
<b>mesiale Kanäle</b>						
Richtung (Ref. bukkal)	0 (Ref.)		0 (Ref.)		0 (Ref.)	
distal	-0,509 (-0,712; -0,306)	<0,001	-0,655 (-0,901; -0,409)	<0,001	-1,077 (-1,372; -0,782)	<0,001
lingual	0,044 (-0,039; 0,127)	0,30	-0,090 (-0,153; -0,027)	<0,001	-0,114 (-0,284; 0,057)	0,19
mesial	-0,472 (-0,695; -0,249)	<0,001	-0,444 (-0,620; -0,267)	<0,001	-0,800 (-1,088; -0,510)	<0,001
Zeit (nachher versus vorher)	-0,034 (-0,051; -0,017)	<0,001	-0,064 (-0,101; -0,027)	0,001	-0,057 (-0,088; -0,025)	<0,001
Interaktion Richtung X Zeit						
distal X Zeit	-0,064 (-0,087; -0,040)	<0,001	-0,086 (-0,137; -0,036)	0,001	-0,099 (-0,128; -0,071)	<0,001
lingual X Zeit	0,004 (-0,008; 0,017)	0,49	0,028 (-0,009; 0,065)	0,14	0,029 (0,003; 0,055)	0,027
mesial X Zeit	-0,013 (-0,035; 0,009)	0,24	0,002 (-0,029; 0,033)	0,89	-0,037 (-0,061; -0,014)	0,002

B, Regressionskoeffizient; KI, Konfidenzintervall



### 4.3. Dentinabtrag in distalen Wurzelkanälen

Zunächst erfolgte ein Überblick über die Anzahl der untersuchten Zähne und ihre Einteilung in eine der drei untersuchten Feilensysteme (siehe Tabelle 4.5). Untersucht wurde der Dentinabtrag an der distalen Wurzelkanalwand. Da die Wurzellängen der untersuchten Zähne nicht identisch waren, gibt es für jeden Zahn eine unterschiedliche Anzahl an Slices, innerhalb derer die Messstrecken konstruiert wurden.

Tabelle 4.5: Übersicht, distale Wurzelkanäle.

	Zahn	Anzahl Slices je Zahn	Anzahl Doppelmessungen je Zahn
<b>ProTaper Next®</b>			
	1	13	40
	6	14	56
	12	19	72
	13	18	72
	15	16	64
	16	18	68
<b>F6 SkyTaper®</b>			
	2	23	84
	4	22	88
	7	14	52
	9	21	80
	10	17	56
	17	14	56
<b>WaveOne®</b>			
	3	15	60
	5	17	68
	8	14	56
	11	20	80
	14	18	64
	18	21	68
<b>Summe</b>	<b>18 Zähne</b>	<b>314 Slices</b>	<b>1184 Doppelmessungen</b>

Die statistische Analyse aller Messwerte der Dentindicken in distalen Wurzeln ergab vor der Wurzelkanalaufbereitung einen Median-Wert von 1,64 mm (25%-Quantil 1,24 mm; 75%-Quantil 2,18 mm). Der Mittelwert lag bei 1,714 mm bei einer Standardabweichung von 0,621 mm. Nach der Wurzelkanalaufbereitung lag der Median-Wert bei 1,56 mm (25%-Quantil 1,17 mm; 75%-Quantil 2,17 mm). Der Mittelwert lag bei 1,657 mm bei einer Standardabweichung von 0,645 mm.

### 4.3.1. Vergleich der Feilensysteme

Es wurde ein gemischtes Modell aufgestellt, um die Änderung der Dentindicke vor und nach der Aufbereitung durch das jeweilige Feilensystem an der distalen Wurzelkanaloberfläche zu schätzen (siehe Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Gruppe (Feilensystem) und der Dentindicke (N=2368).

	B (95% KI)	P
<b>Feste Effekte</b>		
Gruppe (Ref. ProTaper Next®)		
F6 SkyTaper®	-0,028 (-0,225; 0,169)	0,78
WaveOne®	-0,076 (-0,273; 0,121)	0,45
Zeit (nachher versus vorher)	-0,057 (-0,064; -0,051)	<0,001
<b>Zufällige Effekte</b>		
Zahn	Var(cons)=0,021 (SE=0,010)	
Slice	Var(cons)=0,066 (SE=0,013)	
Messung	Var(Zeit)=0,004 (SE=0,044)	
	Var(cons)=0,305 (SE=0,026)	
	Cov(Zeit, cons)=0,018 ((SE=0,022)	
	Var(Residual)=0,004 (SE=0,022)	

B, Regressionskoeffizient, KI, Konfidenzintervall.

Im Mittel reduzierte das Feilensystem ProTaper Next® die Dentinwände in distalen Wurzelkanälen von 1,740 mm auf 1,682 mm. Der durchschnittliche Dentinabtrag lag bei 0,057 mm (95% KI: -0,064 mm, -0,051 mm, p<0,001). Das Feilensystem F6 SkyTaper® trug an den Wurzelkanalwänden im Mittel von 1,712 mm auf 1,654 mm ab. Der durchschnittliche Dentinabtrag lag bei 0,057 mm (95% KI: -0,064 mm, -0,051 mm, p<0,001). WaveOne® reduzierte das Dentin im Mittel von 1,663 mm auf 1,606 mm. Der durchschnittliche Dentinabtrag lag bei 0,057 mm (95% KI: -0,064 mm, -0,051 mm, p<0,001). Eine grafische Darstellung der vorhergesagten Messwerte zeigt Abbildung 4.2. Zu erkennen ist ein paralleler Verlauf der Graphen, da der durchschnittliche Dentinabtrag durch die drei Feilensysteme gleich war.

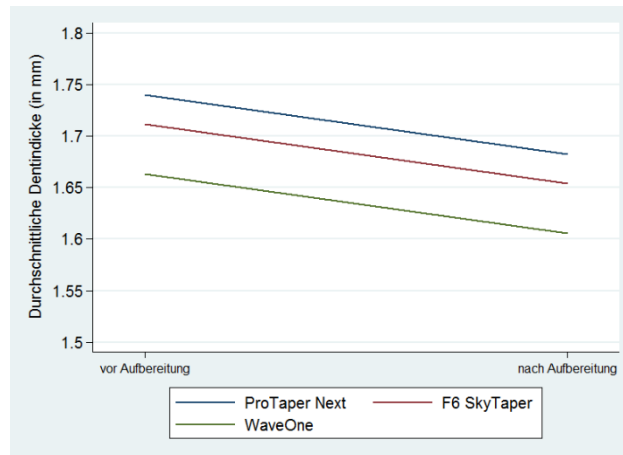


Abbildung 4.2: Darstellung des Dentinabtrages für die einzelnen Feilensysteme vor und nach Aufbereitung in distalen Wurzelkanälen.

#### 4.3.2. Vergleich der Messrichtungen

Um den Dentinabtrag durch die jeweiligen Feilensysteme an der distalen Wurzelkanaloberfläche in den verschiedenen Messrichtungen zu ermitteln, wurde ein gemischtes Modell aufgestellt (siehe Tabelle 4.4). Für alle drei Feilensysteme lagen signifikante Werte für die Interaktion in den Messrichtungen distal und mesial vor. Es lag also ein signifikanter Dentinabtrag vor. Für die Interaktion in der Messrichtung lingual konnte kein signifikanter Abtrag ermittelt werden.

Die Tabelle 4.7 stellt den anhand des gemischten Modells aus Tabelle 4.4 mittleren Dentinabtrag an distalen Wurzelkanälen durch das Feilensystem ProTaper Next® dar. In den Messrichtungen bukkal, distal und mesial lag ein signifikanter Dentinabtrag vor. In der Messrichtung lingual konnte kein signifikanter Dentinabtrag ermittelt werden (mittlerer Dentinabtrag: -0,024 mm (95% KI: -0,056; 0,008,  $p=0,15$ ). Die mittlere Dentindicke war in lingualer Messrichtung am größten, mit 2,154 mm vor und 2,131 mm nach der Aufbereitung durch das Feilensystem ProTaper Next®. Die geringste mittlere Dentindicke konnte mit 1,345 mm vor und 1,286 mm nach der Aufbereitung in distaler Richtung ermittelt werden. Die Abbildung 4.3 stellt diese Ergebnisse grafisch dar.

Tabelle 4.7: mittlerer Dentinabtrag für unterschiedliche Richtungen in distalen Wurzelkanälen, ProTaper Next®.

ProTaper Next®	Mittlere Dentindicke (in mm)		Mittlerer Dentinabtrag (in mm, 95% KI)	p
	vorher	nachher		
bukkal	2,089	2,070	-0,018 (-0,033; -0,004)	p=0,011
distal	1,345	1,286	-0,059 (-0,091; -0,027)	p<0,001
lingual	2,154	2,131	-0,024 (-0,056; 0,008)	p=0,15
mesial	1,401	1,302	-0,100 (-0,152; -0,047)	p<0,001

KI, Konfidenzintervall; p Wert aus posthoc Analysen nach dem Mixed model in Tabelle 5.7.

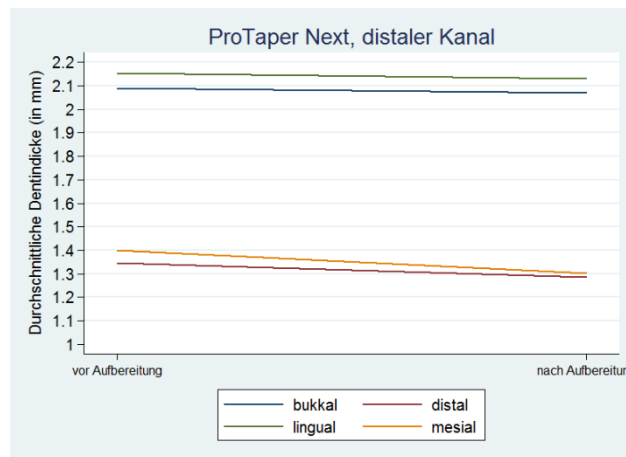


Abbildung 4.3: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.3), ProTaper Next®, distale Wurzelkanäle.

Die Tabelle 4.8 stellt den anhand des gemischten Modells aus Tabelle 4.4 mittleren Dentinabtrag an distalen Wurzelkanälen durch das Feilensystem F6 SkyTaper® dar. In den Messrichtungen distal (mittlerer Dentinabtrag: -0,089 mm (95% KI: -0,120 mm; -0,057 mm, p<0,001) und mesial (mittlerer Dentinabtrag: 0,113 mm (95% KI: -0,153 mm; -0,072 mm, p<0,001) lag ein signifikanter Dentinabtrag vor. In der Messrichtung lingual (mittlerer Dentinabtrag: -0,052 mm (95% KI: -0,126 mm; 0,022 mm, p=0,17) und bukkal (mittlerer Dentinabtrag: 0,011 mm (95% KI: -0,064 mm; 0,086 mm, p=0,77) konnte kein signifikanter Dentinabtrag ermittelt werden. Die mittlere Dentindicke war in lingualer Richtung am größten mit 2,140 mm vor der Aufbereitung durch das Feilensystem F6 SkyTaper®. Nach der Aufbereitung lag die mittlere Dentindicke bei 2,088 mm. In Richtung bukkal lag die größte mittlere Dentindicke nach der Aufbereitung mit 2,147 mm vor. Die geringste mittlere Dentindicke konnte mit 1,162 mm vor und 1,049 mm nach der Aufbereitung in mesialer

Richtung ermittelt werden. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse zeigt Abbildung 4.4.

Tabelle 4.8: mittlerer Dentinabtrag für unterschiedliche Messrichtungen in distalen Wurzelkanälen, F6 SkyTaper®.

F6 SkyTaper®	Mittlere Dentindicke (in mm)		Mittlerer Dentinabtrag (in mm, 95% KI)	p
	vorher	nachher		
bukkal	2,136	2,147	0,011 (-0,064; 0,086)	p=0,77
distal	1,425	1,337	-0,089 (-0,120; -0,057)	p<0,001
lingual	2,140	2,088	-0,052 (-0,126; 0,022)	p=0,17
mesial	1,162	1,049	-0,113 (-0,153; -0,072)	p<0,001

KI, Konfidenzintervall; p Wert aus posthoc Analysen nach dem Mixed model in Tabelle 5.7.

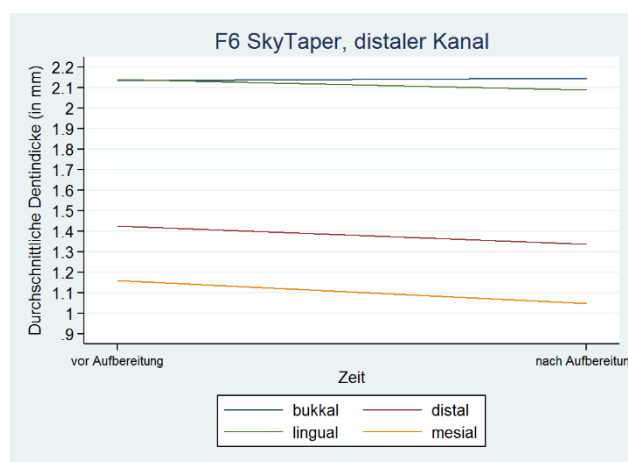


Abbildung 4.4: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.3), F6 SkyTaper®, distale Wurzelkanäle.

Die Tabelle 4.9 stellt anhand des gemischten Modells aus Tabelle 4.4 den mittleren Dentinabtrag in distalen Wurzelkanälen durch das Feilensystem WaveOne® dar. In allen vier Messrichtungen (bukkaler mittlerer Dentinabtrag: -0,031 mm (95% KI: -0,052 mm; -0,010 mm; p: 0,003); -distaler mittlerer Dentinabtrag: -0,074 mm (95% KI: -0,107 mm; -0,040 mm; p<0,001); lingualer mittlerer Dentinabtrag: -0,024 mm (95% KI: -0,035 mm; -0,013 mm; p<0,001); mesialer mittlerer Dentinabtrag: -0,115 (95% KI: -0,173; -0,056; p<0,001) lag ein signifikanter Dentinabtrag vor. Die mittlere Dentindicke war in bukkaler Richtung am größten mit 2,095 mm vor und 2,063 mm nach der Aufbereitung durch das Feilensystem F6 SkyTaper®. Die geringste mittlere Dentindicke konnte mit 1,093 mm vor und 0,978 mm nach

der Aufbereitung in mesialer Richtung ermittelt werden. Die Abbildung 4.5 stellt die Ergebnisse grafisch dar.

Tabelle 4.9: mittlerer Dentinabtrag in unterschiedliche Messrichtungen in distalen Wurzelkanälen, WaveOne®.

WaveOne®	Mittlere Dentindicke (in mm)		Mittlerer Dentinabtrag (in mm, 95% KI)	p
	vorher	nachher		
bukkal	2,095	2,063	-0,031 (-0,052; -0,010)	0,003
distal	1,377	1,304	-0,074 (-0,107; -0,040)	<0,001
lingual	2,078	2,054	-0,024 (-0,035; -0,013)	<0,001
mesial	1,093	0,978	-0,115 (-0,173; -0,056)	p<0,001

KI, Konfidenzintervall; p Wert aus posthoc Analysen nach dem Mixed model in Tabelle 5.7.

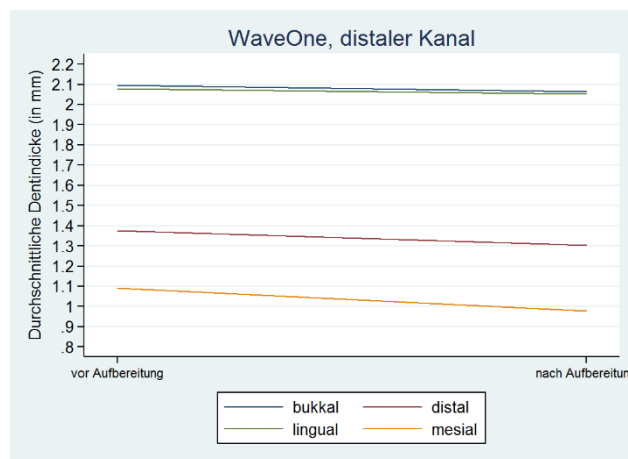


Abbildung 4.5: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.3), WaveOne®, distale Wurzelkanäle.

#### 4.4. Dentinabtrag in mesialen Wurzelkanälen

Auch für die mesialen Wurzelkanäle erfolgte anfangs ein Überblick über die Anzahl der untersuchten Zähne und Zuordnung zu einem der drei Feilensysteme (siehe Tabelle 4.10). Da die Wurzellänge der untersuchten Zähne nicht identisch war, gibt es für jeden Zahn eine unterschiedliche Anzahl an Schichtaufnahmen (Slices), innerhalb derer die Messstrecken konstruiert wurden.

Tabelle 4.10: Übersicht, mesiale Wurzelkanäle.

	Zahn Nr.	Anzahl Slices je Zahn	Anzahl Doppelmessungen je Zahn
<b>ProTaper Next®</b>			
	1	13	78
	6	14	75
	12	19	102
	13	18	84
	15	16	90
	16	18	105
<b>F6 SkyTaper®</b>			
	2	23	135
	4	22	120
	7	14	78
	9	21	108
	10	17	96
	17	14	78
<b>WaveOne®</b>			
	3	15	87
	5	17	87
	8	14	78
	11	20	87
	14	18	93
	18	21	108
<b>Summe</b>	<b>18 Zähne</b>	<b>314 Slices</b>	<b>1689 Doppelmessungen</b>

Es konnte ein Zusammenhang zwischen dem Einsatz der Feilen und dem intrakanalären Dentinabtrag festgestellt werden. Es lag eine Interaktion zwischen Feilensystem und Zeit (vor und nach der der Kanalaufbereitung) vor. Diese wurde entsprechend im Modell berücksichtigt. Die statistische Analyse aller Messwerte an mesialen Wurzeln ergab vor der Wurzelkanalaufbereitung einen Median-Wert von 1,37 mm (25%-Quantil 1,11 mm; 75%-Quantil 1,96 mm). Der Mittelwert lag bei 1,41 mm bei einer Standardabweichung von 0,456 mm. Nach der Wurzelkanalaufbereitung lag der Median-Wert bei 1,27 mm (25%-Quantil

0,99 mm; 75%-Quantil 1,62 mm). Der Mittelwert lag bei 1,328 mm bei einer Standardabweichung von 0,477 mm.

#### 4.4.1. Vergleich der Feilensysteme

Auch für mesiale Wurzelkanäle wurde ein gemischtes Modell aufgestellt, um den Einfluss des jeweiligen Feilensystems und der Zeit (vor und nach der Aufbereitung) auf den Dentinabtrag an der mesialen Wurzelkanaloberfläche zu schätzen (siehe Tabelle 4.11).

Tabelle 4.11: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Gruppe (Feilensystem) und Dentindicke (N=3378).

	B (95% KI)	P
<b>Feste Effekte</b>		
Gruppe (Ref. ProTaper Next®)		
F6 SkyTaper®	-0,026 (-0,139; 0,086)	0,65
WaveOne®	0,018 (-0,096; 0,132)	0,76
Zeit (nachher versus vorher)	-0,059 (-0,068; -0,050)	<0,001
<b>Gruppe X Zeit</b>		
F6 SkyTaper® X Zeit	-0,028 (-0,040; -0,016)	<0,001
WaveOne® X Zeit	-0,038 (-0,051; -0,026)	<0,001
<b>Zufällige Effekte</b>		
Zahn	Var(cons)=0,005 (SE=0,003)	
Slice	Var(cons)=0,059 (SE=0,008)	
Messung	Var(Zeit)=0,004 (SE=0,121)	
	Var(cons)=0,161 (SE=0,061)	
	Cov(Zeit, cons)=0,015 (SE=0,061)	
	Var(Residual)=0,004 (SE=0,061)	

B, Regressionskoeffizient; KI, Konfidenzintervall

Das Feilensystem ProTaper Next® reduzierte die Dentinwand an den mesialen Wurzelkanaloberflächen durchschnittlich um 0,059 mm (95% KI: -0,068 mm; -0,050 mm; p<0,001) von 1,391 mm auf 1,333 mm. F6 SkyTaper® reduzierte die Dentinwand an den mesialen Wurzelkanaloberflächen durchschnittlich um 0,087 mm (95% KI: -0,095 mm; -0,079 mm; p<0,001) von 1,365 mm auf 1,278 mm. Das Feilensystem WaveOne® reduzierte die Dentinwand an den mesialen Wurzelkanaloberflächen durchschnittlich um 0,097 mm (95% KI: -0,106 mm; -0,088 mm; p<0,001) von 1,409 mm auf 1,312 mm. Die Abbildung 4.6 stellt die vorhergesagten Messwerte grafisch dar.



