

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. Reinhard HICKEL

**In vitro-Untersuchung der Aufbereitungsqualität reziproker und rotierender  
Wurzelkanalaufbereitungsinstrumente im Mikro-CT**

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin  
an der Medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von  
Johanna Richter  
aus München

2018

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Reinhard HICKEL

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Michael Stimmelmayer

PD Dr. Wolfgang Kunz

Mitbetreuung durch den  
promovierten Mitarbeiter: Dr. Christian Diegritz

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard HICKEL

Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.2018

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Literaturübersicht.....	3
2.1	Endodontie .....	3
2.1.1	Ätiologie pulpaler und periapikaler Erkrankungen.....	3
2.1.2	Grundlagen der Wurzelkanalbehandlung.....	4
2.1.3	Ziele und Fehler der Wurzelkanalaufbereitung .....	5
2.1.4	Manuelle Aufbereitungstechniken.....	9
2.1.5	Maschinelle Aufbereitungstechniken.....	10
2.1.6	Nickel-Titan-Legierung für Aufbereitungsinstrumente .....	12
2.1.7	Aufbereitungssysteme mit reziproker Arbeitsweise.....	18
2.1.8	NiTi-Instrument mit rotierender Arbeitsweise: HyFlex EDM der Fa. Coltène .....	22
2.2	Mikrocomputertomografie.....	24
2.3	Aktuelle Studienlage.....	25
2.3.1	Studien zur Evaluation der Volumenänderung.....	26
2.3.2	Studien zur Evaluation der nicht bearbeiteten Oberfläche .....	26
2.3.3	Studien zur Evaluation der Kanalbegradigung und Transportation .....	26
3	Zielsetzung .....	28
4	Material und Methode.....	29
4.1	Natürliche humane Zähne .....	29
4.2	Vorbehandlung der Zähne.....	29
4.3	Mikrocomputertomografie.....	33
4.4	Versuchsablauf.....	34
4.4.1	Reciproc.....	35
4.4.2	WaveOne Gold .....	35
4.4.3	Twisted File Adaptive .....	36

4.4.4	HyFlex EDM.....	36
4.5	Auswertung .....	37
4.5.1	Bildverarbeitung und Datenerhebung .....	37
4.5.2	Datenberechnung .....	46
4.5.3	Visualisierung der Transportation .....	48
4.6	Statistische Auswertung .....	49
4.6.1	Auswahl der Wurzelkanäle für die statistische Auswertung .....	49
4.6.2	Statistische Auswertung.....	49
5	Ergebnisse .....	51
5.1	Morphologie der Wurzelkanäle.....	51
5.2	Volumen, Oberfläche und Wurzelkanalkrümmung vor Wurzelkanalaufbereitung .....	52
5.3	Volumenänderung .....	53
5.4	Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche .....	54
5.5	Transportation .....	55
5.5.1	Visualisierung der Ergebnisse.....	56
6	Diskussion .....	59
6.1	Material und Methode.....	59
6.1.1	Studiendesign natürliche humane Zähne.....	59
6.1.2	Aufbereitung der Zähne .....	61
6.1.3	Mikrocomputertomografie und Auswertung .....	63
6.2	Ergebnisse .....	69
6.2.1	Volumen, Oberfläche und Wurzelkanalkrümmung vor Aufbereitung.....	69
6.2.2	Volumenänderung.....	69
6.2.3	Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche .....	72
6.2.4	Transportation.....	74
6.3	Schlussfolgerungen.....	77
7	Zusammenfassung.....	79

8	Abbildungsverzeichnis.....	81
9	Tabellenverzeichnis.....	83
10	Verzeichnis der Hersteller .....	84
11	Literaturverzeichnis .....	85
12	Danksagung .....	103
13	Eidesstattliche Erklärung .....	104

# 1 Einleitung

Über die Versuche mit seiner neu entdeckten X-Strahlung schrieb W. C. Röntgen im Jahr 1895: „Hält man die Hand zwischen den Entladungsapparat und den Schirm, so sieht man die dunkleren Schatten der Handknochen in dem nur wenig dunklen Schattenbild der Hand.“ (Abbildung 1) (Roentgen 1895)

Seitdem wurden große Fortschritte in der Erforschung und der Nutzung der Röntgenstrahlung gemacht, die sich nicht nur in der medizinischen Diagnostik und Therapie, sondern auch in den Wissenschaften der Biologie, der Physik, der Mineralogie, der Astronomie und der Strukturanalyse sowie in der Werkstoffprüfung etablierte.



**Abbildung 1: Aufnahme W. C. Röntgens von Albert von Köllikers Hand, 1896**

([www.uni-wuerzburg.de](http://www.uni-wuerzburg.de))

In der Zahnmedizin dienen Röntgenbilder in der Regel der Darstellung der Zahnkronen, der Zahnwurzeln und des Alveolarknochens oder der gesamten Kiefer. Dabei überlagern sich jedoch die vom Röntgenstrahl durchleuchteten Gewebe, und abhängig von der Angulation der Röntgenstrahlung zur Zahnachse erscheinen die Zähne gestaucht oder gestreckt. Die zweidimensionale Darstellung dreidimensionaler Strukturen bedeutet einen Informationsverlust.

Abhilfe kann das Anfertigen zusätzlicher exzentrischer Röntgenbilder oder einer Digitalen Volumentomografie-Aufnahme (DVT), bei rechtfertigender Indikation für die erhöhte Strahlenexposition, schaffen.

Im Rahmen einer endodontischen Therapie ist die Kenntnis der Anatomie des Wurzelkanalsystems von entscheidender Bedeutung. Anzahl und Gestalt der Wurzeln sind für jeden Zahn charakteristisch, die Wurzelkanäle können jedoch deutlich variieren. Deshalb soll die Behandlung unter Berücksichtigung des Röntgenbildes erfolgen. Im Falle komplexer Wurzelkanalanatomien ist die Indikation für eine DVT-Aufnahme gegeben. (Glickman und Pettiette 2006)

Wissenschaftliche Beschreibungen der Anatomie der Wurzelkanalsysteme und deren Variabilität beruhen zunächst auf histologischen Untersuchungen. Die histologische Aufarbeitung eines Zahnes ermöglicht die Untersuchung einzelner Schnitte unter dem Mikroskop. (Hess 1917) Sie ist destruktiv und deshalb nicht oder nur mit großem Aufwand so zu reproduzieren, dass die Wurzelkanäle vor und nach Wurzelkanalbehandlung verglichen werden können. (Hess 1917; Klyn et al. 2010)

Mit der Mikrocomputertomografie (Mikro-CT) steht der Forschung inzwischen eine Technik zur Verfügung, die dreidimensionale, isotrope Bilder hoher Auflösung generiert. Sie ermöglicht die detaillierte Darstellung der Wurzelkanalmorphologie, der Veränderungen durch die Wurzelkanalpräparation und der Wurzelkanalfüllung und gilt als Goldstandard unter den bildgebenden Verfahren für *in vitro*-Studien. (Peters. et al. 2000; Domark et al. 2013)

Neben der Beantwortung der eigentlichen Fragestellung motiviert zur Durchführung einer Mikrocomputertomografie-Studie auch, auf dem Bildschirm sehen zu können, was sich der Behandler während einer Wurzelkanalbehandlung aus den röntgenologischen und den taktilen Befunden nur vor seinem inneren Auge erschließen kann.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Endodontie

Die Endodontie als Teilbereich der Zahnheilkunde befasst sich mit der Anatomie, Physiologie und Pathologie der Zahnpulpa und der periradikulären Gewebe. Die endodontische Forschung und Praxis beschäftigen sich mit der Biologie der gesunden Pulpa-Dentin-Einheit und der Ätiologie, Prävention, Diagnostik und Therapie von Erkrankungen der Pulpa und der benachbarten periradikulären Gewebe. (American Association of Endodontics 2012)

#### 2.1.1 Ätiologie pulpaler und periapikaler Erkrankungen

Intakter Schmelz und gesundes Zement schützen das Pulpa-Dentin-System vor mikrobiellen, physikalischen und chemischen Noxen. Auf all diese Irritationen reagieren Pulpa und Dentin als funktionelle Einheit.