Im Vergleich ProTaper Next® gegenüber F6 SkyTaper® ergab sich ein signifikanter Unterschied bezüglich der Reduzierung der Dentinwanddicke (B= 0,028 mm, 95% KI: 0,040 mm; 0,016 mm;  $p < 0,001$ ). Das Feilensystem F6 SkyTaper® trug signifikant mehr Dentin an den mesialen Wurzelkanaloberflächen ab als das Feilensystem ProTaper Next®. Im Vergleich von ProTaper Next® zu WaveOne® ergab sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied (B=0,038 mm; 95% KI: 0,051 mm; 0,026 mm;  $p < 0,001$ ). Das Feilensystem WaveOne® trug signifikant mehr Dentin an den mesialen Wurzelkanaloberflächen ab als das Feilensystem ProTaper Next®. Im Vergleich F6 SkyTaper® zu WaveOne® ergab sich kein signifikanter Unterschied (posthoc Tests: B=0,010 mm, 95% KI: -0,002 mm; 0,022 mm;  $p = 0,11$ ). Beobachtet wurde ein unterschiedliches Verhalten der Feilensysteme bezüglich des Dentinabtrages an der Wurzelkanaloberfläche in mesialen und distalen Wurzelkanälen. In mesialen Wurzelkanälen trug WaveOne® signifikant mehr Dentin ab als in distalen Wurzelkanälen. Die Abbildung 4.6 verdeutlicht dies.

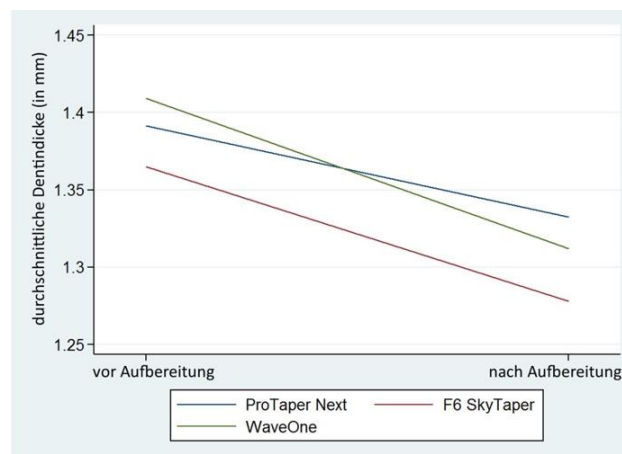


Abbildung 4.6: Darstellung des Dentinabtrages für die einzelnen Feilensysteme vor und nach Aufbereitung in mesialen Wurzelkanälen.

#### 4.4.2. Vergleich der Messrichtungen

Es wurde ein gemischtes Modell aufgestellt, um den Einfluss des jeweiligen Feilensystems und der Zeit (vor und nach der Aufbereitung) auf den Dentinabtrag an der mesialen Wurzelkanaloberfläche in den verschiedenen Messrichtungen, zu ermitteln (siehe Tabelle 4.4).

Die Tabelle 4.12 stellt den anhand des gemischten Modells aus Tabelle 4.4 mittleren Dentinabtrag in mesialen Wurzelkanälen durch das Feilensystem ProTaper Next® dar. Das Feilensystem ProTaper Next® trägt im Mittel an den mesialen Wurzelkanaloberflächen nach distal am meisten Dentin ab (mittlerer Dentinabtrag: -0,098 mm (95% KI: -0,118 mm;

-0,078 mm;  $p < 0,001$ ). Auch in alle weiteren Messrichtungen fand im Mittel ein signifikanter Dentinabtrag statt ( $p < 0,001$ ). Die größte verbleibende Dentindicke befand sich in linguale Richtung mit 1,749 mm vor und 1,719 mm nach der Aufbereitung durch das Feilensystem ProTaper Next®. Die geringste Dentindicke konnte nach distal mit 1,196 mm vor und 1,098 mm nach der Aufbereitung gemessen werden. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse zeigt Abbildung 4.7.

Tabelle 4.12: mittlerer Dentinabtrag für die verschiedenen Messrichtungen in mesialen Wurzelkanälen, ProTaper Next®.

ProTaper Next®	Mittlere Dentindicke (in mm)		Mittlerer Dentinabtrag (in mm, 95% KI)	p
	vorher	nachher		
bukkal	1,705	1,671	-0,034 (-0,051; -0,017)	$p < 0,001$
distal	1,196	1,098	-0,098 (-0,118; -0,078)	$p < 0,001$
lingual	1,749	1,719	-0,030 (-0,044; -0,015)	$p < 0,001$
mesial	1,233	1,186	-0,047 (-0,061; -0,034)	$p < 0,001$

KI, Konfidenzintervall; p Wert aus posthoc Analysen nach dem Mixed model in Tabelle 4.13

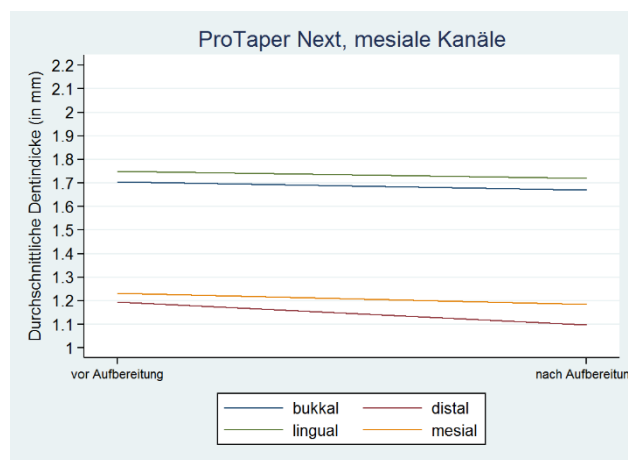


Abbildung 4.7: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.4), ProTaper Next®, mesiale Wurzelkanäle.

Die Tabelle 4.13 stellt den anhand des gemischten Modells aus Tabelle 4.4 mittleren Dentinabtrag an den mesialen Wurzelkanaloberflächen durch das Feilensystem F6 SkyTaper® dar. Das Feilensystem F6 SkyTaper® trägt im Mittel an den mesialen Wurzelkanaloberflächen nach distal am meisten Dentin ab (mittlerer Dentinabtrag: -0,150 mm (95% KI: -0,216 mm; -0,085 mm;  $p < 0,001$ ). Auch in alle weiteren Messrichtungen fand im Mittel ein signifikanter Dentinabtrag statt ( $p = 0,001$  und  $p < 0,001$ ). Die größte Dentindicke befand sich in bukkaler Richtung mit 1,751 mm vor und 1,687 mm nach der Aufbereitung durch das Feilensystem F6

SkyTaper®. Die geringste Dentindicke konnte nach distal mit 1,096 mm vor und 0,946 mm nach der Aufbereitung festgestellt werden. Die Abbildung 4.8 zeigt eine grafische Darstellung der Ergebnisse.

Tabelle 4.13: mittlerer Dentinabtrag für die verschiedenen Messrichtungen in mesialen Wurzelkanälen, F6 SkyTaper®.

F6 SkyTaper®	Mittlere Dentindicke (in mm)		Mittlerer Dentinabtrag (in mm, 95% KI)	p
	vorher	nachher		
bukkal	1,751	1,687	-0,064 (-0,101; -0,027)	0,001
distal	1,096	0,946	-0,150 (-0,216; -0,085)	<0,001
lingual	1,661	1,625	-0,036 (-0,053; -0,019)	0,001
mesial	1,307	1,246	-0,062 (-0,087; -0,036)	<0,001

KI, Konfidenzintervall; p Wert aus posthoc Analysen nach dem Mixed model in Tabelle 4.13.

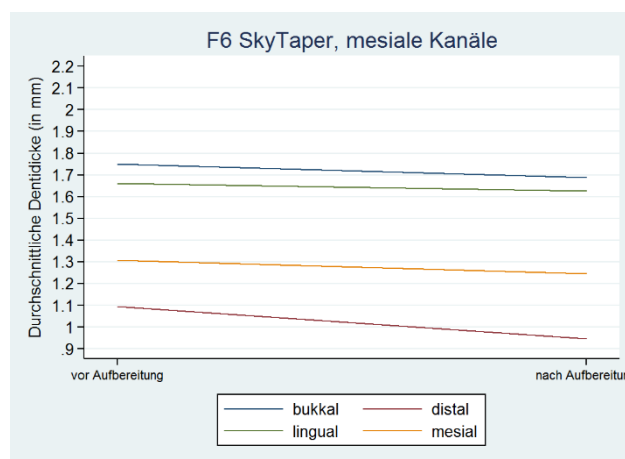


Abbildung 4.8: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.4), F6 SkyTaper®, mesiale Wurzelkanäle.

Tabelle 4.14 stellt den anhand des gemischten Modells aus Tabelle 4.4 mittleren Dentinabtrag an den mesialen Wurzelkanaloberflächen durch das Feilensystem WaveOne® dar. Auch das Feilensystem WaveOne® trägt im Mittel an den mesialen Wurzelkanaloberflächen nach distal am meisten Dentin ab (mittlerer Dentinabtrag: -0,156 (95% KI: -0,196; -0,116; p<0,001). Auch in alle weiteren Messrichtungen fand im Mittel ein signifikanter Dentinabtrag statt (p<0,001). Die größte Dentindicke befand sich in bukkaler Richtung mit 2,051 mm vor und 1,994 mm nach der Aufbereitung durch das Feilensystem WaveOne®. Die geringste Dentindicke konnte nach distal mit 0,974 mm vor und 0,818 mm nach der Aufbereitung ermittelt werden. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse zeigt Abbildung 4.9.

Tabelle 4.14: mittlerer Dentinabtrag für die verschiedenen Messrichtungen in mesialen Wurzelkanälen, WaveOne®.

WaveOne®	Mittlere Dentindicke (in mm)		Mittlerer Dentinabtrag (in mm, 95% KI)	p
	vorher	nachher		
bukkal	2,051	1,994	-0,057 (-0,088; -0,025)	<0,001
distal	0,974	0,818	-0,156 (-0,196; -0,116)	<0,001
lingual	1,937	1,910	-0,028 (-0,037; -0,018)	<0,001
mesial	1,252	1,158	-0,094 (-0,110; -0,077)	<0,001

KI, Konfidenzintervall; p Wert aus posthoc Analysen nach dem Mixed model in Tabelle 4.13.

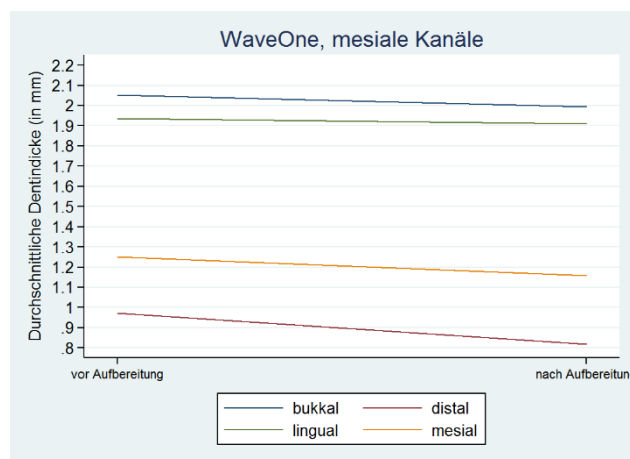


Abbildung 4.9: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.4), WaveOne® mesiale Wurzelkanäle.

#### 4.5. Dentinabtrag an der Furkation

Zunächst wurde wieder ein Überblick über die Anzahl der untersuchten Zähne, Anzahl der Slices sowie die Anzahl der Streckenmessungen erstellt (siehe Tabelle 4.15). In die statistische Analyse wurden alle 18 Zähne eingeschlossen.

Tabelle 4.15: Übersicht, an der Furkation.

	Zahn Nr.	Anzahl Slices je Zahn	Anzahl Streckenmessungen je Zahn
<b>ProTaper Next®</b>			
	1	5	30
	6	5	30
	12	5	30
	13	5	30
	15	5	30
	16	5	30
<b>F6 SkyTaper®</b>			
	2	5	30
	4	5	30
	7	5	30
	9	5	30
	10	5	30
	17	5	30
<b>WaveOne®</b>			
	3	5	30
	5	5	30
	8	5	30
	11	5	30
	14	5	30
	18	5	30
<b>Gesamt</b>	<b>18 Zähne</b>	<b>90 Slices</b>	<b>540 Streckenmessungen</b>

Je Zahn wurden jeweils vor und nach Wurzelkanalaufbereitung in 5 Slices, zu je 3 Messrichtungen, Messstrecken zur Ermittlung der Dentindicke konstruiert. Daraus ergeben sich insgesamt 30 Streckenmessungen je Zahn (vor und nach der Aufbereitung). Werden die Messwerte vor und nach der Wurzelkanalaufbereitung differenziert, ergab sich vor der Aufbereitung ein Median-Wert von 1,64 mm (25%-Quantil 1,24 mm, 75%-Quantil 2,18 mm). Aus den Messwerten ergaben sich ein Mittelwert von 1,714 mm und eine Standardabweichung von 0,621 mm. Nach der Wurzelkanalaufbereitung wurde ein Median von 1,56 mm ermittelt (25%-Quantil 1,17 mm, 75%-Quantil 2,17 mm). Der Mittelwert betrug nach der Aufbereitung 1,657 mm bei einer Standardabweichung von 0,645 mm. Aus Tabelle 4.16 geht hervor, dass alle

drei Feilensysteme in allen Messrichtungen einen signifikanten Abtrag ( $p < 0,0001$ ) an den Dentinwänden erreicht haben.

Tabelle 4.16: Übersicht der Messwerte (in mm) vor und nach der Aufbereitung, getrennt nach Feilensystem, Wurzelkanal und Messrichtung (N=270; N=30 je Wurzelkanal).

	Kanal	Messwert (in mm)		Change	P*
		Vorher	Nachher		
<b>ProTaper Next®</b>					
	bukkaler Kanal, distal	1,29 ± 0,29 1,33 (0,99-1,52)	1,09 ± 0,27 1,16 (0,85-1,3)	-0,20	<0,0001
	distaler Kanal, mesial	1,58 ± 0,41 1,52 (1,32-1,83)	1,43 ± 0,41 1,31 (1,1-1,7)	-0,15	<0,0001
	lingualer Kanal, distal	1,29 ± 0,266 1,30 (1,09-1,44)	1,11 ± 0,24 1,16 (0,91-1,22)	-0,18	<0,0001
<b>F6 SkyTaper®</b>					
	bukkaler Kanal, distal	1,47 ± 0,41 1,37 (1,24-1,56)	1,22 ± 0,44 1,1 (0,86-1,39)	-0,25	<0,0001
	distaler Kanal, mesial	1,41 ± 0,41 1,39 (1,05-1,74)	1,24 ± 0,46 1,22 (0,91-1,55)	-0,17	<0,0001
	lingualer Kanal, distal	1,27 ± 0,18 1,23 (1,17-1,4)	0,98 ± 0,26 1 (0,76-1,14)	-0,29	<0,0001
<b>WaveOne®</b>					
	bukkaler Kanal, distal	1,10 ± 0,18 1,08 (1-1,28)	0,81 ± 0,21 0,8 (0,71-0,98)	-0,19	<0,0001
	distaler Kanal, mesial	1,35 ± 0,39 1,38 (1,02-1,58)	1,17 ± 0,41 1,22 (0,87-1,38)	-0,18	<0,0001
	lingualer Kanal, distal	1,19 ± 0,27 1,13 (1,02 -1,33)	0,89 ± 0,20 0,85 (0,78-1,05)	-0,30	<0,0001

Angabe der Messwerte als Mittelwert±Standardabweichung und Median (25%-75% Quantil);

\* Rangsummentest für gepaarte Stichproben.

#### 4.5.1. Vergleich der Feilensysteme

Es wurde ein gemischtes Modell aufgestellt, um den Einfluss des jeweiligen Feilensystems und der Zeit (vor und nach der Aufbereitung) auf den Dentinabtrag an der Wurzelkanaloberfläche im Bereich der Furkation zu ermitteln (siehe Tabelle 4.17). Anhand des Modells in Tabelle 4.17 wurden die Mittelwerte für den Dentinabtrag bestimmt und zwischen den Feilensystemen verglichen. Im Mittel reduzierte das Feilensystem ProTaper Next® im untersuchten Bereich bis 2 mm unterhalb der Furkation die Dentinwand von 1,385 mm auf 1,211 mm. Es ergab sich eine durchschnittliche Differenz und damit Reduktion der Dentindicke um 0,173 mm (95% KI: -0,219; -0,127;  $p < 0,001$ ). Das Feilensystem F6 SkyTaper® reduzierte im Mittel die Dentinwand um 0,240 mm (95% KI: -0,338; -0,142;  $p < 0,001$ ) von 1,385 mm auf 1,145 mm. Das Feilensystem WaveOne® reduzierte die Dentinwand im Mittel um 0,256 mm (95% KI: -0,309; -0,203;  $p < 0,001$ ) von 1,214 mm auf 0,958 mm. Im Vergleich von ProTaper Next® zu F6 SkyTaper® ergab sich kein signifikanter Unterschied ( $p = 0,23$ ) bezüglich des

Dentinabtrages. Im Vergleich ProTaper Next® zu WaveOne® ergab sich ein signifikanter Unterschied ( $p=0,02$ ). WaveOne® erreichte signifikant mehr Dentinabtrag im Vergleich zu ProTaper Next®. Im Vergleich zu WaveOne® ergab sich für F6 SkyTaper® kein signifikanter Unterschied ( $p=0,78$ ). Die vorhergesagten Ergebnisse des mittleren Dentinabtrages der drei Feilensysteme stellt das Histogramm in Abbildung 4.10. grafisch dar.

Tabelle 4.17: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Gruppe (Feilensystem) und Dentinabtrag (N=540).

	B (95% KI)	P
<b>Feste Effekte</b>		
Gruppe (Ref. ProTaper Next®)	0,00	
F6 SkyTaper®	0,001 (-0,193; 0,194)	0,99
WaveOne®	-0,171 (-0,383; 0,042)	0,12
Zeit (nachher versus vorher)	-0,173 (-0,219; -0,127)	<0,001
<b>Gruppe X Zeit</b>		
F6 SkyTaper® X Zeit	-0,067 (-0,175; 0,041)	0,23
WaveOne® X Zeit	-0,083 (-0,153; -0,013)	0,02
<b>ISO (Ref. ISO 25)</b>		
ISO 40	0,220 (0,064; 0,3767)	0,006

B, Regressionskoeffizient; KI, Konfidenzintervall.

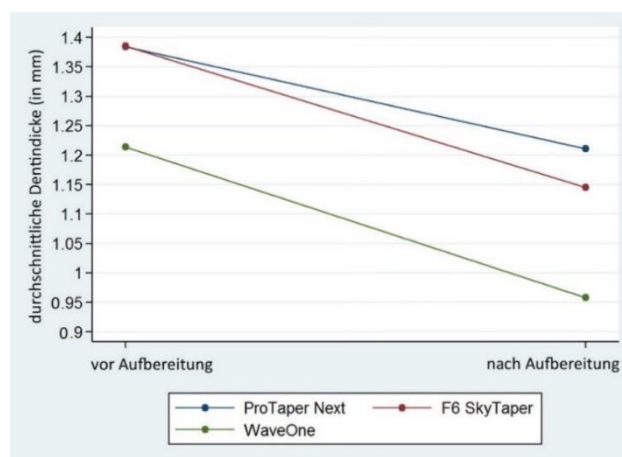


Abbildung 4.10: Darstellung des Dentinabtrages für die einzelnen Feilensysteme vor und nach Aufbereitung an der Furkation.