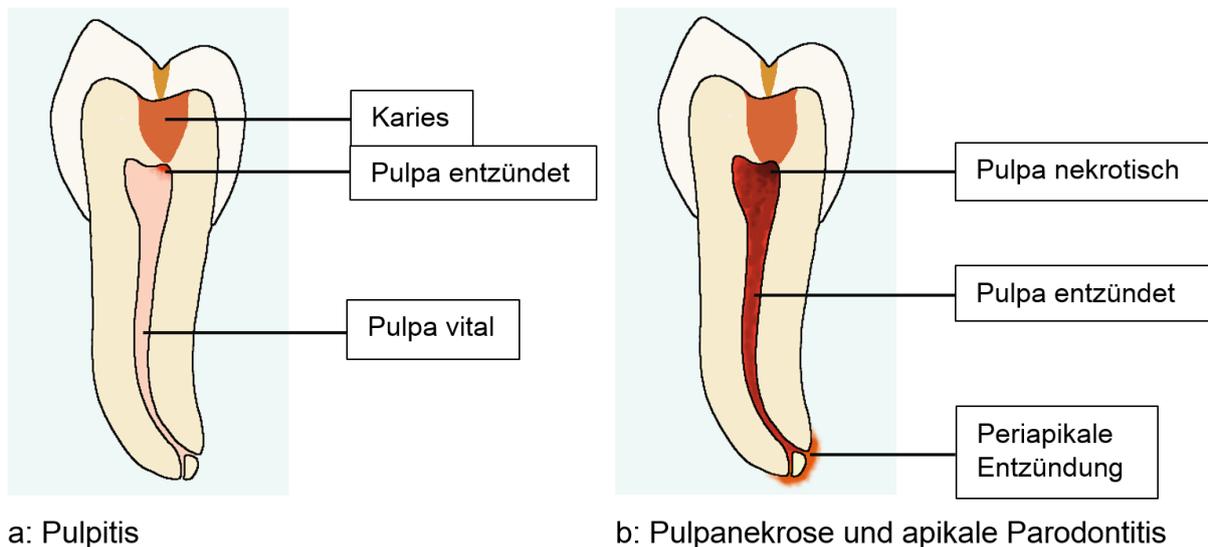
Reagiert die Pulpa mit einer Entzündung, spricht man von einer Pulpitis. Die häufigste Ursache der Pulpitis ist die bakterielle Invasion des Pulpa-Dentin-Systems über eine kariöse Läsion.

Weitere mögliche Infektionspforten stellen Schmelz- und Dentinsprünge, durch Trauma freigelegte Dentintubuli, eine traumatisch oder iatrogen eröffnete Pulpakammer, pulpodesmodontale Seitenkanäle oder das apikale Foramen dar. (Schroeder 2000; Klimm 2010)

Bakterien und ihre Stoffwechselprodukte und Enzyme in den Dentintubuli rufen frühzeitig erste Abwehrreaktionen hervor (reversible Pulpitis): Mineralausfällungen, peritubuläre Dentinbildung und Tertiärdentinbildung setzen die Permeabilität des Dentins herab, der positive intrapulpale Druck erzeugt einen Flüssigkeitsstrom durch die freiliegenden Tubuli nach außen. (Pashley und Liewehr 2006)

Liegt eine aktive kariöse Läsion vor, so kann das Immunsystem die Bakterien in den Dentinkanälchen und im bereits erweichten Dentin jedoch kaum eliminieren. (Hahn und Liewehr 2007) Wenn die weiche Karies die Pulpa erreicht hat, gilt diese als kontaminiert. (Klimm 2010) Damit ist auch meist der Übergangspunkt zur irreversiblen Pulpitis erreicht, die unbehandelt zur Pulpanekrose führt. Die bakterielle Invasion in die nekrotische

Pulpa hat ein infiziertes Wurzelkanalsystem zur Folge und greift schließlich auch auf das periapikale Gewebe über (apikale Parodontitis). (Abbildung 2) (Levin et al. 2009; Klimm 2010)



**Abbildung 2: Pulpitis und Pulpanekrose infolge einer kariösen Läsion**

### 2.1.2 Grundlagen der Wurzelkanalbehandlung

Die Indikation zur Wurzelkanalbehandlung wird gestellt, wenn anhand der anamnestischen, klinischen und röntgenologischen Befunde eine irreversibel geschädigte oder nekrotische Pulpa mit oder ohne klinische und/oder röntgenologische Zeichen einer apikalen Parodontitis diagnostiziert wird.

Das übergeordnete Ziel der Wurzelkanalbehandlung ist die langfristige Erhaltung des Zahnes als funktionsfähige Kaueinheit und Erhaltung oder Wiederherstellung gesunder periradikulärer Strukturen.

Die folgenden Behandlungsschritte werden gemäß der DGZMK-Richtlinie unter lokaler Anästhesie und Kofferdamisolierung des betroffenen Zahnes durchgeführt:

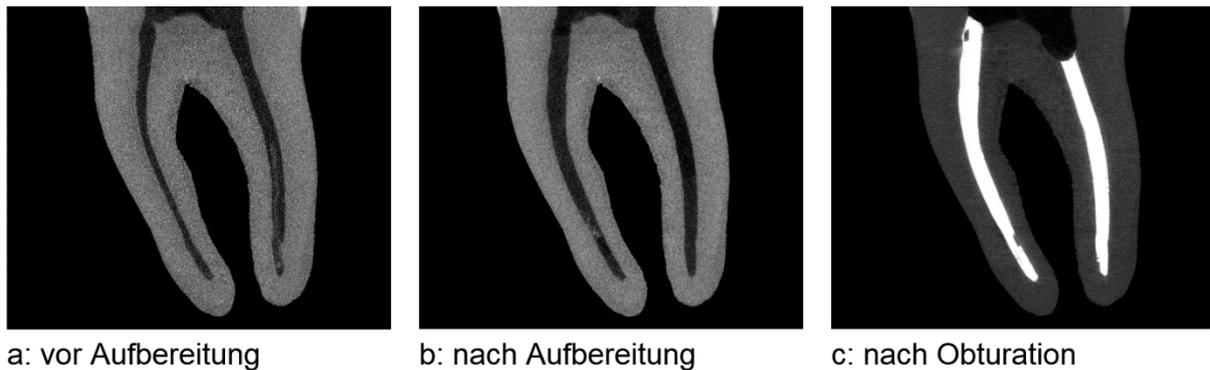
Zunächst wird das Dach der Pulpakammer abgetragen (Trepanation), um einen Zugang zum endodontischen System zu schaffen.

Mithilfe elektrischer und röntgenologischer Verfahren wird anschließend die endodontische Arbeitslänge bestimmt. Zumeist wird die apikale Konstriktion als geeigneter Endpunkt der Wurzelkanalaufbereitung und -füllung definiert.

Im Rahmen der Wurzelkanalaufbereitung erfolgt ein mechanischer Dentinabtrag durch instrumentelle Erweiterung und Ausformung des Wurzelkanals.

Während und nach der mechanischen Aufbereitung werden die Wurzelkanäle gespült. Hierbei werden adäquate Spüllösungen mit antimikrobieller und gewebeauflösender Wirkung, vorzugsweise Natriumhypochlorit-, Chlorhexidin-, EDTA-Lösungen und/oder Zitronensäure, hochvolumig eingesetzt.