#### 4.5.2. Vergleich der Messrichtungen

Für das Feilensystem ProTaper Next® war keine kanalspezifische Dentinreduktion nachweisbar ( $p$  für Interaktion  $\gg 0,10$ ). Daher wurde das Modell ohne Interaktionsterm aufgeführt. Für die Feilensysteme F6 SkyTaper® und WaveOne® lag eine kanalspezifische

Dentinreduktion vor. Hier wurden die Modelle jeweils mit Interaktionsterm für beide Feilensysteme aufgeführt (siehe Tabelle 4.18).

Tabelle 4.18: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Wurzelkanal und dem Messwert (N=180); je Feilensystem (über alle 5 Slices).

	B (95% KI)	P
<b>ProTaper Next® (N=180)</b>		
Kanal (Ref. bukkaler Kanal distal)		
distaler Kanal mesial	0,314 (0,041; 0,588)	0,02
lingualer Kanal distal	0,007 (-0,109; 0,123)	0,90
Zeit (nachher versus vorher)	-0,173 (-0,222; -0,124)	<0,001
<b>F6 SkyTaper® (N=180)</b>		
Kanal (Ref. bukkaler Kanal distal)		
distaler Kanal mesial	-0,061 (-0,522; 0,400)	0,79
lingualer Kanal distal	-0,200 (-0,520; 0,120)	0,22
Zeit (nachher versus vorher)	-0,257 (-0,381; -0,133)	<0,001
<b>Interaktionsterm</b>		
distaler Kanal mesial X Zeit	0,082 (-0,009; 0,174)	0,08
lingualer Kanal distal X Zeit	-0,031 (-0,085; 0,022)	0,25
<b>WaveOne® (N=180)</b>		
Kanal (Ref. bukkaler Kanal distal)		
distaler Kanal mesial	0,252 (0,016; 0,488)	0,036
lingualer Kanal distal	0,087 (-0,044; 0,218)	0,19
Zeit (nachher versus vorher)	-0,289 (-0,311; -0,267)	<0,001
<b>Interaktionsterm</b>		
distaler Kanal mesial X Zeit	0,105 (0,021; 0,190)	0,015
lingualer Kanal distal X Zeit	-0,005 (-0,088; 0,078)	0,91

B, Regressionskoeffizient; KI, Konfidenzintervall.

Das Feilensystem ProTaper Next® reduzierte die Dentinwand im Bereich bis 2 mm unterhalb der Furkation im Mittel am mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal von 1,277 mm auf 1,104 mm, am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal von 1,285 mm auf 1,111 mm und am distalen Wurzelkanal nach mesial von 1,592 mm auf 1,419 mm. Der durchschnittliche Dentinabtrag war somit in den drei Wurzelkanälen annähernd gleich und betrug 0,173 mm (95% KI: -0,222; -0,124, p<0,001).

Das Feilensystem F6 SkyTaper® reduzierte die Dentinwand im Bereich bis 2 mm unterhalb der Furkation im Mittel am mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal von 1,472 mm auf 1,215 mm, am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal von 1,272 mm auf 0,984 mm und am distalen Wurzelkanal nach mesial von 1,411 mm auf 1,236 mm. Im Vergleich zwischen dem



mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal mit dem distalen Kanal nach mesial ( $B=-0,082$  mm; 95% KI:  $-0,174$  mm;  $0,009$  mm;  $p=0,078$ ) ergab sich kein signifikanter Unterschied. Im Vergleich zwischen dem mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal mit dem mesiolingualen Kanal nach distal ( $B=0,031$  mm; 95% KI:  $-0,022$  mm;  $0,085$  mm;  $p=0,25$ ) ergab sich kein signifikanter Unterschied im Dentinabtrag. Im Vergleich zwischen dem distalen Wurzelkanal nach mesial mit dem mesiolingualen Kanal nach distal ( $B=0,114$  mm; 95% KI:  $0,014$  mm;  $0,214$  mm;  $p=0,026$ ) ergab sich ein signifikanter Unterschied. Am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal fand ein höherer Dentinabtrag statt.

Das Feilensystem WaveOne® reduzierte die Dentinwand im Bereich bis 2 mm unterhalb der Furkation im Mittel am mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal von 1,101 mm auf 0,811 mm, am mesiolingualen Kanal nach distal von 1,188 mm auf 0,893 mm und am distalen Wurzelkanal nach mesial von 1,353 mm auf 1,169 mm. Im Vergleich zwischen dem mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal mit dem distalen Kanal nach mesial ( $B=0,105$  mm; 95% KI:  $-0,190$  mm;  $0,021$  mm;  $p=0,015$ ) ergab sich ein signifikanter Unterschied. Am mesiobukkalen Kanal nach distal fand ein höherer Dentinabtrag statt. Im Vergleich zwischen dem mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal mit dem mesiolingualer Wurzelkanal nach distal ( $B=0,005$ ; 95% KI:  $-0,078$ ;  $0,088$ ;  $p=0,91$ ) ergab sich kein signifikanter Unterschied im Dentinabtrag. Im Vergleich zwischen dem distalen Wurzelkanal nach mesial mit dem mesiolingualen Wurzelkanal nach distal ( $B=0,110$  mm; 95% KI:  $0,027$  mm;  $0,194$  mm;  $p=0,009$ ) ergab sich ein signifikanter Unterschied. Am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal fand ein höherer Dentinabtrag statt als am mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal.

Die Abbildung 4.11 stellt die vorhergesagten Ergebnisse grafisch dar.

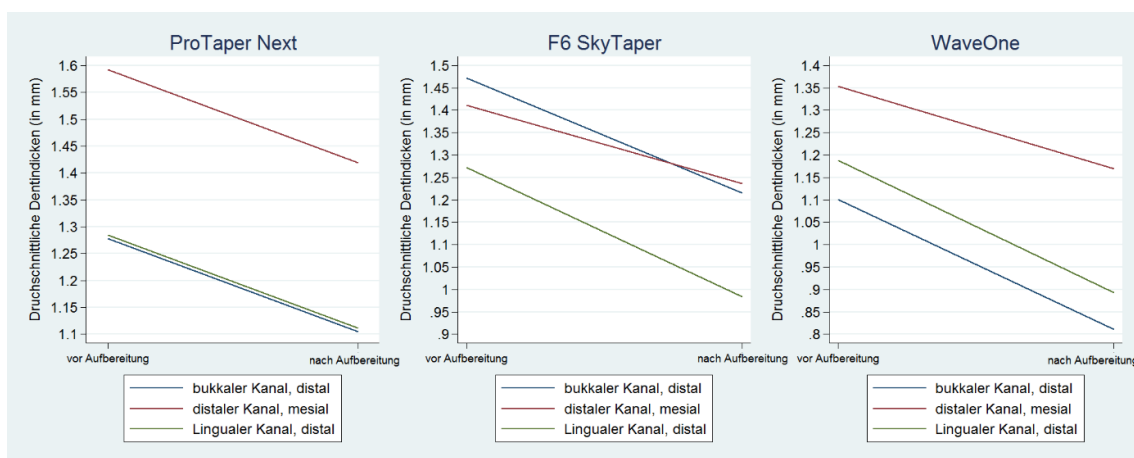


Abbildung 4.11: Darstellung des Dentinabtrages, je Wurzelkanal, vor und nach der Aufbereitung.

### 4.5.3. Vergleich der Messrichtungen je Slice

Das gemischte Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Wurzelkanal und der Dentindicke je Slice wurde für jedes der drei Feilensysteme separat aufgeführt, gegebenenfalls mit oder ohne Interaktionsterme (wenn  $p$  für Interaktion  $<0,10$ ) (siehe Tabelle 4.19). Die ISO-Größe wurde in diesen Modellen nicht berücksichtigt, da sie über die Variable „Kanal“ eindeutig identifiziert ist (ISO=25 für mesiale Wurzelkanäle, ISO=40 für distalen Wurzelkanal). Die statistische Analyse der Messstrecken ergab keine Interaktion zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung) und Wurzelkanal in Slice 4. Es war keine kanalspezifische Dentinreduktion nachweisbar ( $p$  für Interaktion  $>>0,10$ ). Es wurde daher kein Interaktionsterm im Modell aufgeführt.

In den Slices 1, 2, 3 und 5 lag eine Interaktion zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung) und Wurzelkanal vor. Somit war eine kanalspezifische Dentinreduktion nachweisbar ( $p$  für Interaktion  $<0,10$ ). Ein Interaktionsterm wurde im Modell aufgeführt. Die Abbildungen 4.12, 4.13 und 4.14 visualisieren die Modelle. In Abbildung 4.12 ist erkennbar, dass das Feilensystem ProTaper Next® in den Slices 1 bis 5 in den drei jeweiligen Messrichtungen gleichmäßig Dentin abgetragen hat.

Abbildung 4.13 visualisiert den Dentinabtrag durch das Feilensystem F6 SkyTaper®. In Slice 1 und 3 wurde am distalen Wurzelkanal nach mesial weniger Dentin als im bukkalen und lingualen Wurzelkanal nach distal abgetragen. In den Slices 2 und 4 war der Dentinabtrag in den drei jeweiligen Messrichtungen gleichmäßig. In Slice 5 wurde im lingualen Wurzelkanal nach distal mehr Dentin abgetragen als im bukkalen Wurzelkanal nach distal und im distalen Wurzelkanal nach mesial. Abbildung 4.14 zeigt den Dentinabtrag für das Feilensystem WaveOne®. In den Slices 1, 3, 4 und 5 zeigte sich ein gleichmäßiger Dentinabtrag in den drei Messrichtungen. In Slice 2 wurde in mesialer Richtung am distalen Wurzelkanal weniger Dentin abgetragen als im bukkalen und lingualen Wurzelkanal nach distal.

Tabelle 4.19: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach Aufbereitung), Wurzelkanal und der Dentindicke, je Feilensystem und Slice.

	ProTaper Next® (N=36 jeweils)		F6 SkyTaper® (N=36 jeweils)		WaveOne® (N=36 jeweils)	
Slice 1	B (95% KI)	P	B (95% KI)	P	B (95% KI)	P
Kanal (Ref. bukkaler Kanal distal)	0 (Ref.)		0 (Ref.)		0 (Ref.)	
distaler Kanal mesial	0,765 (0,342; 1,188)	<0,001	0,226 (-0,276; 0,728)	0,38	0,43 (0,104; 0,756)	0,01
lingualer Kanal distal	0,170 (0,053; 0,287)	0,004	-0,379 (-0,835; 0,076)	0,10	0,04 (-0,090; 0,170)	0,55
Zeit (nachher versus vorher)	-0,195 (-0,242; -0,148)	<0,001	-0,249 (-0,317; -0,182)	<0,001	-0,267 (-0,345; -0,188)	<0,001
Interaktionsterm						
distaler Kanal mesial X Zeit	0,057 (0,017; 0,096)	0,005	-	-	0,17 (0,064; 0,276)	0,002
lingualer Kanal distal X Zeit	0,017 (-0,053; 0,086)	0,64	-	-	-0,037 (-0,136; 0,063)	0,47
Slice 2						
Kanal (Ref. bukkaler Kanal distal)	0 (Ref.)		0 (Ref.)		0 (Ref.)	
distaler Kanal mesial	0,398 (0,034; 0,761)	0,032	0,000 (-0,416; 0,416)	1,00	0,310 (0,090; 0,530)	0,006
lingualer Kanal distal	-0,028 (-0,128; 0,073)	0,59	-0,213 (-0,505; 0,078)	0,15	0,048 (-0,054; 0,151)	0,36
Zeit (nachher versus vorher)	-0,184 (-0,232; -0,137)	<0,001	-0,283 (-0,417; -0,150)	<0,001	-0,263 (-0,347; -0,179)	<0,001
Interaktionsterm						
distaler Kanal mesial X Zeit	-	-	0,155 (0,006; 0,304)	0,04	-	-
lingualer Kanal distal X Zeit	-	-	-0,023 (-0,196; 0,150)	0,79	-	-
Slice 3						
Kanal (Ref. bukkaler Kanal distal)	0 (Ref.)		0 (Ref.)		0 (Ref.)	
distaler Kanalmesial	0,250 (-0,058; 0,558)	0,11	-0,104 (-0,604; 0,396)	0,68	0,227 (-0,055; 0,508)	0,12
lingualer Kanaldistal	-0,006 (-0,167; 0,156)	0,94	-0,204 (-0,523; 0,115)	0,21	0,098 (-0,024; 0,221)	0,12
Zeit (nachher versus vorher)	-0,193 (-0,244; -0,143)	<0,001	-0,258 (-0,379; -0,137)	<0,001	-0,347 (-0,400; -0,293)	<0,001
Interaktionsterm						
distaler Kanalmesial X Zeit	-	-	-	-	0,195 (0,056; 0,334)	0,006
lingualer Kanaldistal X Zeit	-	-	-	-	0,032 (-0,068; 0,132)	0,54
Slice 4						
Kanal (Ref. bukkaler Kanal distal)	0 (Ref.)		0 (Ref.)		0 (Ref.)	
distaler Kanalmesial	0,128 (-0,126; 0,381)	0,32	-0,188 (-0,682; 0,306)	0,46	0,245 (-0,047; 0,537)	0,10
lingualer Kanaldistal	-0,040 (-0,212; 0,132)	0,65	-0,173 (-0,555; 0,208)	0,37	0,150 (-0,065; 0,365)	0,17
Zeit (nachher versus vorher)	-0,173 (-0,221; -0,126)	<0,001	-0,224 (-0,317; -0,132)	<0,001	-0,277 (-0,346; -0,207)	<0,001
Slice 5						
Kanal (Ref. bukkaler Kanal distal)	0 (Ref.)		0 (Ref.)		0 (Ref.)	
distaler Kanal mesial	0,003 (-0,249; 0,256)	0,98	-0,112 (-0,308; 0,084)	0,26	0,115 (-0,148; 0,378)	0,39
lingualer Kanal distal	-0,069 (-0,259; 0,121)	0,48	-0,097 (-0,240; 0,047)	0,19	0,107 (-0,157; 0,370)	0,43
Zeit (nachher versus vorher)	-0,144 (-0,194; -0,093)	<0,001	-0,229 (-0,364; -0,094)	0,001	-0,245 (-0,296; -0,194)	<0,001
Interaktionsterm						
distaler Kanal mesial X Zeit	-	-	-	-	0,032 (-0,096; 0,159)	0,63
lingualer Kanal distal X Zeit	-	-	-	-	-0,037 (-0,101; 0,028)	0,26

B, Regressionskoeffizient; KI, Konfidenzintervall.

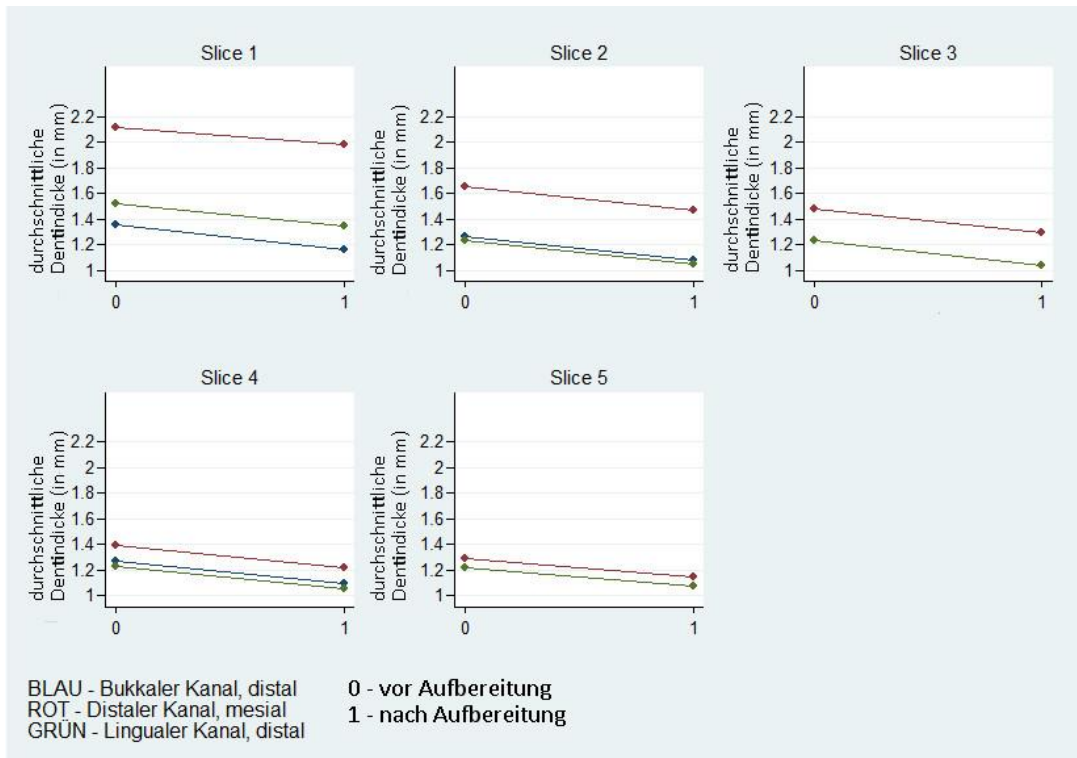


Abbildung 4.12: Darstellung mittlere Dentinstrecke vor und nach Aufbereitung, je Messrichtungen, für alle 5 Slices, Tabelle 4.21, ProTaper Next®.

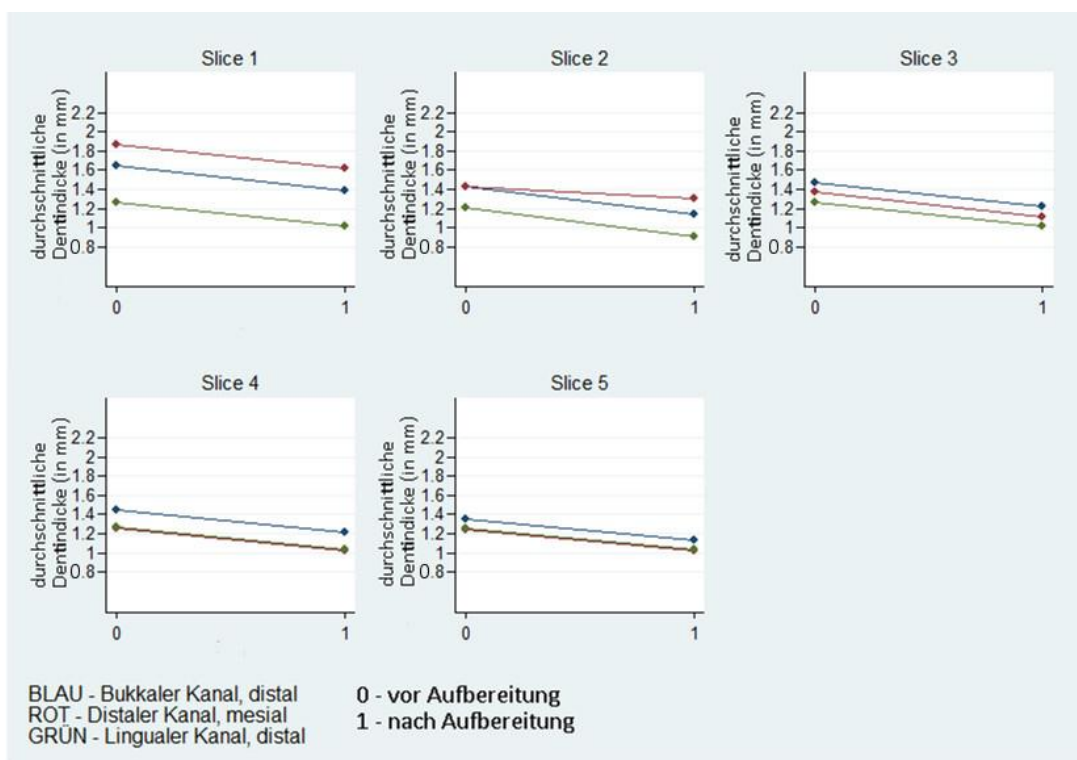


Abbildung 4.13: Darstellung mittlere Dentinstrecke vor und nach Aufbereitung, je Messrichtungen, für alle 5 Slices, Tabelle 4.21, F6 SkyTaper®.

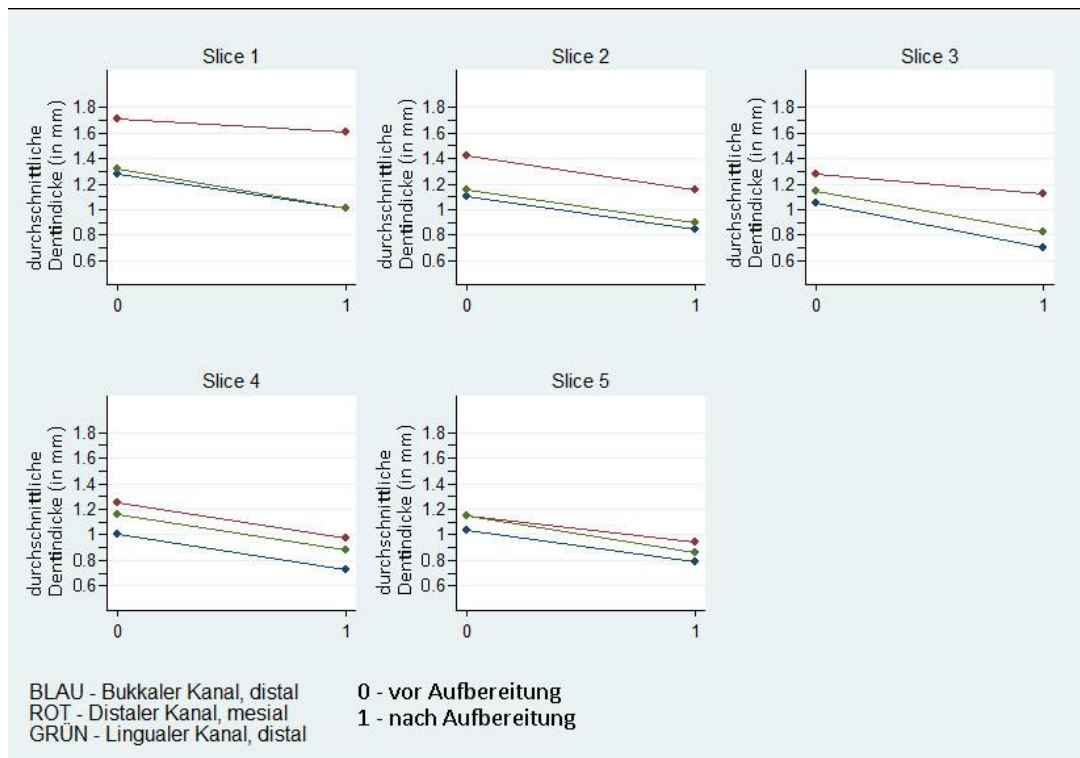


Abbildung 4.14: Darstellung mittlere Dentinstrecke vor und nach Aufbereitung, je Messrichtungen, für alle 5 Slices, Tabelle 4.21, WaveOne®.

Die Tabellen 4.20 und 4.21 zeigen eine Einteilung der durchschnittlichen Dentindicken je Slice und Messrichtung für alle Probezähne und jeweils für jede Gruppe (Feilensystem). Außerdem werden die minimalen und maximalen Dentindicken in farbiger Zuordnung zur jeweiligen Gruppe dargestellt. Die Tabelle 4.22 zeigt die durchschnittlichen Dentindicken vor und Tabelle 4.23 nach der Wurzelkanalaufbereitung. Sowohl vor als auch nach der Wurzelkanalaufbereitung konnte in der Gruppe WaveOne® die meisten minimalen und in der Gruppe F6 SkyTaper® die meisten maximalen Dentindicken verzeichnet werden. Die geringste gemessene Dentindicke befand sich in Slice 4 mesiobukkaler Wurzelkanal in distaler Richtung mit 0,370 mm in der Gruppe WaveOne®.

Tabelle 4.20: Messwerte vor Aufbereitung, je Feilensystem, für drei verschiedene Messrichtungen, Dentindicke und Slice.

Slice	Richtung	Durchschnitt gesamt	Durchschnitt ProTaper	Durchschnitt F6 SkyTaper	Durchschnitt WaveOne	MIN	MAX
1	lingualer Kanal distal	<b>1,375</b>	<b>1,525</b>	<b>1,282</b>	<b>1,318</b>	<b>0,920</b>	<b>1,930</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>1,433</b>	<b>1,355</b>	<b>1,665</b>	<b>1,278</b>	<b>0,980</b>	<b>2,510</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,885</b>	<b>2,120</b>	<b>1,827</b>	<b>1,708</b>	<b>1,180</b>	<b>2,670</b>
2	lingualer Kanal distal	<b>1,201</b>	<b>1,171</b>	<b>1,184</b>	<b>1,211</b>	<b>0,750</b>	<b>1,660</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>1,270</b>	<b>1,280</b>	<b>1,282</b>	<b>1,286</b>	<b>0,940</b>	<b>2,050</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,493</b>	<b>1,494</b>	<b>1,500</b>	<b>1,546</b>	<b>0,880</b>	<b>1,970</b>
3	lingualer Kanal distal	<b>1,229</b>	<b>1,214</b>	<b>1,211</b>	<b>1,234</b>	<b>0,830</b>	<b>1,580</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>1,261</b>	<b>1,279</b>	<b>1,281</b>	<b>1,285</b>	<b>0,850</b>	<b>2,350</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,352</b>	<b>1,366</b>	<b>1,371</b>	<b>1,398</b>	<b>0,750</b>	<b>1,830</b>
4	lingualer Kanal distal	<b>1,229</b>	<b>1,201</b>	<b>1,201</b>	<b>1,232</b>	<b>0,810</b>	<b>1,690</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>1,244</b>	<b>1,260</b>	<b>1,258</b>	<b>1,266</b>	<b>0,780</b>	<b>2,260</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,281</b>	<b>1,278</b>	<b>1,288</b>	<b>1,325</b>	<b>0,680</b>	<b>1,820</b>
5	lingualer Kanal distal	<b>1,209</b>	<b>1,194</b>	<b>1,186</b>	<b>1,201</b>	<b>0,800</b>	<b>1,700</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>1,228</b>	<b>1,230</b>	<b>1,241</b>	<b>1,251</b>	<b>0,770</b>	<b>1,650</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,226</b>	<b>1,224</b>	<b>1,241</b>	<b>1,263</b>	<b>0,640</b>	<b>1,850</b>

Tabelle 4.21: Messwerte nach Aufbereitung, je Feilensystem, für drei verschiedene Messrichtungen, Dentindicke und Slice.

Slice	Richtung	Durchschnitt gesamt	Durchschnitt ProTaper	Durchschnitt F6 SkyTaper	Durchschnitt WaveOne	MIN	MAX
1	lingualer Kanal distal	<b>1,119</b>	<b>1,347</b>	<b>0,995</b>	<b>1,015</b>	<b>0,510</b>	<b>1,710</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>1,181</b>	<b>1,160</b>	<b>1,370</b>	<b>1,012</b>	<b>0,760</b>	<b>2,330</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,751</b>	<b>1,982</b>	<b>1,660</b>	<b>1,612</b>	<b>1,150</b>	<b>2,550</b>
2	lingualer Kanal distal	<b>0,948</b>	<b>1,045</b>	<b>0,907</b>	<b>0,892</b>	<b>0,630</b>	<b>1,380</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>1,015</b>	<b>1,060</b>	<b>1,143</b>	<b>0,842</b>	<b>0,720</b>	<b>1,920</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,315</b>	<b>1,488</b>	<b>1,298</b>	<b>1,158</b>	<b>0,600</b>	<b>1,830</b>
3	lingualer Kanal distal	<b>0,944</b>	<b>1,023</b>	<b>0,980</b>	<b>0,830</b>	<b>0,570</b>	<b>1,230</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>0,976</b>	<b>1,022</b>	<b>1,207</b>	<b>0,700</b>	<b>0,480</b>	<b>2,230</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,199</b>	<b>1,322</b>	<b>1,153</b>	<b>1,122</b>	<b>0,550</b>	<b>1,700</b>
4	lingualer Kanal distal	<b>0,980</b>	<b>1,055</b>	<b>1,018</b>	<b>0,867</b>	<b>0,520</b>	<b>1,380</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>1,007</b>	<b>1,088</b>	<b>1,223</b>	<b>0,710</b>	<b>0,370</b>	<b>2,000</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,093</b>	<b>1,222</b>	<b>1,045</b>	<b>1,013</b>	<b>0,500</b>	<b>1,640</b>
5	lingualer Kanal distal	<b>0,987</b>	<b>1,078</b>	<b>1,020</b>	<b>0,863</b>	<b>0,480</b>	<b>1,420</b>
	bukkaler Kanal distal	<b>1,020</b>	<b>1,133</b>	<b>1,133</b>	<b>0,793</b>	<b>0,480</b>	<b>1,460</b>
	distaler Kanal mesial	<b>1,037</b>	<b>1,147</b>	<b>1,025</b>	<b>0,940</b>	<b>0,460</b>	<b>1,670</b>

## **5. Diskussion**

### **5.1. Diskussion der Methode**

Für die vorliegende in vitro Studie wurden aus einem Pool von extrahierten menschlichen Zähnen eine Auswahl von 18 Unterkiefermolaren mit je drei Wurzelkanälen getroffen. Diese 18 Zähne wurden durch einen Behandler in 3 Gruppen zu je 6 Zähnen aufgeteilt und randomisiert. Durch die Randomisierung wurde ein objektives Studienergebnis erzielt.

Die ausgewählten Zahngruppen sind sich ähnlich aber nicht identisch. Jeder Zahn besitzt eine individuelle Morphologie. Es wurden daher im Vorfeld der Studie Auswahlkriterien formuliert, um möglichst gleiche Versuchsbedingungen zu schaffen. Diese Auswahlkriterien waren ein abgeschlossenes Wurzelwachstum, sowie intakte und morphologisch ähnliche, leicht gekrümmte Wurzeln. Der Unterkiefermolar wird im klinischen Alltag am häufigsten endodontisch behandelt (Kirkevang et al., 2001; Bjørndal et al., 2006) und stellt damit ein repräsentatives Beispiel für die Untersuchung von Wurzelkanalinstrumenten dar. Aus diesem Grund wurden für die vorliegende Studie ausschließlich erste und zweite Unterkiefermolaren verwendet. Auch viele andere Autoren arbeiteten in ihren Untersuchungen mit dieser Zahngruppe (Kessler et al., 1983; Berutti & Fedon, 1992; Garcia Filho et al., 2003; Zhao et al., 2014).

Zur Bestimmung des Dentinabtrages im Wurzelkanal durch die verschiedenen Aufbereitungssysteme wurden in dieser Studie extrahierte humane Zähne verwendet. Das Verhalten von Wurzelkanalinstrumenten kann in einem natürlichen Wurzelkanal aufgrund der Struktur des Dentins und eines tatsächlichen Dentinabtrages authentisch widerspiegelt werden (Bertrand et al., 2001). Natürliche Zähne haben jedoch den Nachteil, dass ihre Anatomie sehr komplex sein kann und sie daher im Gegensatz zu künstlichen Wurzelkanalmodellen kaum standardisierbar sind (Dummer et al., 1991). Daher nutzen viele Studien in ihren Untersuchungen auch künstliche Wurzelkanalmodelle (Thompson & Dummer 2000; Griffiths et al., 2001). Die Beschaffenheit des natürlichen Wurzelkanalsystems kann ein Kunststoffmodell jedoch nicht nachbilden und daher ist es mit der klinischen Realität nur eingeschränkt vergleichbar (Bertrand et al., 2001). In der Regel bestehen konfektionierte Wurzelkanalmodelle aus Polymethylmethacrylat (PMMA, Acryl). Trotz ihrer guten Vergleichbarkeit mit einer idealisierten Präparationsform weisen Wurzelkanalmodelle vom Dentin abweichende Materialeigenschaften auf (Mayo et al., 1986; Kazemi et al., 1996; Bertrand et al., 2001). Durch rotierende Instrumente kann es zu Wärmeentwicklung und dadurch zum Erweichen des Acryls kommen (Kum et al. 2000). Dies stellt einen großen

Nachteil dar und führt zu einer erhöhten Gefahr der Feilenfraktur. Die Präparation von künstlichen Wurzelkanälen in Kunststoffblöcken spiegeln nicht das Verhalten der Instrumente in einem natürlichen Wurzelkanal wider (Sonntag et al. 2007). Weder die Dentinstruktur noch ein natürliches Verhalten des Dentinabtrages kann dargestellt werden.

Gesundes Dentin wird mit einer Knoop-Härte von 50 bis 70 KHN angegeben (Meredith et al., 1996). Dies entspricht einer Vickershärte von 60–70 VH. Kappert & Eichner, (2005) geben die Vickershärte von PMMA mit ca. 20 VH an. Gesundes Dentin hat somit eine dreimal höhere Vickershärte als PMMA. Es ergibt sich dadurch ein höherer Materialabtrag pro Zeiteinheit am konfektionierten Wurzelkanalmodell aus Polymethylmethacrylat (Kazemi et al., 1996). Lim & Webber (1985) konnten zeigen, dass Acryl weniger hart und kompressibel ist als Wurzelentin. Um Dentin zu präparieren muss im Vergleich zum Kunststoffmodell die doppelte Kraft aufgewendet werden (Lim & Webber, 1985). Im Gegensatz zum homogenen Acryl unterliegt humanes Dentin allerdings von Natur aus einer gewissen Variationsbreite in Härte und Mineralgehalt (Kazemi et al., 1996).

Auch wenn es unmöglich ist, natürliche Zähne zu standardisieren, so sind diese dennoch besser zur Untersuchung der Feilencharakteristika geeignet als Kunststoffmodelle. Das Verhalten und die Eigenschaften der Wurzelkanalfeile lassen sich nicht ohne weiteres von künstlichen Wurzelkanalmodellen auf humanes Dentin übertragen.

Das Mikro-CT hat in der Endodontie immer mehr an Bedeutung gewonnen. Diese nichtinvasive, zerstörungsfreie und hochauflösende Technologie ermöglicht eine vollständige zwei- sowie dreidimensionale Darstellung des Wurzelkanalsystems. Die erzeugten Bilddatensätze können digital bearbeitet werden, um die interne und externe Morphologie zu untersuchen. Es können beispielsweise Volumina vor und nach der Aufbereitung vermessen werden (Loch et al. 2013). Die innere und äußere Anatomie können sowohl gleichzeitig als auch getrennt voneinander wiedergegeben werden. Auch die visuelle Überlagerung der Wurzelkanäle vor und nach der Aufbereitung mit Wurzelkanalinstrumenten ist durch eine entsprechende Software realisierbar. Durch die zerstörungsfreie Arbeitsweise ist es möglich, Wurzelkanäle vor und nach der Aufbereitung durch Wurzelkanalinstrumente darzustellen und auf verschiedene Fragestellungen hin zu untersuchen (Rhodes et al., 1999; Bjørndal et al., 1999; Peters et al., 2000). Der Probenkörper kann für eine weitere Untersuchung wieder verwendet werden da er durch den Scanvorgang nicht verändert wird.

In der Vergangenheit musste ein Probenzahn zwangsläufig zerstört werden, um das Wurzelkanalsystem abbilden zu können. Frühe Methoden zur Herstellung eines körperlichen



Modells des Wurzelkanalsystems sind beispielsweise das Ausgießen mit heißem Metall (Preiswerk, 1903) oder Kautschuk (Hess, 1917). Später konnten Wurzelkanalmodelle mit Abformmassen (Gutierrez & Garcia, 1968) hergestellt werden. Diese Methoden haben den Nachteil, dass das ins Wurzelkanalsystem eingebrachte Material eventuell nicht vollständig ausfließt und die Kanalstrukturen unvollständig abgebildet werden. Bei jeder dieser Methoden muss letztendlich der Probenzahn zerstört werden, um den Ausguss zu gewinnen.

Auch eine Behandlung mit Chemikalien führt immer zu einer irreversiblen strukturellen Veränderung. Dazu zählen das Aufhellen der Zähne mit Wasserstoffperoxid (Spalteholz, 1911), das Entkalken mit Säuren und das Färben mit Eosin, Hämatoxylin (Hess, 1917) oder Tusche (Haga, 1968). Auch das Anfertigen von horizontalen oder vertikalen Zahnschnitten (Haga, 1968; Lim & Stock, 1987; Isom et al., 1995) und -schliffen (Miller, 1903; Loos, 1909) führt zur vollständigen oder teilweisen Zerstörung des Zahnes. Zur Visualisierung standen konventionelles zweidimensionales Röntgen (Gutierrez & Garcia, 1968; Lim & Stock, 1987; Cunningham & Senia, 1992; Isom et al., 1995) und das Mikroskop (Haga, 1968; Isom et al., 1995) zur Verfügung. Möglich war beispielsweise auch das Anfertigen von Fotografien mittels Fotomikroskop (Schneider et al., 1971) oder Digitalkamera (Suaia et al., 2010). Letztere konnten zu einem Computer transferiert und untersucht werden. Es konnte allerdings so immer lediglich ein zweidimensionales Bild von einer dreidimensionalen Struktur erzeugt werden.

Mayo et al. (1986) führten die computergestützte Bildgebung in die endodontische Forschung ein. Sie injizierten Kontrastmittel in Wurzelkanäle und machten anschließend Röntgenaufnahmen eines jeden Zahnes aus sechs festgelegten Winkeln. Eine Software kombinierte alle sechs Ansichten und errechnete ein dreidimensionales Bild der Wurzelkanäle. Mayo et al. (1986) erkannten viele mögliche Fehlerquellen bei der von ihnen angewendeten Untersuchungsmethode: Durch Fehler bei der Positionierung des Probezahnes, sowie bei der digitalen Überlagerung der Röntgenaufnahmen oder durch unzureichende Abgrenzung des Kontrastmittels gegenüber der Wurzelkanalwand kann es zu Bild-Artefakten und - daraus resultierend - zu Messungenauigkeiten kommen. Die Auflösungskapazität lag bei der damaligen Untersuchungsmethode zwischen 0,06 und 0,1 mm.

Peters et al. (2000) untersuchten zwölf extrahierte humane obere Molaren mittels Mikro-CT. Die Proben wurden mit einer Voxel-Größe von  $34 \times 34 \times 34 \mu\text{m}$  oder  $34 \times 34 \times 68 \mu\text{m}$  zu 150 bis 300 Slices pro Zahn gescannt. Für beide Auflösungen ergab sich laut Peters et al. (2000) eine akzeptable Bildqualität. Heutige Mikro-CT-Geräte zeichnen sich durch ihr enormes Auflösungsvermögen aus.

Um relevante von irrelevanten Bildinhalten sicher trennen zu können, müssen diese deutlich unterscheidbar sein. Eine sichere Unterscheidung zwischen beispielsweise Dentin und Wurzelkanal ist durch die sehr gute Bildqualität möglich (Peters et al., 2001). Das Grauwert-Histogramm ist für jede Probe individuell und unterliegt einer subjektiven Betrachtung. Die Messstrecken zur Ermittlung des Dentinabtrages wurden daher ausschließlich von einer Person erstellt.