Durch die Wurzelkanalfüllung wird idealerweise ein dauerhafter, flüssigkeits- und bakteriendichter Verschluss des gesamten Wurzelkanalsystems mit biokompatiblen, unlöslichen Materialien erzielt. (Abbildung 3)



a: vor Aufbereitung

b: nach Aufbereitung

c: nach Obturation

**Abbildung 3: Wurzelkanalaufbereitung und Obturation eines Unterkiefermolars**  
(Rekonstruktion der vertikalen Ebene aus Mikro-CT-Aufnahmen)

Schließlich erfolgt die restaurative Versorgung des endodontisch behandelten Zahnes, die der Vermeidung einer postoperativen mikrobiellen Rekontamination des endodontischen Systems sowie der Wiederherstellung der Kau- und Funktionsfähigkeit des Zahnes dient.

Der Therapieerfolg soll über mindestens vier Jahre in regelmäßigen Recall-Terminen untersucht werden. (Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde 2007)

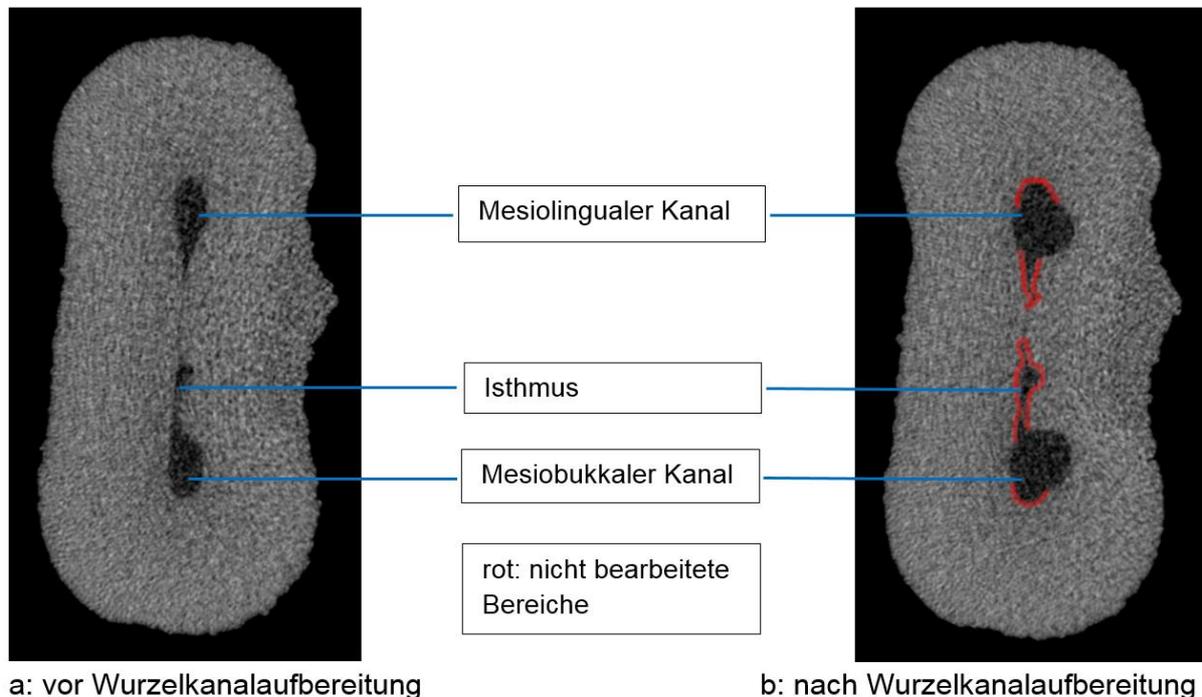
### 2.1.3 Ziele und Fehler der Wurzelkanalaufbereitung

Die komplexe Anatomie des endodontischen Systems, dessen mikroskopische Struktur sowie das Vorliegen einer mikrobiellen Infektion stellen besondere Herausforderungen in der endodontischen Behandlung dar.