## **5.2. Diskussion der Ergebnisse**

### **5.2.1. Dentinabtrag in den Wurzelkanälen**

In dieser Studie konnte festgestellt werden, dass alle drei untersuchten Feilensysteme einen signifikanten Dentinabtrag in alle Messrichtungen, unabhängig von Wurzelkanal und Messrichtung, erreicht haben. Das Feilensystem ProTaper Next® trug im Mittel im gesamten Wurzelkanalsystem am wenigsten Dentin im Vergleich zu den Systemen WaveOne® und F6 SkyTaper® ab. Im Vergleich von ProTaper Next® zu F6 SkyTaper® ergab sich kein signifikanter Unterschied bezüglich des Dentinabtrages. Im Vergleich von ProTaper Next® zu WaveOne® ergab sich hingegen ein signifikanter Unterschied. Für WaveOne® wurde 0,026mm mehr Abtrag beobachtet als für ProTaper Next®. Zwischen den Systemen WaveOne® und F6 SkyTaper® gab es keinen signifikanten Unterschied. In distalen Wurzelkanälen war der durchschnittliche Dentinabtrag für die drei Feilensysteme gleich (0,057 mm). An mesialen Wurzelkanälen trug das Feilensystem WaveOne® im Mittel 0,097 mm und damit am meisten Dentin ab. F6 SkyTaper® trug durchschnittlich 0,087 mm und ProTaper Next® dagegen mit 0,059 mm am wenigsten Dentin ab.

In der statistischen Analyse der vorliegenden Untersuchung wurde der Dentinabtrag innerhalb der gesamten Wurzellänge beurteilt. Eine Unterscheidung fand lediglich in mesiale und distale Wurzelkanäle statt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Studien wäre eine zusätzliche Gliederung der Messwerte in Wurzeldrittel denkbar.

Eine ähnliche Methode zur Ermittlung des Dentinabtrages wie in der vorliegenden Studie nutzen Lee et al. (2015). Die Messstrecken zur Ermittlung der Dentindicke wurden anhand von Bilddaten aus Mikro-CT-Scans konstruiert. Untersucht wurden durch Lee et al. (2015) die mesiolingualen und mesiobukkalen Wurzelkanäle von 37 ersten Unterkiefermolaren. Die Dicke des Dentins wurde nach mesial, distal und lateral jeweils in einer horizontalen Slice mit definiertem Start- und Stoppunkt gemessen. Lee et al. (2015) beurteilten die durchschnittlichen Dentindicken in vier Ebenen und kamen zu dem Ergebnis, dass die Dentindicke von koronal nach apikal abnimmt und sich die niedrigsten Dentindicken distal, im furkalen Areal und in

Apexnähe befinden. Auch die vorliegende Studie kam zu dem Ergebnis, dass sich an mesialen Wurzelkanälen in distaler Messrichtung die durchschnittlich geringsten Dentindicken sowohl vor (Gruppe 1 ProTaper Next®: 1,196 mm; Gruppe 2 F6 SkyTaper®: 1,096 mm; Gruppe 3 WaveOne®: 0,974 mm) als auch nach der Aufbereitung durch die untersuchten Feilensysteme (Gruppe 1 ProTaper Next®: 1,098 mm; Gruppe 2 F6 SkyTaper®: 0,946 mm; Gruppe 3 WaveOne®: 0,818 mm) befinden.

In der vorliegenden Studie wurden zusätzlich zu den mesialen Wurzelkanälen auch die Dentindicken der distalen Wurzelkanäle ermittelt.

Elnaghy & Elsaka (2014) untersuchten unter anderem den Dentinabtrag durch das Feilensystem ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA) an 60 mesiobukkale Wurzelkanälen mit einer Krümmung von 25 bis 35 Grad von ersten Unterkiefermolaren. In den Gruppen mit Gleitpfad (ProTaper Next® kombiniert mit ProGlider oder Path-File) wurde der Dentinabtrag in den drei Ebenen 3 mm, 5 mm, und 7 mm oberhalb des Apexes ermittelt. Die Werte zwischen 0,05 mm und 0,17 mm sind mit denen der vorliegenden Studie vergleichbar. Auch Bürklein et al. (2017) untersuchten den Dentinabtrag in Wurzelkanälen mit einem Krümmungswinkel von 25 bis 35 Grad durch die Feilensysteme F6 SkyTaper® (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Deutschland), OneShape® (Micro-Mega, Besancon Cedex, Frankreich) und Mtwo® (VDW, München, Deutschland). Für das Feilensystem F6 SkyTaper® konnten sie einen durchschnittlichen Dentinabtrag von 0,06 mm ermitteln. In der vorliegenden Studie wurde in den leicht gekrümmten distalen Wurzelkanälen ein durchschnittlicher Dentinabtrag von 0,057 mm gemessen. Der exakte Krümmungsgrad der Wurzelkanäle wurde nicht ermittelt. Lim & Stock (1987) konnten in ihrer Untersuchung an 71 ersten und zweiten Unterkiefermolaren mit einer Wurzelkanalkrümmung zwischen 10 und 42 Grad keinen Zusammenhang zwischen Krümmungsgrad und Perforationsrisiko feststellen.

Je höher die Menge an reduziertem Dentin, desto geringer ist der Frakturwiderstand eines endodontisch behandelten Zahnes (Trabert et al., 1978; Wilcox et al., 1997, Kishen, 2006). Eine übermäßige Vergrößerung des Wurzelkanalraums kann außerdem zu iatrogenen Verletzungen des Zahnes wie Perforationen oder Stripping führen (Júnior et al., 2014). Die Reduktion der Dentinwand auf einen Wert von unter 1 mm wird daher als kritisch für die Stabilität des Zahnes angesehen (Caputo & Standlee 1976, Pilo et al., 1998; Raiden et al., 1999; Katz et al., 2006). Dies stellt einen prädisponierenden Faktor für eine nachfolgende vertikale Wurzelfraktur dar (Trabert et al., 1978; Isom et al., 1995; Brasil et al., 2017).

Vor der Instrumentierung wurde in der vorliegenden Studie in der Gruppe 3 WaveOne® im mesiolingualen Wurzelkanal in distaler Richtung eine durchschnittliche Dentindicke von  $1,07 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$  und im mesiobukkalen Wurzelkanal in distaler Richtung von durchschnittlich  $0,96 \text{ mm} \pm 0,24 \text{ mm}$  gemessen. Dies zeigt, wie dünn die distale Dentinwand in mesialen Wurzelkanälen von Unterkiefermolaren von Natur aus sein kann. Umso wichtiger ist es, diese dünnen Dentinwände nicht zusätzlich durch exzessiven Dentinabtrag während der Wurzelkanalpräparation zu schwächen, insbesondere wenn im Anschluss an die endodontische Behandlung prothetische Maßnahmen wie Wurzelstiftinsertionen nötig sind. Brasil et al. (2017) merken ebenfalls an, dass eine übermäßige Wurzelkanalvergrößerung und damit verbundene Dentinentfernung den Zahn für Frakturen prädisponieren, entweder während der Obturations- und Restaurationsverfahren oder bei späterer Kaubelastung. Kishen (2006) stellt fest, dass auch endodontisch behandelte Zähne mit minimalem Verlust der Zahnschicht im Laufe der Zeit anfällig für Frakturen werden.

Nach Instrumentierung zeigten sich in der vorliegenden Studie in der Gruppe 3 WaveOne® und in der Gruppe 2 F6 SkyTaper® durchschnittliche Dentindicken von unter 1 mm. Für Gruppe 2 F6 SkyTaper® jeweils in distaler Richtung im mesiolingualen Wurzelkanal von durchschnittlich  $0,96 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$  und im mesiobukkalen Wurzelkanal von durchschnittlich  $0,99 \text{ mm} \pm 0,30 \text{ mm}$ . Für Gruppe 3 WaveOne® wurde im mesiobukkalen Wurzelkanal eine durchschnittliche Dentindicke von  $0,79 \text{ mm} \pm 0,22 \text{ mm}$  ermittelt. Im mesiolingualen Wurzelkanal in distaler Richtung wurden durchschnittlich  $0,92 \text{ mm} \pm 0,21 \text{ mm}$  und im distalen Wurzelkanal in mesialer Richtung konnten durchschnittlich  $0,99 \text{ mm} \pm 0,33 \text{ mm}$  ermittelt werden (siehe Tabelle 4.2). WaveOne® zeigt sich damit als das Feilensystem mit dem durchschnittlich höchsten Dentinabtrag in mesialen Wurzelkanälen und einer kritischen Dentindicke nach Instrumentierung von unter 1 mm in drei Messrichtungen. Auch F6 SkyTaper® unterschreitet in zwei Messrichtungen den kritischen Wert von 1 mm Restdentinstärke. In der Gruppe 1 ProTaper Next® wurden sowohl vor als auch nach Instrumentierung keine durchschnittlichen Dentinstärken von unter 1 mm gemessen, was auch mit der Aussage korreliert, dass ProTaper Next® sowohl im gesamten Wurzelkanalsystem als auch in mesialen Wurzelkanälen durchschnittlich am wenigsten Dentin abgetragen hat.

In der vorliegenden Untersuchung wurden die vollrotierenden Feilensysteme ProTaper Next® und F6 SkyTaper® mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne® verglichen. Das reziprok arbeitende System WaveOne® unterschied sich signifikant hinsichtlich des Dentinabtrages an mesialen Wurzelkanälen im Vergleich zum vollrotierenden System ProTaper Next®. Allerdings kann kein signifikanter Unterschied zum ebenfalls vollrotierenden System F6 SkyTaper®

ermittelt werden, sodass diese Studie keine definitiven Aussagen zum Einfluss der Arbeitsweise eines Aufbereitungssystems bezüglich des Dentinabtrages im Wurzelkanal zulässt.

You et al. (2011) untersuchten die vollrotierenden Feilensysteme ProTaper® (Dentsply Sirona, York, USA) und Profile® (Dentsply Sirona, York, USA) mit den reziprok arbeitenden Systemen WaveOne® (Dentsply Sirona, York, USA), und Reciproc® (VDW, München, Deutschland) hinsichtlich der Wurzelkanalausformung. You et al. (2011) konnten keinen signifikanten Unterschied zwischen den verglichenen Arbeitsweisen in allen untersuchten Parametern feststellen. Auch der Dentinabtrag unterschied sich nicht. Júnior et al. (2014) verglichen in ihrer Studie ebenfalls das reziproke System Reciproc® (VDW, München, Deutschland) mit dem vollrotierenden System Mtwo® (VDW, München, Deutschland). Auch sie konnten keinen signifikanten Unterschied im Dentinabtrag an mesialen Wurzelkanälen von Unterkiefermolaren feststellen. Die Arbeitsweise hatte keinen Einfluss auf das Ergebnis der Wurzelkanalaufbereitung für die untersuchten Systeme.

Die in dieser Studie untersuchten Feilensysteme weisen unterschiedliche Konizitäten auf. Die Feilensysteme WaveOne® und F6 SkyTaper® besitzen eine Konizität von 8% und 6%. Das Feilensystem ProTaper Next® weist eine progressive Konizität von 6% auf. Die unterschiedlichen Konizitäten der Instrumente könnten die Vergleichbarkeit beeinflussen. Die apikalen Größen der Aufbereitungsinstrumente in den jeweiligen Wurzelkanälen waren für jede Gruppe identisch. Das System WaveOne® weist den höchsten Taper auf und trug in der vorliegenden Studie an mesialen Wurzelkanälen im Mittel am meisten Dentin ab. Die höhere Konizität von WaveOne® könnte eine Ursache für den höheren Dentinabtrag darstellen (Zhao et al., 2014), welche zu einer höheren Steifigkeit des Instrumentes führen könnte (Thombson & Dummer, 1997; ElAyouti et al., 2008). Das Instrumentendesign könnte ebenfalls eine mögliche Ursache dieses Ergebnisses sein (Zhao et al., 2014). Die vorliegende Studie kann allerdings aufgrund der vielen differierenden Parameter wie Arbeitsweise, Metallurgie, Instrumentenquerschnitt und -design keine abschließende Aussage treffen, ob die Konizität Einfluss auf den Dentinabtrag hat. Auch Zhao et al. (2014) und Capar et al. (2014) verglichen Feilensysteme unterschiedlicher Konizität und identischem apikalen Instrumentendurchmesser miteinander ohne signifikante Unterschiede zwischen den Feilensystemen festzustellen.

ElAyouti et al. (2008) stellten in ihrer Studie an 90 ovalen Wurzelkanälen fest, dass Instrumente mit größerem Taper zwar effizienter die Wurzelkanalwand präparierten aber auch mehr Dentin entfernten. Verglichen wurden die rotierenden Feilensysteme Mtwo® (VDW, München, Deutschland) und ProTaper® (Dentsply Sirona, York, USA) welche eine Konizität von 4% und

6% aufwiesen mit NiTi-Handfeilen (Dentsply Sirona, York, USA) mit einer Konizität von 2%. Das Ergebnis der Untersuchung zeigte keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Mtwo® und ProTaper®. Die Präparation mit Mtwo® und ProTaper®-Instrumenten führte zu einer übermäßigen Entfernung des Dentins. In sechs Wurzelkanälen der Mtwo®-Gruppe (20%) und acht Wurzelkanälen der ProTaper®-Gruppe (27%) betrug die minimale Dicke der Dentinwand nach der Instrumentierung weniger als 0,5 mm. Auch in der vorliegenden Studie liegen minimale Dentindicken nach Instrumentierung von weniger als 0,5 mm vor (siehe Tabelle 4.23). ElAyouti et al. (2008) erklären dieses Ergebnis dadurch, dass Instrumente mit größerer Konizität (4% und mehr) steifer sind und somit zu mehr seitlichem Abtrag in den Dentinwänden führen.

Zandbiglari et al. (2006) beobachteten eine Erhöhung der Frakturgefahr von 25% nach Handinstrumentierung (Konizität: 2%), 22% nach Wurzelkanalerweiterung mit FlexMaster® (VDW, München, Deutschland) (Konizität: 2-6%) und 43,7% nach Präparation mit SystemGT® (Dentsply Sirona, York, USA) mit einer Konizität zwischen 4-12%. Zandbiglari et al. (2006) schlussfolgern aus ihren Daten, dass die Instrumentierung von Wurzelkanälen die Wurzeln deutlich schwächt.

Bier et al. (2009) untersuchten die Prävalenz von Dentinschädigungen nach Aufbereitung mit den rotierenden Feilensystemen ProTaper® (Dentsply Sirona, York, USA), ProFile® (Dentsply Sirona, York, USA), SystemGT® (Dentsply Sirona, York, USA), S-ApeX (FKG Dentaire SA, La Chaux-de-Fonds, Schweiz) und Flexofile®-Handfeilen (Dentsply Sirona, York, USA) an Unterkieferprämolaren. Keine Dentinschädigungen verursachten die Handfeile und das System S-ApeX. In den Gruppen ProTaper®, ProFile®, und SystemGT® konnten an 16%, 8% und 4% der aufbereiteten Zähne Dentinrisse oder -frakturen nachgewiesen werden. Bier et al. (2009) schlussfolgern aus diesem Ergebnis, dass maschinelle Präparationsmethoden das Wurzelentin schädigen können, denn alle Gruppen, die mit rotierenden NiTi-Feilen behandelt wurden, wiesen verschiedene Dentinschädigungen wie Frakturen, Dentinrisse oder unvollständige Frakturen auf. Eine Ausnahme stellte das Feilensystem S-ApeX dar, welches einen invertierten Taper aufweist. Ein erhöhter Taper erzeugt laut Bier et al. (2009) eine höhere Belastung auf die Dentinwand. Wilcox et al. (1997) vermuteten, dass die im Inneren des Wurzelkanals erzeugten Spannungen auf die Wurzeloberfläche übertragen werden und so zu Dentinschäden führen. Darüber hinaus sind wesentlich mehr Rotationen im Wurzelkanal für eine Präparation mit rotierenden NiTi-Feilen im Vergleich zu Handfeilen erforderlich (Pasqualini et al., 2008). Auch dies kann zur Bildung von Dentindefekten beitragen (Bier et al., 2009).

Der Instrumentenquerschnitt der drei in der vorliegenden Studie untersuchten Feilensysteme ist unterschiedlich gestaltet. Das Feilensystem ProTaper Next® besitzt ein viereckiges, F6 SkyTaper® ein doppel-S-förmiges und WaveOne® ein dreieckförmiges Querschnittsdesign. Es ergaben sich Unterschiede im durchschnittlichen Dentinabtrag sowohl im gesamten Wurzelkanalsystem als auch in mesialen Wurzelkanälen. Dies könnte auch durch den Feilenquerschnitt/-design beeinflusst sein. Allerdings war der durchschnittliche Dentinabtrag für alle drei Feilensysteme in distalen Wurzelkanälen gleich.

Sonntag et al. (2007) führten ihre Studie ebenfalls mit Feilensystemen unterschiedlichen Querschnitts durch. Verglichen wurden das Feilensystem K3™ (Kerr Corporation, West Collins, USA), mit einem konkav dreieckigen, Mtwo® (VDW, München, Deutschland) mit einem S-förmigen und ProTaper® (Dentsply Sirona, York, USA) mit einem konvex dreieckigen Querschnitt. Die Arbeitsgruppe bereitete 60 mesiale Wurzelkanäle von Unterkiefermolaren bis zur finalen Aufbereitungsgröße von 35/.04. auf und konnte keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Formgebung und den Dentinabtrag feststellen.

Außerdem unterscheiden sich die drei untersuchten Feilensysteme in ihrer Metallurgie. Die Feilensysteme ProTaper Next® und WaveOne® bestehen aus einer m-wire®-NiTi-Legierung. Das Feilensystem F6 SkyTaper® besteht hingegen aus einer konventionellen, austenitischen NiTi-Legierung. Die thermomechanische Behandlung der m-wire®-NiTi-Instrumente führt zu einer höheren Flexibilität der Instrumente (Zhao et al., 2014). In der vorliegenden Studie konnte kein Hinweis darauf gefunden werden, dass die unterschiedlichen metallurgischen Eigenschaften der untersuchten Feilensysteme Einfluss auf die Menge des Dentinabtrages hatten.

Brasil et al. (2017) untersuchten die beiden Feilensysteme ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA) und BT-RaCe (FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz) in mesialen Wurzelkanälen von Unterkiefermolaren mittels mikrocomputergestützter tomographischer Bildgebung. BT-RaCe wird aus konventioneller NiTi-Legierung gefertigt. Es gab keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Systemen hinsichtlich des Dentinabtrages. Die Ergebnisse von Brasil et al. (2017) sind vergleichbar mit denen der vorliegenden Studie.

### 5.2.2. Dentinabtrag an der Furkation

In der vorliegenden Studie wurden die Dentindicken in fünf verschiedenen Ebenen (Slice 1-5) unterhalb der Furkation vor Instrumentierung und nach Bearbeitung durch die Feilensysteme ProTaper Next®, WaveOne® und F6 SkyTaper® gemessen. So konnte der Dentinabtrag im Bereich der Furkation durch jedes der drei Feilensysteme ermittelt werden.

Die statistische Analyse ergab im Vergleich von ProTaper Next® zu F6 SkyTaper® keinen signifikanten Unterschied ( $p=0,23$ ) bezüglich des Dentinabtrages. Im Vergleich von ProTaper Next® zu WaveOne® lag ein signifikanter Unterschied ( $p=0,02$ ) vor. WaveOne® trug signifikant mehr Dentin ab im Vergleich zu ProTaper Next®. Im Vergleich von WaveOne® zu F6 SkyTaper® ergab sich kein signifikanter Unterschied ( $p=0,78$ ).

Berutti & Fedon (1992) beschrieben den Bereich 1,5 mm unterhalb der Furkation mesialer Wurzelkanäle von ersten Unterkiefermolaren mit 1,2-1,3 mm Dentinstärke als die Zone mit der niedrigsten Dentindicke („danger zone“) und damit dem höchsten Risiko für iatrogene Komplikationen während der Wurzelkanalbehandlung. Auch Kessler et al. (1983) kamen in ihrer Untersuchung an 60 Unterkiefermolaren zu dem Ergebnis, dass in der mesialen Wurzel durch zu hohen Dentinabtrag in Richtung der Bifurkation die Gefahr der Schwächung der Wurzel bzw. ein Perforation am größten ist. Der Bereich mit den durchschnittlich niedrigsten Dentindicken lag bei Kessler et al. (1983) allerdings 2,8 mm apikal der Furkation.

Harris et al. (2013) untersuchten 22 erste untere Molaren mittels Mikro-CT. Die Dentindicken der mesialen Wurzel nach distal und der distalen Wurzel nach mesial wurden vom Apex nach koronal in 0,5-mm-Schritten für die ersten 6 mm und ab diesem Punkt in 1,0-mm-Schritten bis zur Furkation vermessen. Zusätzlich wurde jeder Zahn 1,5 mm unterhalb der Furkation untersucht. Harris et al. (2013) stimmen mit Berutti & Fedon (1992) überein, dass 1,5 mm unterhalb der Furkation die Dentindicke mit durchschnittlich 1,28 mm sehr dünn ist. Zusätzlich konstatieren Harris et al. (2013), dass in diesem Bereich die Dentindicke mit 0,81 mm noch dünner sein kann als die von Berutti & Fedon (1992) angegebenen 1,2-1,3 mm. Harris et al. (2013) beschreiben anhand ihrer Messergebnisse sogar die gesamte mesiale und distale zur Furkation zeigende Wurzeloberfläche als „danger zone“.

Die vorliegende Studie stellt die Ergebnisse für den Bereich unterhalb der Furkation im Abstand von jeweils 0,5 mm in fünf Slices vom Startpunkt Furkation (entspr. 0 mm, Slice 1) bis 2 mm apikal der Furkation (Slice 5) dar. Die Methode zur Ermittlung der Dentindicke ist vergleichbar mit denen von Berutti & Fedon (1992) und Harris et al. (2013). Die Messwerte von Berutti & Fedon (1992) konnte auch die vorliegende Studie bestätigen. In Slice 4



(entspr. 1,5 mm unterhalb der Furkation) lagen die Dentindicken im mesiolingualen Wurzelkanal nach distal vor Instrumentierung bei durchschnittlich 1,23 mm [0,81 mm (Min), 1,69 mm (Max)]. Für den mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal lagen die Dentindicken im Durchschnitt bei 1,24 mm [0,78 mm (Min), 2,26 mm (Max)] und für den distalen Wurzelkanal nach mesial lagen die Werte im Mittel bei 1,28 mm [0,68 mm (Min) bis 1,74 mm (Max)]. Auch mit den Ergebnissen von Harris et al. (2013) sind diese Messwerte vergleichbar.

Yang et al. (2016) untersuchten den Einfluss der Erfahrung des Behandlers mit dem Feilensystem WaveOne®. Dazu wurden 30 Unterkiefermolaren mit zwei separaten mesialen Kanälen aufbereitet und vor und nach Aufbereitung mittels Mikro-CT gescannt. Yang et al. (2016) geben an, dass es keine definierte Mindestdentindicke gibt, die eine mögliche Perforation oder Fraktur ausschließt. Vielmehr komme es auf die Größe der Kräfte, die auf die Wurzelwand wirken, die Dentinstärke vor Instrumentierung, Wurzelkanalkrümmung und Erfahrung des Behandlers an. In der vorliegenden Studie können die mittleren minimalen Dentindicken überwiegend an den Probezähnen ermittelt werden, welche mit WaveOne®, dem Feilensystem mit dem höchsten Taper (8%), aufbereitet wurden. Dies gilt für die Werte vor und nach Aufbereitung und bestätigt die Aussage von Yang et al. (2016), dass die Dentinstärke vor Instrumentierung einen Einfluss auf die Dentinstärke nach der Aufbereitung hat. Die geringste gemessene Dentinstärke wurde in der Gruppe WaveOne® nach der Aufbereitung mit 0,37 mm in Slice 4 des mesiobukkalen Wurzelkanals in distaler Messrichtung ermittelt.

Für alle in der vorliegenden Studie untersuchten Feilen konnten im untersuchten Bereich der Furkation nach der Aufbereitung Dentindicken nachgewiesen werden, die den für die Stabilität des Zahnes als kritisch geltenden Wert von 1 mm (Caputo & Standlee 1976, Pilo et al., 1998; Raiden et al., 1999; Katz et al., 2006), unterschreiten (siehe Tabellen 4.22 und 4.23).

Das Feilensystem ProTaper Next® reduzierte die Dentinwand im Bereich bis 2 mm unterhalb der Furkation im Mittel am mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal von 1,277 mm auf 1,104 mm, am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal von 1,285 mm auf 1,111 mm. Der durchschnittliche Dentinabtrag betrug 0,173 mm. Das Feilensystem F6 SkyTaper® reduzierte die Dentinwand im Mittel am mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal von 1,472 mm auf 1,215 mm, am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal von 1,272 mm auf 0,984 mm. Am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal fand ein höherer Dentinabtrag statt. WaveOne® reduzierte die Dentinwand am mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal durchschnittlich von 1,101 mm auf 0,811 mm und am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal durchschnittlich von 1,188 mm auf 0,893 mm. Am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal fand ein höherer

Dentinabtrag statt als am mesiobukkalen Wurzelkanal nach distal. Eine mögliche Ursache für dieses Ergebnis ist die in allen fünf Slices gemessene durchschnittlich geringere Dentinwandstärke des mesiolingualen Wurzelkanals gegenüber dem mesiobukkalen Wurzelkanal vor Aufbereitung. Für den mesiolingualen Wurzelkanal betrug die durchschnittliche Dentinwandstärke (Slice 1 bis 5) insgesamt 1,25 mm und für den mesiobukkalen Wurzelkanal 1,29 mm.

Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen von Júnior et al. (2014). Die Arbeitsgruppe untersuchten den Dentinabtrag der Feilensysteme Reciproc® (VDW, München, Deutschland) und Mtwo® (VDW, München, Deutschland) im zervikalen Drittel der mesialen Wurzelkanäle von 12 Unterkiefermolaren. Vor Instrumentierung wurde 1 mm unterhalb der Furkation in distaler Richtung eine minimale Dentindicke von durchschnittlich  $1,27 \text{ mm} \pm 0,26 \text{ mm}$  in der Gruppe Mtwo® und  $1,15 \text{ mm} \pm 0,26 \text{ mm}$  in der Gruppe Reciproc® gemessen. Es fanden jeweils zwei Aufbereitungssequenzen mit den beiden Feilensystemen bis ISO-Größe 25 und ISO-Größe 40 statt. Für das Feilensystem Mtwo® ermittelten Júnior et al. (2014) durchschnittliche minimale Dentindicken nach der Aufbereitung bis ISO-Größe 25 von  $0,97 \text{ mm} \pm 0,38 \text{ mm}$  und bis ISO-Größe 40 von  $0,91 \text{ mm} \pm 0,37 \text{ mm}$ . Für das System Reciproc® wurden ähnliche Werte gemessen. Die minimale Dentindicke betrug hier für die Aufbereitungsgröße ISO 25  $0,84 \text{ mm} \pm 0,30 \text{ mm}$  und für ISO-Größe 40  $0,80 \text{ mm} \pm 0,30 \text{ mm}$ .

In einer Studie durch Mahran & AboEl-Fotouh (2008) an stark gekrümmten (30-40 Grad) mesiobukkalen Wurzelkanälen von 45 ersten Unterkiefermolaren wurden die drei Instrumentensysteme ProTaper® (Dentsply Sirona, York, USA), Hero Shaper® (Micro-Mega, Besancon Cedex, Frankreich) und Gates-Glidden-Bohrer (Dentsply Sirona, York, USA) mit Flex-R® Handfeile (Integra® Miltex®, York, USA) verglichen. Ziel war es, die verbleibende Dicke des zervikalen Dentins und den Dentinabtrag im gesamten Wurzelkanal unter Verwendung der Multislice-Computertomographie zu ermitteln. Die Dentindicken der ersten drei Schnittebenen (Slicestärke: 0,75 mm) unterhalb der Orifizien wurden an den mesialen und distalen Wurzelkanalseiten im Bereich der Furkation vermessen. Die Proben wurden in drei Gruppen eingeteilt. Der Gruppe I wurde ProTaper®, Gruppe II Hero Shaper® und Gruppe III Gates-Glidden-Bohrer mit Flex-R® Handfeilen zugeordnet. Die mittleren mesialen Dentindicken wiesen nach Instrumentierung keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei untersuchten Gruppen auf. Die mittleren distalen Dentindicken lagen vor Instrumentierung bei  $1,4 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ ;  $1,32 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$ ; und  $1,28 \text{ mm} \pm 0,31 \text{ mm}$  für die Gruppen I, II, und III. Nach Instrumentierung wurden signifikante Unterschiede der drei untersuchten Feilensysteme in Bezug auf den prozentualen Anteil der Reduzierung der distalen Dentindicken

festgestellt. Die Verwendung von Gates-Glidden-Bohrern (Gruppe III) erhöhte die potenzielle Häufigkeit von Strip-Perforationen im Bereich der Furkation. Das Feilensystem Hero Shaper® trug signifikant mehr Dentin von der distalen Wurzelkanalwand im Bereich der Furkation ab als ProTaper®. Die Verwendung von ProTaper® verringerte die Inzidenz für das Auftreten von Strip-Perforationen. Keine der in der vorliegenden Studie untersuchten Feilensysteme verursachte eine Perforation im Bereich der Furkation. Ob die verbliebenen Dentinwände den Kräften bei einer Wurzelfüllung standhalten würden oder ob es zu Frakturen im Bereich der Furkation kommen könnte, wurde nicht untersucht.

Eine stark ausgedünnte Dentinwand kann auch der Ursprung von Microcracks und Dentinfrakturen sein, die erst bei späterer Physiologischer Kaubelastung entstehen. (Brasil et al., 2017). Lim & Stock (1987) nahmen an, dass die bei der Wurzelfüllung per lateraler Kondensation erzeugten Kräfte ausreichen könnten, um eine Perforation zu erzeugen und Wurzelfüllmaterial durch die Wurzelkanalwand zu pressen, wenn die verbliebene Wurzelkanalwand nach der Instrumentierung zu dünn ist.

Sie schlussfolgerten, dass in 36% der von ihnen aufbereiteten Unterkiefermolaren eine Strip-Perforation bei der Wurzelkanalfüllung aufgetreten wäre, denn die zur Furkation zeigende Dentinwand wies lediglich eine mittlere Dentindicke von 0,2 bis 0,3 mm auf.

In der vorliegenden Studie wurden alle mesialen Wurzelkanäle bis ISO-Größe 25 und distale Wurzelkanäle bis ISO-Größe 40 aufbereitet. Es konnte kein Zusammenhang zwischen Dentinabtrag im Bereich der Furkation und der apikalen Aufbereitungsgröße festgestellt werden. Júnior et al. (2014) verglichen in ihrer Studie das reziproke System Reciproc® (VDW, München, Deutschland) und das vollrotierende System Mtwo® (VDW, München, Deutschland). Ziel war es, den Effekt unterschiedlicher apikaler Aufbereitungsgrößen auf den Dentinabtrag im Bereich der „danger zone“ von Unterkiefermolaren unter Zuhilfenahme der Mikro-CT zu untersuchen. Nach dem ersten Scanvorgang wurden die Probenzähne jeweils mit dem System Mtwo® bis 25/.06 und mit dem System Reciproc® bis 25/.08 aufbereitet und gescannt. Danach fanden eine zweite Aufbereitungssequenz mit Mtwo® bis 40/.04 und mit Reciproc® bis 40/.06 und ein dritter Scanvorgang statt. Eine Auswertung der Bilddaten ermöglichte den Vergleich des Dentinabtrages und der verbliebenen Dentinwandstärke zwischen den beiden Aufbereitungsgrößen. Keines der untersuchten Systeme trug übermäßig viel Dentin im Furkationsbereich ab. Es gab keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die verbliebene Dentindicke. Die apikale Aufbereitungsgröße hatte keinen Einfluss auf den Dentinabtrag. Ob die unterschiedlichen Konizitäten der verwendeten Instrumente einen

Einfluss auf den Dentinabtrag haben wurde nicht untersucht. Saber et al. (2015) wiederum sind der Meinung, dass eine Aufbereitungsgröße, die ISO 30 übersteigt, die Gefahr der Wurzelkanalbegradigung und der unerwünschten Schwächung des Zahnes birgt.

Während der vorliegenden Studie frakturierte keine der eingesetzten Feilen. Es konnten außerdem trotz mitunter stark reduzierter Dentindicken keine iatrogenen Perforationen beobachten werden. Die Proben wurden unter optimalen Bedingungen in vitro aufbereitet.

### **5.3. Schlussfolgerungen**

Aus der mechanischen Wurzelkanalpräparation mit den hier untersuchten Aufbereitungssystemen resultierte eine Reduzierung der Stärke/ Dicke der Wurzelkanalwand in allen Messrichtungen. An distalen Wurzelkanälen fand die größte Dentinwandreduzierung durch die Feilensysteme WaveOne® und F6 SkyTaper® nach mesial und durch ProTaper Next® nach distal statt. An mesialen Wurzelkanälen konnte der größte Dentinabtrag durch alle drei Feilensysteme in distaler Richtung ermittelt werden. Im Bereich bis 2 mm unterhalb der Furkation war die durchschnittliche Dentinwandreduzierung durch das Feilensystem ProTaper Next® in allen Messrichtungen gleich, durch WaveOne® und F6 SkyTaper® am mesiolingualen Wurzelkanal nach distal am höchsten.

Die natürliche Dicke der Wurzelkanalwand an Unterkiefermolaren ist mitunter sehr gering. Im Bereich der Furkation kann diese bereits vor der Aufbereitung reduziert sein und sollte daher im Rahmen der Aufbereitung besonders respektiert und geschont werden um eine zusätzliche Schwächung zu vermeiden.

Keines der untersuchten Feilensysteme führte zu einer iatrogenen Verletzung der Zahnwurzel im Sinne einer Perforation oder Strip-Perforation.

Alle drei untersuchten Feilensysteme bieten unter den angegebenen Studienbedingungen, die Voraussetzung für eine sichere endodontische Behandlung.

Inwieweit Parameter wie Arbeitsweise, Metallurgie, Feilendesign oder Konizität der Aufbereitungssysteme einen Einfluss auf die Reduktion des Wurzelkanaldentins während der Wurzelkanalpräparation haben, kann anhand dieser Studie nicht abschließend geklärt werden. Es bedarf weiterer Untersuchungen, die sich dieser Fragestellung widmen.

## 6. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war der Vergleich von drei verschiedenen maschinellen Nickel-Titan-Feilensystemen hinsichtlich der Menge von abgetragenen Wurzelkanalwanddentin. Die Restdentinstärken nach Wurzelkanalpräparation wurden sowohl in mesialen und distalen Wurzelkanälen von koronal nach apikal bzw. über die gesamte Wurzelkanallänge als auch im Bereich der Furkation („danger zone“) ermittelt.

In die Studie wurden 18 Unterkiefermolaren mit jeweils zwei mesialen und einem distalen Wurzelkanal eingeschlossen. Die 18 Probenzähne wurden mittels Mikro-CT gescannt, zufällig in drei Gruppen eingeteilt und mit den vollrotierenden Nickel-Titan-Systemen ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA), F6 SkyTaper® (Komet, Brasseler GmbH, Lemgo, Deutschland) und dem reziproken Nickel-Titan-System WaveOne® (Dentsply Sirona, York, USA) aufbereitet. Alle mesialen Wurzelkanäle wurden bis ISO-Größe 25 und alle distalen Wurzelkanäle bis ISO-Größe 40 aufbereitet. Anschließend erfolgte ein weiterer Mikro-CT-Scanvorgang. Mit Hilfe der Visualisierungssoftware Amira 5.6 wurden die Mikro-CT-Bilder im Anschluss analysiert und der Dentinabtrag über die gesamte Wurzelkanallänge ermittelt.

Das Feilensystem ProTaper Next® trug im Mittel vom gesamten Wurzelkanal am wenigsten Dentin ab. Im Vergleich zu F6 SkyTaper® ergab sich kein signifikanter Unterschied bezüglich des Dentinabtrages. Im Vergleich von ProTaper Next® zu WaveOne® ergab sich ein signifikanter Unterschied. WaveOne® trug im Mittel mehr Dentin ab als ProTaper Next® und F6 SkyTaper®. Zwischen den Systemen WaveOne® und F6 SkyTaper® gab es keinen signifikanten Unterschied. In distalen Wurzelkanälen war der durchschnittliche Dentinabtrag für die drei Feilensysteme ähnlich. An mesialen Wurzelkanälen trug das Feilensystem WaveOne® im Mittel am meisten Dentin ab. ProTaper Next® dagegen trug am wenigsten Dentin ab.

Nach Instrumentierung wurden in der Gruppe 3 WaveOne® in drei Messrichtungen minimale Dentindicken von unter 1 mm beobachtet. In der Gruppe 2 F6 SkyTaper® konnten in zwei Messrichtungen minimale Restdentinstärken von weniger als 1 mm ermittelt werden. In der Gruppe 1 ProTaper Next® wurden nach Instrumentierung keine durchschnittlichen Dentinstärken von unter 1 mm gemessen.

Im Bereich der Furkation trug ProTaper Next® am wenigsten Dentin ab. Es ergab sich zwischen den Systemen ProTaper Next® und F6 SkyTaper® kein signifikanter Unterschied bezüglich des Dentinabtrages. Im Vergleich von ProTaper Next® zu WaveOne® ergab sich ein

signifikanter Unterschied. WaveOne® trug hier signifikant mehr Dentin ab. Im Vergleich von WaveOne® zu F6 SkyTaper® ergab sich kein signifikanter Unterschied.

Die geringste gemessene Dentinstärke wurde in der Gruppe 3 WaveOne® nach der Aufbereitung mit 0,37 mm in Slice 4 (entspr. 1,5 mm unterhalb der Furkation) des mesiobukkalen Wurzelkanals in distaler Messrichtung ermittelt. Für alle drei Feilensysteme konnten im Bereich der Furkation nach der Aufbereitung Restdentindicken (Min/Max-Werte) von weniger als 1 mm nachgewiesen werden.

Die Arbeitshypothese „Das Ein-Feilen-System F6 SkyTaper® (Komet, Gebrüder Brasseler, Lemgo, Deutschland) weist signifikante Unterschiede im Vergleich zu den Feilensystemen ProTaper Next® (Dentsply Sirona, York, USA) sowie WaveOne® (Dentsply Sirona, York, USA) bezüglich des Dentinabtrages auf.“ konnte nicht bestätigt werden.

Die Konizität des Feilensystems könnte einen Einfluß auf die Menge des abgetragenen Dentins haben. Das Feilensystem WaveOne® (Taper 8%) trug in der vorliegenden Studie an mesialen Wurzelkanälen im Mittel am meisten Dentin ab. Die höhere Konizität von WaveOne® gegenüber ProTaper Next® (Taper 6%) und F6SkyTaper (Taper 6%), könnte eine Ursache für den höheren Dentinabtrag darstellen. Ob das Feilendesign und die Metallurgie der Instrumente einen Einfluss auf den Dentinabtrag haben, kann anhand dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden und sollte in weiterführenden Studien untersucht werden. Es traten keine Feilenfrakturen oder Perforationen auf. Mit jedem der drei untersuchten Feilensysteme ist unter den angegebenen Studienbedingungen, eine sichere endodontische Behandlung möglich.

## 7. Literaturverzeichnis

Abou-Rass M, Frank AL, Glick DH. The anticurvature filing method to prepare the curved root canal. *Journal of the American Dental Association* 1980; 101(5): 792-794.

Alapati SB, Brantley WA, Iijima M, Clark WAT, Kovarik L, Buie C. Metallurgical Characterization of a New Nickel-Titanium Wire for Rotary Endodontic Instruments. *Journal of Endodontics* 2009; 35(11): 1589-1593.