Die Eliminierung von Mikroorganismen hat bei der Aufbereitung oberste Priorität, weil Zähne, die zum Zeitpunkt der Obturation ohne nachweisbare Infektion sind, zu einem deutlich höheren Anteil eine Heilung der periapikalen Strukturen erlangen als solche mit infiziertem Wurzelkanalsystem. (Sjögren et al. 1997; Klimm 2010)

Das infizierte vitale oder nekrotische Pulpagewebe befindet sich sowohl in den Hauptkanälen als auch in Isthmen und akzessorischen Kanälen. (Çalışkan et al. 1995; Weller et

al. 1995) Diese Bereiche sind einem von koronal eingeführten Instrument, das einen kreisrunden Querschnitt bearbeitet, kaum zugänglich. (Abbildung 4) Ebenso werden enge periphere Ausbuchtungen ovaler Wurzelkanäle in der Regel nicht erreicht. (Ricucci und Siqueira. 2010b; Melo Ribeiro et al. 2013)



**Abbildung 4: mesiale Wurzel des Molars aus Abbildung 3**

(horizontale Schicht, Mikro-CT-Aufnahme)

Darüber hinaus soll das zirkumpulpale Dentin entfernt werden, weil diesem bei einer Infektion der Pulpa ein bakterieller Biofilm anhaftet und Bakterien in die Dentintubuli penetrieren. (Peters et al. 2001; Ricucci und Siqueira 2010a) In den beschriebenen Nischen wird das infizierte Dentin jedoch nicht abgetragen. (Peters und Peters 2006) Mithilfe der mechanischen Aufbereitung allein kann also keine ausreichende Eliminierung von Mikroorganismen erreicht werden. (Hülsmann 2013)

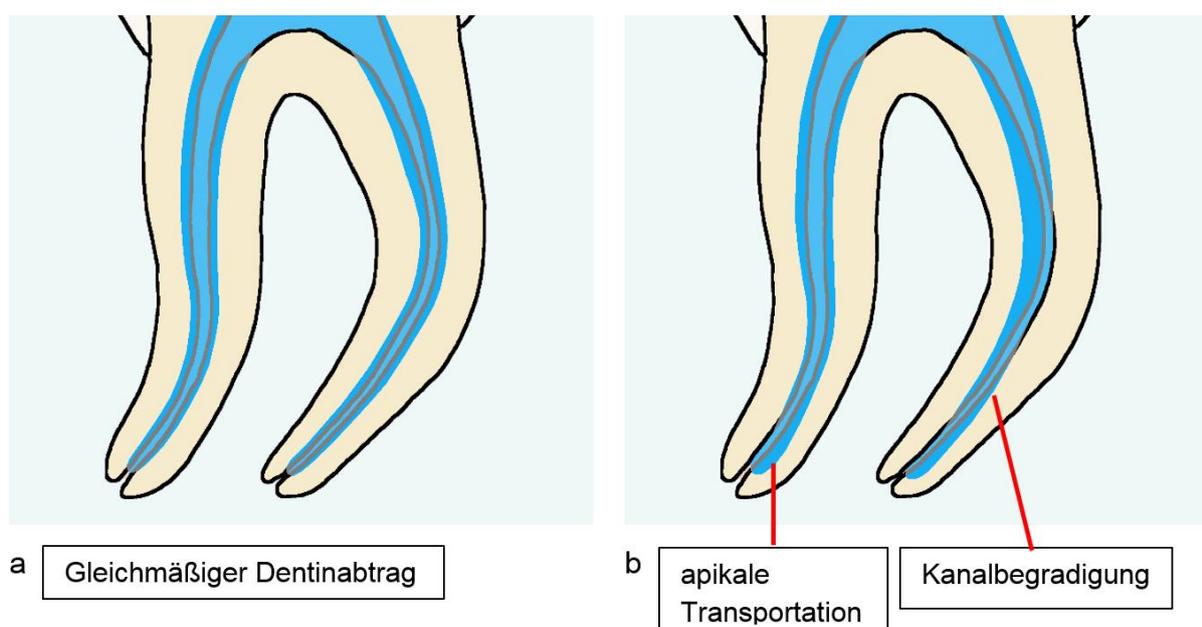
Nicht nur die Mikroorganismen müssen aus dem Wurzelkanal entfernt werden, sondern auch das bei der Instrumentierung entstehende Debris, i.e. Dentinspäne und Gewebereste. Andernfalls kann dieses den apikalen Wurzelkanal verblocken, sodass die Aufbereitung und Füllung nicht mehr bis zur apikalen Konstriktion möglich sind. Auch laterale Kanäle, Isthmen oder andere Nischen können von Debris verstopft werden und somit ein Keimreservoir bilden, das der Desinfektion unzugänglich ist. (Rödig et al. 2002; Peters und Peters 2006)