Allam CR. Treatment of stripping perforations. *Journal of Endodontics* 1996; 22(12): 699-702.

Amira® 5.5. User's Guide. ©1995-2013; Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB), Germany. ©1999-2013; Visualization Sciences Group, SAS.

Ankrum MT, Hartwell GR, Truitt JE. K3 Endo, ProTaper, and ProFile systems: breakage and distortion in severely curved roots of molars. *Journal of Endodontics* 2004; 30(4): 234-237.

Arens FC, Hoen MM, Steiman HR, Dietz GC. Evaluation of single-use rotary nickel-titanium instruments. *Journal of Endodontics* 2003; 29(10): 664-666.

Arnold M. Diagnostik der Vertikalfraktur. *Endodontie* 2017; 26(2): 203–212

Assif D & Gorfil C. Biomechanical considerations in restoring endodontically treated teeth. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1994; 71(6): 565-567.

Ba- Hattab RAS. Vergleichende Untersuchungen zur Aufbereitung von Wurzelkanälen mit rotierenden Nickel- Titan- Instrumenten [Promotion]. *Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde der Universität Rostock*. Rostock, 2013.

Baumann M & Beer R. *Farbatlant der Zahnmedizin, Endodontie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York 2008; S.44, 45, 56, 57.

Baugh D & Wallace J. Middle Mesial Canal of the Mandibular First Molar: A Case Report and Literature Review. *Journal of Endodontics* 2004; 30(3): 185–186.

Becher I, Lindner A, Schulze P. *Lateinisch-griechischer Wortschatz in der Medizin*. Verl. Volk u. Gesundheit 1986; S.86.

Beer R & Baumann MA. *Praktische Endodontie*. Urban&Schwarzenberg, München-Wien-Schwarzenberg 1994; S. 24, 25, 94, 95.

Bertrand MF, Lupi-Pégurier L, Médioni E, Muller M, Bolla M. Curved molar root canal preparations using Hero 642 rotary nickel-titanium instruments. *International Endodontic Journal* 2001; 34: 631-636.

Berutti E & Fedon G. Thickness of cementum/dentin in mesial roots of mandibular first molars. *Journal of Endodontics* 1992; 18(11): 545-548.

Bier CAS, Shemesh H, Tanomaru-Filho M, Wesselink PR, Wu MK. The Ability of Different Nickel-Titanium Rotary Instruments to Induce Dentinal Damage During Canal Preparation. *Journal of Endodontics* 2009; 35(2): 236-238.

Bjørndal L, Carlsen O, Thuesen G, Darvann T, Kreiborg S. External and internal macromorphology in 3D-reconstructed maxillary molars using computerized X-ray Mikrotomography. *International Endodontic Journal* 1999; 32(1): 3-9.

Bjørndal L, Laustsen MH, Reit C. Root canal treatment in Denmark is most often carried out in carious vital molar teeth and retreatments are rare. *International Endodontic Journal* 2006; 39(10): 785-790.

Bogaerts P. Treatment of root perforations with calcium hydroxide and Super EBA cement: a clinical report. *International Endodontic Journal* 1997; 30(3): 210-219.

Brasil SC, Marceliano-Alves MF, Marques ML, Grillo JP, Lacerda MFLS, Alves FRF, Siqueira JF, Provenzano JC. Canal Transportation, Unprepared Areas, and Dentin Removal after Preparation with BT-RaCe and ProTaper Next Systems. *Journal of Endodontics* 2017; 43(10): 1683-1687.

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): 449-461.

Bürklein S, Börjes L, Schäfer E. Comparison of preparation of curved root canals with Hyflex CM and Revo-S rotary nickel-titanium instruments. *International Endodontic Journal* 2013; 47(5): 470-476.

Bürklein S & Schäfer E. Single-File-Systeme zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. *wissen kompakt, Zahnärztliche Fortbildung* 2013; 7(2): 13–26.



Bürklein S, Jäger PG, Schäfer E. Apical transportation and canal straightening with different continuously tapered rotary file systems in severely curved root canals: F6 SkyTaper® and OneShape versus Mtwo. *International Endodontic Journal* 2017; 50(10): 983–990.

Bürklein S, Werneke M, Schäfer E. Impact of glide path preparation on the incidence of dentinal defects after preparation of severely curved root canals. *Quintessence International* 2018; 49(8): 607-613.

Bürklein S, Flüch S, Schäfer E. Shaping ability of reciprocating single-file systems in severely curved canals: WaveOne and Reciproc versus WaveOne Gold and Reciproc blue. *Odontology* 2019; 107(1): 96-102.

Buzug TM. Einführung in die Computertomographie, Mathematisch-physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2004; S.56.

Carabelli G. Systematisches Handbuch der Zahnheilkunde. Bd. II. Anatomie des Mundes. Kupfertafeln v. Carabelli's Anatomie des Mundes. Wien. Braumüller u. Seidel, 1844

Carlsen O, Alexandersen V. Radix paramolaris in permanent mandibular molars: identification and morphology. *Scandinavian Journal of Dental Research* 1991; 99(3): 189-195.

Capar ID, Arslan H, Akcay M, Banu Uysal B. Effects of ProTaper Universal, ProTaper Next, and HyFlex Instruments on Crack Formation in Dentin. *Journal of Endodontics* 2014; 40(9): 1482–1484.

Caputo AA & Standlee JP. Pins and posts: why, when and how. *Dental Clinics of North America* 1976; 20(2): 299-311

Cooke HG & Cox FL. C-shaped canal configurations in mandibular molars. *Journal of the American Dental Association* 1979; 99(5): 836-839.

Cunningham CJ, Senia ES. A three-dimensional study of canal curvatures in the mesial roots of mandibular molars. *Journal of Endodontics* 1992; 18(6): 294-300.

Davis SR, Brayton SM, Goldmann M. The morphology of the prepared root canal: a study utilizing injectable silicone. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology* 1972; 34(4): 642-648.

Dowker SE, Davis GR, Elliott JC. X-ray Mikro- tomography: nondestructive three-dimensional imaging for in vitro endodontic studies. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 1997; 83(4): 510-516.

Dummer PMH, Alodeh MHA, Al-Omari MAO. A method for the construction of simulated root canals in clear resin blocks. *International Endodontic Journal* 1991; 24(2): 63-66.

Dwivedi S, Dwivedi CD, Mittal N. Correlation of root dentin thickness and length of roots in mesial roots of mandibular molars. *Journal of Endodontics* 2014; 40(9): 1435-1438.

ElAyouti A, Chu AL, Kimionis I, Klein C, Weiger R, Löst C. Efficacy of rotary instruments with greater taper in preparing oval root canals. *International Endodontic Journal* 2008; 41(12): 1088-1092.

Elnaghy AM & Elsaka SE. Evaluation of Root Canal Transportation, Centering Ratio, and Remaining Dentin Thickness Associated with ProTaper Next Instruments with and without Glide Path. *Journal of Endodontics* 2014; 40(12): 2053-2056.

Engelke K, Karolczak M, Lutz A. Mikro-CT Technologie und Applikationen zur Erfassung von Knochenarchitektur. *Der Radiologe* 1999; 39(3): 203-212.

Ehrensberger C. Schneller Gleiter in der Endo erhöht Erfolgssicherheit. *Endotribune German Edition* 2014; 11: 20.

Euchner A. Qualitativer Vergleich der Darstellung endodontisch behandelter Zähne in unterschiedlichen bildgebenden Verfahren [Promotion]. Ulm, 2014; Medizinischen Fakultät der Universität Ulm. Department für Zahnheilkunde der Universität.

Euler H. Makroskopische Anatomie der Zähne, Lehrbuch der Zahnheilkunde. Springer, Berlin, Heidelberg, 1934, S.54.

Ford NL, Thornton MM, Holdsworth DW. Fundamental image quality limits for Mikrocomputed tomography in small animals. *Medical Physics* 2003; 30(11): 2869-2877.

Furri M. Differences in the confluence of mesial canals in mandibular molar teeth with three or four root canals. *International Endodontic Journal* 2008; 41(9): 777-780.

Garcia Filho PF, Letra A, Menezes R. Danger zone in mandibular molars before Instrumentierung: an in vitro study. *Journal of Applied Oral Science* 2003; 11(4): 324-326.

Glosson CR, Haller RH, Dove SB, Del Rio CE. A comparison of root canal preparations using NiTi hand, NiTi engine driven, and K-Flex endodontic instruments. *Journal of Endodontics* 1995; 21(3): 146-151.

„Good clinical practice“: Die Wurzelkanalbehandlung. Stellungnahme des Endodontie-Beirats der DGZ. Gemeinsame Stellungnahme der DGZ und der DGZMK 2007; DZZ 60 (2005) 8.

Griffiths IT, Chassot AL, Nascimento MF, Bryant ST, Dummer PMH. Canal shapes produced sequentially during Instrumentierung with Quantec SC rotary nickel-titanium instruments: a study in simulated canals. International Endodontic Journal 2001; 34(2): 107-112.

Gutierrez JH & Garcia J. Mikroskopische und makroskopische Untersuchung der Ergebnisse der mechanischen Vorbereitung von Wurzelkanälen. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology 1968; 25(1): 108-116.

Gutmann JL & Gao Y. Alteration in the inherent metallic and surface properties of nickel-titanium root canal instruments to enhance performance, durability and safety: a focused review. International Endodontic Journal 2012 ;45(2): 113-28.

Haga CS. Mikroskopische Messungen von Wurzelkanalvorbereitungen nach Instrumentierung. International Endodontic Journal 1968; 2(3): 41-46.

Hammad M, Qualtrough A, Silikas N. Evaluation of Root Canal Obturation: A Three-dimensional In Vitro Study. Journal of Endodontics 2009; 35(4): 541-544.

Harris SP, Bowles WR, Fok A, McClanahan SB. An Anatomic Investigation of the Mandibular First Molar using Mikro-Computed Tomography. Journal of Endodontics 2013; 39(11): 1374-1378.

Hess W. Zur Anatomie der Wurzelkanäle des menschlichen Gebisses mit Berücksichtigung der feineren Verzweigungen am Foramen apicale [Habilitationsschrift]. Zürich 1917.

Holcomb JQ, Pitts DL, Nicholls JJ. Further investigation of spreader loads required to cause vertical root fracture during lateraler Kondensation. Journal of Endodontics 1987; 13(6): 277-284.

Hübscher W, Barbakow F, Peters OA. Root-kanalvorbereitung mit FlexMaster: Kanalformen analysiert durch Mikro-computierte Tomographie. International Endodontic Journal 2003; 36(11): 740-747.

Hülsmann M, Hahn W, Nordmeyer S. Komplikationen während der Wurzelkanalirrigation. Endodontic Topics 2009; 16: 27-63.

Hülsmann M & Tulus G. Der dritte mesiale Wurzelkanal in Unterkiefermolaren („middle mesial“). *Endodontie* 2010; 19(2): 123-131.

Ingle JI, Bakland LK, Baumgartner JC. *Ingle's ENDODONTICS 6*. BC Decker Inc, Hamilton, Ontario 2008; S. 209, 917.

Isom TL, DMD, Marshall JG, Baumgartner JC. Evaluation of Root Thickness in Curved Canals after Flaring. *Journal of Endodontics* 1995; 21(7): 368-371.

James BL, Brown CE, Legan JJ, Moore BK, Vail mm. An in vitro evaluation of the contents of root canals obturated with gutta percha and AH-26 sealer or Resilon and Epiphany sealer. *Journal of Endodontics* 2007; 33(11): 1359-1363.

Júnior ASA, Cavenago BC, Ordinola-Zapata R, Clovis Monteiro Bramante GDD, Duarte MAH. The Effect of Larger Apical Preparations in the Danger Zone of Lower Molars Prepared Using the Mtwo and Reciproc Systems. *Journal of Endodontics* 2014; 40(11): 1855-1859.

Kappert FH & Eichner K. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Grundlagen und Verarbeitung*, 8. Auflage. Stuttgart, New York, Georg Thieme Verlag, 2005, S.27.

Katz A, Wasenstein-Kohn S, Tamse A, Zuckerman O. Residual dentin thickness in bifurcated maxillary premolars after root canal and dowel space preparation. *Journal of Endodontics* 2006, 32(3): 202-205.

Kaval ME, Capar ID, Ertas H, Sen BH. Comparative evaluation of cyclic fatigue resistance of four different nickel-titanium rotary files with different cross-sectional designs and alloy properties. *Clinical Oral Investigations* 2017; 21(5): 1527-1530.

Kazemi RB, Stenman E, Spangberg LSW. Machining efficiency and wear resistance of nickel-titanium endodontic files. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 1996; 81(5): 596-602.

Kessler JR, Peters DD, Lorton L. Comparison of the relative risk of molar root perforations using various endodontic Instrumentierung techniques. *Journal of Endodontics* 1983; 9(10): 439-447.

Kim HC, Kwak SW, Cheung GS, Ko DH, Chung SM, 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): 541-544.

Kishen A. Mechanisms and risk factors for fracture predilection in endodontically treated teeth. *Endodontic Topics* 2006; 13(1): 57-83.

Kirkevang LL, Horsted-Bindslev P, Ørstavik D, Wenzel A. A comparison of the quality of root canal treatment in two Danish subpopulations examined 1974-75 and 1997-98. *International Endodontic Journal* 2001; 34(8): 607-612.

Kum K, Spängberg L, Cha BY, Jung Il-Young, Lee S, Young L. Shaping Ability of Three ProFile Rotary Instrumentation Techniques in Simulated Resin Root Canals. *Journal of Endodontics* 2000; 26(12): 719-723.

Kuttler S, McLean A, Dorn S, Fischzang A. The impact of post space preparation with Gates-Glidden drills on residual dentin thickness in distal roots of mandibular molars. *The Journal of the American Dental Association* 2004; 135(7): 903-909.

Kvinnslund I, Oswald RJ, Halse A, Gronningsaeter AG. A clinical and roentgenological study of 55 cases of root perforation. *International Endodontic Journal* 1989; 22(2): 75-84.

Lee JK, Yoo YJ, Perinpanayagam H, Ha BH, Lim SM, Oh SR. Three-dimensional modelling and concurrent measurements of root anatomy in mandibular first molar mesial roots using Mikro-computed tomography. *International Endodontic Journal* 2015; 48(4): 380-389.

Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (2017). Amira [Internet] Stand: 2011-10-18, [zitiert am 19.9.2017].

URL: <https://www.lrz.de/services/software/grafik/amira/> Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Garching bei München 2016.

<https://www.lrz.de/services/software/grafik/amira/>

Lim KC & Webber J. The validity of simulated root canals for the investigation of the prepared root canal shape. *International Endodontic Journal* 1985; 18(4):240-246.

Lim SS & Stock CJ. The risk of perforation in the curved canal: anticurvature filing compared with the stepback technique. *International Endodontic Journal* 1987; 20(1): 33-39.

Lim Y, Park S, Kim H, Min K. Comparison of the centering ability of Wave·One and Reciproc nickel-titanium instruments in simulated curved canals. *Restorative Dentistry & Endodontics* 2013 Feb; 38(1): 21-25.

Liu J. Characterization of New Rotary Endodontic Instruments Fabricated from Special Thermomechanically Processed NiTi Wire [Promotion]. Ohio State University 2009; OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center.

Loch C, Schwass DR, Kieser JA, Fordyce RE. Use of Mikro-computed tomography for dental studies in modern and fossil odontocetes: potential applications and limitations. NAMMCO Scientific Publications 2013; 10: 1-24.

Loos R. Topographie der Pulpahöhle mit Rücksicht auf die Präparation der Kavität. Österr.-Ung. V. f. Z. 1909, S.40, 929.

Lynn EA. Conventional root canal therapy of C-shaped mandibular second molar, A case report. New York State Dental Journal 2006; 72(6): 32-34.

Ma JZ, Shen Y, Al-Ashaw AJ, Khaleel HY, Yang Y. Mikro-computed tomography evaluation of the removal of calcium hydroxide medicament from C-shaped root canals of mandibular second molars. International Endodontic Journal 2015; 48(4): 333-341.

Mahran AH & AboEl-Fotouh MM. Comparison of Effects of ProTaper, HeroShaper, and Gates Glidden Burs on Cervical Dentin Thickness and Root Canal Volume by Using Multislice Computed Tomography. Journal of Endodontics 2008; 34(10): 1219–1222.

Mayo CV, Montgomery S, de Rio C. A computerized method for evaluating root canal morphology. Journal of Endodontics 1986; 12(1): 2-7.

Melton DC, Krell KV, Michel WF. Anatomical and Histological Features of C-Shaped Canals in Mandibular Second Molars. Journal of Endodontics 1991; 17(8): 384-388.

Meredith N, Sherriff M, Setchell DJ, Swanson SAV. Measurement of the Mikrohardness and young's modulus of human enamel and dentine using an indentation technique. Archives of Oral Biology 1996; 41(6): 539-545.

Michaud R, Burgess J, Barfield R, Cakir D, McNeal S, Eleazer P. Volumetric expansion of gutta-percha in contact with eugenol. Journal of Endodontics 2008; 34(12): 1528-1532.

Miller WD. Lehrbuch der konservierenden Zahnheilkunde. G. Thieme Leipzig 1904.

Özok AR, van der Sluis LW, Wu MK, Wesselink PR. Sealing ability of a new polydimethylsiloxane-based root canal filling material. Journal of Endodontics 2008; 34(2): 204-207.

Parashos P & Messer HH. Rotary NiTi Instrument Fracture and its Consequences. *Journal of Endodontics* 2006; 32(11): 1031-1043.

Parthasarathy B, Manje Gowda PG, Sridhara KS, Subbaraya R. Four canalled and three rooted mandibular first molar (Radix Entomolaris) -Report of 2 cases. *Journal of Dental Sciences and Research* 2011; 2(2): 71-73.

Pasqualini D, Scotti N, Tamagnone L, Ellena F, Berutti E. Hand-operated and Rotary ProTaper Instruments: A Comparison of Working Time and Number of Rotations in Simulated Root Canals. *Journal of Endodontics* 2008; 34(3): 314-317.

Pérez-Higueras JJ, Arias A, DDS, de la Macorra J, Peters OA. Differences in Cyclic Fatigue Resistance between ProTaper Next and ProTaper Universal Instruments at Different Levels. *Journal of Endodontics* 2014; 40(9): 1477-1481.

Peters OA, Laib A, Ruegsegger P, Barbakow F. Three-dimensional Analysis of Root Canal Geometry by Highresolution Computed Tomography. *Journal of Dental Research* 2000; 79(6): 1405-1409.

Peters OA., Schonenberger K., Laib A. Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by Mikro computed tomography. *International Endodontic Journal* 2001; 34(3): 221-230.

Peters OA, Peters CI, Schönenberger K, Barbakow F. ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by Mikro CT. *International Endodontic Journal* 2003; 36(2): 86-92.

Peters OA, Boessler C, Paqué F. Root canal preparation with a novel nickel-titanium instrument evaluated with Mikro-computed tomography: canal surface preparation over time. *Journal of Endodontics* 2010; 36(6): 1068-7102.

Petersson K, Hasselgren G, Tronstad L. Endodontic treatment of experimental root perforations in dog teeth. *Endodontics & Dental Traumatology* 1985; 1(1): 22-28.

Pilo R, Corcino, G, Tamse, A. Residual dentin thickness in mandibular premolars prepared with hand and rotatory instruments. *Journal of Endodontics* 1998; 24(6): 401-404.

Pineda F & Kuttler Y. Mesiodistal and buccolingual roentgenographic investigation of 7,275 root canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology* 1972; 33(1): 101-110.

Preiswerk G. Lehrbuch und Atlas der Zahnheilkunde mit Einschluß der Mund-Krankheiten. Munich: J. F. Lehmann; 1903.

Raiden G, Costa L, Koss S, Hernandez JL, Acenolaza V. Residual thickness of root in first maxillary premolars with post space preparation. *Journal of Endodontics* 1999; 25(7): 502-505.

Rhodes JS, Pitt Ford TR, Lynch JA, Liepins PJ, Curtis RV. Mikro-computed tomography: a new tool for experimental endodontology. *International Endodontic Journal* 1999; 32(3): 165-170.

Roane JB, Sabala CL, Duncanson MG. The „Balanced Force “concept for instrumentation of curved canals. *Journal of Endodontics* 1985; 11(5): 203-211.

Roggendorf MJ, Legner M, Ebert J, Fillery E, Frankenberger R, Friedman S. Mikro-CT evaluation of residual material in canals filled with Activ GP or GuttaFlow following removal with NiTi instruments. *International Endodontic Journal* 2010; 43(3): 200-209.

Roggendorf M, Ebert J, Frankenberger R. Aktuelle Entwicklungen der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. Georg Thieme Verlag KG Stuttgart New York 2015.

Ruddle CJ. Hydrodynamic Disinfection “Tsunami” Endodontics. *International Dentistry* 2007; 11(4): 6-18.

Ruddle CJ, Machtou P, West JD. The shaping movement 5th generation technology. *Dentistry Today* 2013; 32(4): 94-99.

Saber SEDM, Nagy MM, Schäfer E. Comparative evaluation of the shaping ability of WaveOne, Reciproc and OneShape single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *International Endodontic Journal* 2015; 48(1): 109–114.

Saber SEDM, Nagy MM, Schäfer E. Comparative evaluation of the shaping ability of ProTaper Next, iRaCe and Hyflex CM rotary NiTi files in severely curved root canals. *International Endodontic Journal* 2015; 48(2): 131-136.

Sajad M, Misgar OH, Farooq R, Purra AR, Ahangar FA. Evaluation of canal centering ability after preparation with f6 Sky Taper single continuous file systems with or without glide path files. *International Journal of Applied Dental Sciences* 2018; 4(1): 25-28.



- Sathorn C, Palamara JEA, Palamara D, Messer HH. Effect of Root Canal Size and External Root Surface Morphology on Fracture Susceptibility and Pattern: A Finite Element Analysis. *Journal of Endodontics* 2005; 31(4): 288-292.
- Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JEA, Messer HH. Defects in Rotary Nickel-Titanium Files After Clinical Use, *Journal of Endodontics* 2000; 26(3): 161-165.
- Sauáia TS, Gomes BP, Pinheiro ET. Thickness of dentine in mesial roots of mandibular molars with different lengths. *International Endodontic Journal* 2010; 43(7):5 55-559.
- Schneck ERK. Quantifizierung des dreidimensionalen glomerulären Kapillarsystems von Schweinen mittels der Mikro- und Nano- Computertomographie [Promotion]. Fachbereich Humanmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen, medizinisches Zentrum für Radiologie des Universitätsklinikums Gießen und Marburg, Standort Gießen, Klinik für diagnostische Radiologie. VVB Laufersweiler Verlag, Gießen 2013
- Silva LJM, Pessoa OF, Teixeira MBG, Gouveia CH, Braga RR. Mikro-CT evaluation of calcium hydroxide removal through passive ultrasonic irrigation associated with or without an additional instrument. *International Endodontic Journal* 2015; 48(8): 768-773.
- Schlichting R. Die Aufbereitung mit reziproker Technik. *ZWP spezial* 2013; 12: 10-14.
- Sinai IH. Endodontic perforations: their prognosis and treatment. *Journal of the American Dental Association* 1977; 95(1): 90-95.
- Skidmore AE & Bjorndal A. Root canal morphology of the human mandibular first molar. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology* 1971; 32(5): 778-784.
- Sonntag D, Stachniss-Carp S, Stachniss C, Stachniss V. Determination of root canal curvatures before and after canal preparation (partII): A method based on numeric calculus. *Australian Endodontic Journal* 2006; 32(1): 16-25.
- Sonntag D, Ott M, Kook K, Stachniss V. Root canal preparation with the NiTi systems K3, Mtwo and ProTaper. *Australian Endodontic Journal* 2007; 33(2): 73–81.
- Spalteholz W. Über das Durchsichtigmachen von menschlichen und tierischen Präparaten, nebst Anhang: Über Knochenfärbung. Leipzig: S. Hirzel; 1911.
- StataCorp. 2015; Stata Statistical Software. Release 14. College Station, TX: StataCorp LP.
- Stewart GG. The importance of chemomechanical preparation of the root canal. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology* 1955; 8(9): 993-997.

Stock CJR. Anatomy, access and canal length measurement. *Journal of the British Endodontic Society* 1979; 12(s1): 37-44.

Stock CJR, Gulabivala K, Walker RT. *Endodontie*. Elsevier GmbH, Urban& Fischer, München 2005; S. 132, 153.

Swain MV & Xue J. State of the Art of Mikro-CT Applications in Dental Research. *International Journal of Oral Science* 2009; 1(4): 177-188.

Tay FR, Gu L, Schoeffel GJ, Wimmer C, Susin L. Effect of Vapor Lock on Root Canal Debridement by Using a Side-vented Needle for Positive-pressure Irrigant Delivery. *Journal of Endodontics* 2010; 36(4): 745-750.

Thombson SA & Dummer PMH. Shaping ability of ProFile.04 Taper Series 29 rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. *International Endodontic Journal* 1997; 30(1): 8-15.

Thompson SA & Dummer PMH. Shaping ability of Hero 642 rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals: Part 2. *International Endodontic Journal* 2000; 33(3): 255-261.

Thombson SA. An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *International Endodontic Journal* 2000; 33(4): 297-310.

Trabert KG, Caputo AA, Abou-Rass M. Tooth fracture-a comparison of endodontic and restorative treatments. *Journal of Endodontics* 1978; 4(11): 341-345.

Uzunoglu E & Görduysus M. Apical Extrusion of Debris and Irrigant using Novel Preparation Systems. *Journal of Contemporary Dental Practice* 2014; 15(4): 423-427.

Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 1984; 58(5): 589-599.

Vertucci FJ. Root canal morphology and its relationship to endodontic procedures. *Endodontic Topics* 2005; 10(1): 3-29.

Voigt L. Vergleichende In-vitro-Studie zur maschinellen Wurzelkanalpräparation mit den Nickel-Titan-Feilen-Systemen ProTaper Next®, F6 SkyTaper® und WaveOne® [Promotion]. Poliklinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Endodontie der Universitätsmedizin der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald. Greifswald, 2017.

Walia HM, 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.

Webber J, Machtou P, Pertot W, Kuttler S, Ruddle C, West J. The WaveOne single-file reciprocating system. *roots* 2011; 1: 28-33.

Wilcox LR, Roskelley C, Sutton, T. The relationship of root canal enlargement to finger-spreader induced vertical root fracture. *Journal of Endodontics* 1997; 23(8): 533-534.

Yang Y, Shen Y, Ma J, Cao Y, Haapasalo M. A Mikro-Computed Tomographic Assessment of the Influence of Operator's Experience on the Quality of WaveOne Instrumentierung. *Journal of Endodontics* 2016, 42(8): 1258-1262.

Yoldas O, Yilmaz S, Atakan G, Kuden C, Kasan Z. Dentinal Microcrack Formation during Root Canal Preparations by Different NiTi Rotary Instruments and the Self-Adjusting File. *Journal of Endodontics* 2012; 38(2): 232-235.

Yoo Y & Cho Y. A comparison of the shaping ability of reciprocating NiTi instruments in simulated curved canals. *Restorative Dentistry and Endodontics* 2012; 37(4): 220-227.

You S, Kim H, Bae K, Baek S, Kum K, Lee W. Shaping Ability of Reciprocating Motion in Curved Root Canals: A Comparative Study with Mikro-Computed Tomography. *Journal of Endodontics* 2011; 37(9): 1296-1300.

Young GR, Parashos P, Messer HH. The principles of techniques for cleaning root canals. *Australian Dental Journal Supplement* 2007; 52(1): 52-63.

Young JM & Van Vliet KJ. Predicting in vivo failure of pseudoelastic NiTi devices under low cycle, high amplitude fatigue. *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials* 2005; 72B(1): 17-26.

Zandbiglari T, Davids H, Schäfer E. Influence of instrument taper on the resistance to fracture of endodontically treated roots. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 2006; 101(1): 126-131.

Zhao D, Shen Y, Peng B, Haapasalo M. Root Canal Preparation of Mandibular Molars with 3 Nickel-Titanium Rotary Instruments: A Mikro-Computed Tomographic Study. *Journal of Endodontics* 2014; 40(11): 1860-1864.

## 8. Anhang



Universitätsmedizin Greifswald • Fleischmannstraße 8 • D-17475 Greifswald

Universitätsmedizin Greifswald  
Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Poliklinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Endodontologie  
Herr Dr. Michael Drefs  
Walther-Rathenau-Straße 42a

D-17475 Greifswald

Studientitel: Untersuchung der Wurzelkanalmorphologie vor und nach  
Instrumentation mit 3 verschiedenen maschinellen Nickel-Titan-  
Feilsystemen unter Nutzung des Mikro-CTs  
Antrag vom: 15.08.2014  
Eingegangen am: 18.08.2014  
Interne Reg.Nr.: BB 089/14

### Stellungnahme der Ethikkommission

Sehr geehrter Herr Dr. Drefs,

die Ethikkommission der Universitätsmedizin Greifswald hat die zum o.g. Versuchsplan eingereichten Unterlagen in ihrer Sitzung am 26.08.2014 geprüft.

Die Kommission stellte mehrheitlich fest, dass gegen die Durchführung der Studie keine ethischen und rechtlichen Bedenken bestehen, und befürwortet deshalb das Vorhaben.

Unbenommen dieser Stellungnahme empfiehlt die Ethikkommission für die zukünftige Verwendung extrahierter Zähne zu Forschungszwecken, vorab die Einwilligung der Patienten einzuholen. Empfehlungen für die Formulierung von Patienteninformation und Einwilligungserklärung finden Sie auf der Homepage der Ethikkommission.

Die Ethik-Kommission macht darauf aufmerksam, dass die ethische und rechtliche Verantwortung für die Durchführung des Forschungsvorhabens beim Studienleiter und allen beteiligten Ärzten liegt. Zusammensetzung und Arbeitsweise entsprechen den gesetzlichen Bestimmungen. Den Beratungen der Kommission liegt die Deklaration von Helsinki in der aktuellen Fassung zugrunde.

Die Mitglieder der Kommission wünschen Ihnen viel Erfolg bei der Durchführung des Vorhabens.

Mit freundlichen Grüßen

  
Prof. Dr. W. Siegmund  
Stellv. Vorsitzender der Ethikkommission

### Ethikkommission

GESCHÄFTSSTELLE  
Universitätsmedizin Greifswald  
Ethikkommission  
Institut für Pharmakologie  
Felix-Hausdorff-Str.3  
D-17487 Greifswald

BEARBEITER  
Frau Dr. K. Salje

DATUM  
27.08.2014

Telefon:  
+49 (0)3834 86-5644

Telefax:  
+49 (0)3834 86-5631

E-mail:  
ethik@uni-greifswald.de

Internet:  
www.medizin.uni-greifswald.de

Bankverbindung:  
Deutsche Bundesbank Rostock  
Konto-Nr. 130 015 30  
BLZ 130 000 00

USI ID:  
DE1375B4813

SEITE 1/2

UNIVERSITÄTSMEDIZIN GREIFSWALD · KÖRPERSCHAFT DES ÖFFENTLICHEN RECHTS  
VORSTAND: Prof. Rainer Biffar (Vorstandsvorsitzender) Gunter Götal Dr. Thorsten Wygold  
AUF SICHTSRATSVORSITZENDER: Sebastian Schröder  
Fleischmannstraße 8 · 17475 Greifswald · Tel.: +49(0)3834 86-0 · www.medizin.uni-greifswald.de

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2.1: Links und mittig zweiwurzelige Unterkiefermolaren, rechts dreiwurzelliger Unterkiefermolar. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 2.2: Melton-Klassifikation, links Kategorie I, mittig Kategorie II, rechts Kategorie III. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 2.3: Wurzelkanalkonfigurationen nach Vertucci (2005). (Vertucci FJ. Root canal morphology and its relationship to endodontic procedures. Endodontic Topics 2005; 10(1):3–29, S.11.)
- Abbildung 2.4: „Danger zone“ eines unteren Molaren (rote Pfeile). (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 2.5: ProTaper Next® Sequenz. (ProTaper Next Anleitung pdf, S.4, ©Dentsply DeTrey, 20.2.2013)
- Abbildung 2.6: Viereckiger Querschnitt bei ProTaper Next®, exzentrisch rotierend. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 2.7: S-förmiger Querschnitt bei F6 SkyTaper®. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 2.8: F6 SkyTaper® Sequenz. (<https://www.doctoros.it/prodotti/f6-skytaper-un-nuovo-livello-di-vantaggi-nella-sagomatura-del-canale-radicolare>)
- Abbildung 2.9: WaveOne® Sequenz. (WaveOne Klinische Anwendung, S.2)
- Abbildung 2.10a: koronaler konvexer dreieckiger Querschnitt bei WaveOne®. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 2.10b: konkaver Querschnitt am apikalen Ende bei WaveOne®. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 3.1: Objekthalterung mit eingebettetem Zahn. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. L. Voigt)
- Abbildung 3.2: Schema zum Versuchsaufbau. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 3.3: Mikrocomputertomograph XRadia XCT-200 X-Ray (links), Probenschlitten mit Objekthalter (rechts). (Abbildung stammt von der Autorin)

- Abbildung 3.4: Darstellung eines Einzelbildes (Slice) in Amira 5.6. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 3.5: Darstellung im Volren-Modus, achsengerechtes Einstellen der Zähne, links Zahn vor der Aufbereitung, rechts Zahn nach der Aufbereitung. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 3.6: Start- und Endpunkt der Streckenmessung. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 3.7: Konstruktion der Messstrecken (rot dargestellt) in anatomischen Richtungen im Orthoslice-Modus, Gegenüberstellung der gleichen Slice links vor und rechts nach Aufbereitung. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 3.8: links Zahn vor Aufbereitung, rechts Zahn nach Aufbereitung mit Darstellung des Feilenganges. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 3.9: Darstellung der Furkation als Bestimmung des Startpunktes für die Ermittlung des Dentinabtrages im Bereich der Furkation. Links mit Ansicht der Volumendarstellung der Wurzeln des entsprechenden Zahnes. (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 3.10: Messstrecken im Bereich der Furkation (rot dargestellt). (Abbildung stammt von der Autorin)
- Abbildung 4.1: Darstellung des Dentinabtrages für die einzelnen Feilensysteme vor und nach Aufbereitung in allen Wurzelkanälen. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.2: Darstellung des Dentinabtrages für die einzelnen Feilensysteme vor und nach Aufbereitung in distalen Wurzelkanälen. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.3: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.3), ProTaper Next®, distale Wurzelkanäle. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.4: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.3), F6 SkyTaper®, distale Wurzelkanäle. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

- Abbildung 4.5: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.3), WaveOne®, distale Wurzelkanäle. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.6: Darstellung des Dentinabtrages für die einzelnen Feilensysteme vor und nach Aufbereitung in mesialen Wurzelkanälen. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.7: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.4), ProTaper Next®, mesiale Wurzelkanäle. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.8: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.4), F6 SkyTaper®, mesiale Wurzelkanäle. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.9: Darstellung des Dentinabtrages (Tabelle 4.4), WaveOne® mesiale Wurzelkanäle. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.10: Darstellung des Dentinabtrages für die einzelnen Feilensysteme vor und nach Aufbereitung an der Furkation. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.11: Darstellung des Dentinabtrages, je Wurzelkanal, vor und nach der Aufbereitung. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.12: Darstellung mittlere Dentinstrecke vor und nach Aufbereitung, je Messrichtungen, für alle 5 Slices, Tabelle 4.21, ProTaper Next®. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.13: Darstellung mittlere Dentinstrecke vor und nach Aufbereitung, je Messrichtungen, für alle 5 Slices, Tabelle 4.21, F6 SkyTaper®. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Abbildung 4.14: Darstellung mittlere Dentinstrecke vor und nach Aufbereitung, je Messrichtungen, für alle 5 Slices, Tabelle 4.21, WaveOne®. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

## Tabellenverzeichnis

- Tabelle 4.1: Übersicht, alle Wurzelkanäle. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.2: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Gruppe (Feilensystem) und der Dentindicke (N=5746; p für Interaktion 0,03). (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.3: Übersicht der Messwerte (in mm) vor und nach Aufbereitung, getrennt nach Feilensystem, Wurzelkanal und Messrichtung (N=5746). (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.4: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vorher/nachher) und Messrichtung und der Dentindicke (distaler Kanal: N=744; mesiale Kanäle: N=1068). (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.5: Übersicht, distale Wurzelkanäle. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.6: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Gruppe (Feilensystem) und der Dentindicke (N=2368). (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.7: mittlerer Dentinabtrag für unterschiedliche Richtungen in distalen Wurzelkanälen, ProTaper Next®. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.8: mittlerer Dentinabtrag für unterschiedliche Messrichtungen in distalen Wurzelkanälen, F6 SkyTaper®. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.9: mittlerer Dentinabtrag in unterschiedliche Messrichtungen in distalen Wurzelkanälen, WaveOne®. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.10: Übersicht, mesiale Wurzelkanäle. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)
- Tabelle 4.11: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Gruppe (Feilensystem) und Dentindicke (N=3378). (mit



freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

Tabelle 4.12: mittlerer Dentinabtrag für die verschiedenen Messrichtungen in mesialen Wurzelkanälen, ProTaper Next®. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

Tabelle 4.13: mittlerer Dentinabtrag für die verschiedenen Messrichtungen in mesialen Wurzelkanälen, F6 SkyTaper®. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

Tabelle 4.14: mittlerer Dentinabtrag für die verschiedenen Messrichtungen in mesialen Wurzelkanälen, WaveOne®. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

Tabelle 4.15: Übersicht, an der Furkation. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

Tabelle 4.16: Übersicht der Messwerte (in mm) vor und nach der Aufbereitung, getrennt nach Feilensystem, Wurzelkanal und Messrichtung (N=270; N=30 je Wurzelkanal). (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

Tabelle 4.17: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Gruppe (Feilensystem) und Dentinabtrag (N=540). (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

Tabelle 4.18: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach der Aufbereitung), Wurzelkanal und dem Messwert (N=180); je Feilensystem (über alle 5 Slices). (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

Tabelle 4.19: gemischtes Modell für den Zusammenhang zwischen Zeit (vor und nach Aufbereitung), Wurzelkanal und der Dentindicke, je Feilensystem und Slice. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. B. Holtfreter)

Tabelle 4.20: Messwerte vor Aufbereitung, je Feilensystem, für drei verschiedene Messrichtungen, Dentindicke und Slice. (Tabelle stammt von der Autorin)

Tabelle 4.21: Messwerte nach Aufbereitung, je Feilensystem, für drei verschiedene Messrichtungen, Dentindicke und Slice. (Tabelle stammt von der Autorin)

Tabelle 8.1: Verblindung. (mit freundlicher Genehmigung von Dr. L. Voigt)

Tabelle 8.1: Verblindung.

	ProTaper Next		F6 SkyTaper		WaveOne	
1	01	x				
2			02	x		
3					03	x
4	13	x				
5			17	x		
6					14	x
7	16	x				
8			04	x		
9					18	x
10	12	x				
11			07	x		
12					05	x
13	15	x				
14			09	x		
15					11	x
16	06	x				
17			10	x		
18					08	x

Reincode      Chiffrier-code              Chiffrier-code              Chiffrier-code

## **9. Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass diese Arbeit bisher von mir weder an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Greifswald noch einer anderen wissenschaftlichen Einrichtung zum Zwecke der Promotion eingereicht wurde.

Ferner erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die darin angegebenen Hilfsmittel und Hilfen benutzt und keine Textabschnitte eines Dritten ohne Kennzeichnung übernommen habe.

Unterschrift