Deshalb ist im Rahmen der Instrumentierung der Wurzelkanäle eine intermittierende Spülung mit desinfizierenden und gewebeauflösenden Lösungen angezeigt. (Siqueira et al. 2002) Die mechanische und die chemische Komponente bewirken synergistisch eine weitgehende Eliminierung von Mikroorganismen und ermöglichen durch das Entfernen von Debris und Schmierschicht in den zugänglichen Bereichen eine dichte, wandständige Wurzelkanalfüllung.

Neben diesen biologischen Aspekten soll die Wurzelkanalaufbereitung folgende Kriterien zur Formgebung erfüllen:

Die Aufbereitung erfasst idealerweise die gesamte Länge des Wurzelkanals bis zur apikalen Konstriktion, jedoch ohne deren Erweiterung zur Vermeidung von Überpressung und Überfüllung. Es wird eine Konusform hergestellt, wobei die Spitze des Kegels an der apikalen Konstriktion, die Grundfläche am Kanaleingang liegen soll. Um den ursprünglichen Wurzelkanalverlauf beizubehalten, soll ein gleichmäßiger Dentinabtrag an allen Wänden erfolgen. (Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde 2007; Klimm 2010)

Dieses Ziel ist umso schwerer zu erreichen, je stärker ein Wurzelkanal gekrümmt ist: gerade Instrumente neigen dazu, in der Mitte eines gekrümmten Kanals an der Innenkurvatur, im apikalen Bereich an der Außenkurvatur mehr Dentin abzutragen und führen so zu einer Kanalbegradigung. (Peters et al. 2003; Schäfer und Dammaschke 2009; Bürklein und Schäfer 2013) Bei einer Begradigung des apikalen Wurzelkanalanteils spricht man von einer Transportation. (Abbildung 5) (American Association of Endodontics 2012)



**Abbildung 5: Dentinabtrag durch die Wurzelkanalaufbereitung (blau)**

Aus einer Transportation können weitere Aufbereitungsfehler resultieren, wie Stufen- und Trichterbildung. Probleme, die durch solche Abweichungen entstehen, sind zum einen eine erhebliche Erschwernis der Desinfektion und Obturation, (Wu et al. 2000) zum anderen werden die stärker bearbeiteten Kanalwände ausgedünnt. (Lim und Stock 1987) Sie sind dann weniger widerstandsfähig gegenüber den Kräften, die während der Obturation und bei okklusaler Belastung auf den Zahn wirken und zu einer Wurzelfraktur führen können. (Wilcox et al. 1997; Sathorn et al. 2005)

Zu einer Perforation als Folge der Kanalbegradigung kann es an der Krümmungsinneseite (laterale Perforation) oder apikal (apikale Perforation) kommen. (Bürklein und Schäfer 2013)

Um die aufgeführten Fehler zu vermeiden, soll die Wurzelkanalanatomie vor der Aufbereitung eingeschätzt und Stahlinstrumente entsprechend vorgebogen werden. Beim Festlegen der Aufbereitungsgröße muss zwischen einem ausreichenden Abtrag infizierten Dentins und Ermöglichen einer umfassenden Spülung auf der einen und Substanzschonung auf der anderen Seite abgewogen werden. (Klimm 2010)

Des Weiteren kann es zu Komplikationen kommen, wenn das Dentin oder das Wurzelkanalaufbereitungsinstrument den auftretenden Kräften nicht standhält. (Hülsmann 2013)

Wenn die Zugspannung im Wurzelkanal die Zugfestigkeit des Dentins überschreitet, entstehen Dentinrisse. (Sathorn et al. 2005; Adorno et al. 2009; Shemesh et al. 2009) Solche Dentinrisse können zu vertikalen Wurzelfrakturen fortschreiten. (Wilcox et al. 1997)

Obwohl verschiedene Therapieansätze beschrieben wurden, (Dederich 1999; Kawai und Masaka 2002; Hayashi et al. 2004; Taschieri et al. 2010) bedeutet die vertikale Wurzelfraktur aufgrund deren unsicherer Prognose meist die Extraktion des betroffenen Zahnes. (Johnson und Witherspoon 2006; Touré et al. 2011)

Die Instrumente, die zur Wurzelkanalaufbereitung verwendet werden, können im Wurzelkanal frakturieren und somit den Zugang zu dessen apikal gelegenen Anteil versperren.

Als häufigste Ursachen für Feilenfrakturen gelten deren unsachgemäße Anwendung, physikalische Einschränkungen, ein unzureichend geradliniger Zugang zum Wurzelkanalsystem, extreme Wurzelkanalanatomien und auch Herstellungsfehler. (Roda und Gettleman 2006)

Bei den rotierenden Wurzelkanalaufbereitungsinstrumenten können zwei Frakturmechanismen unterschieden werden: (Sattapan et al. 2000a; Plotino et al. 2009)

Eine Torsionsfraktur wird hervorgerufen, wenn die Feile mit der Spitze oder dem Arbeitsteil im Kanal klemmt, während der Schaft weiter rotiert und somit ein Drehmoment auf das Instrument ausübt, das dessen Elastizitätsgrenze übersteigt. (Sattapan et al. 2000b)

Hingegen kann eine Ermüdungsfraktur auch dann auftreten, wenn das Instrument frei im Kanal rotiert. Ihre Ursache liegt in der zyklischen Beanspruchung des Metalls in einer Kanalkurvatur: bei jeder Rotation erfährt die Feile an der Innenseite eine Kompression, an der Außenseite eine Dehnung. Durch diesen Wechsel aus Druck und Zugspannung ermüdet das Material mit zunehmender Kanalkrümmung schneller, deshalb steigt hier die Gefahr einer Instrumentenfraktur. (Zelada et al. 2002; Ullmann und Peters 2005)

Wurde eine Feile aufgrund der Wurzelkanalanatomie stark beansprucht, soll sie verworfen werden, auch wenn keine bleibenden Deformationen erkennbar sind. (Pruett et al. 1997) Des Weiteren ist zur Vermeidung von Frakturen darauf zu achten, dass der bearbeitete Wurzelkanal stets mit Spüllösung geflutet ist, die Feilen immer rotierend und in Auf- und Ab-Bewegungen eingesetzt werden und kein apikaler Druck aufgebaut wird.

Zudem helfen Motoren mit Drehmomentbegrenzung, Torsionsfrakturen vorzubeugen, indem sie Drehzahl und Drehmoment (Torque) den Herstellerangaben entsprechend begrenzen. (Gambarini 2000)

### **2.1.4 Manuelle Aufbereitungstechniken**

1961 beschrieb Ingle seine standardisierte Technik mit Edelstahl-Handfeilen und forderte einheitliche Feilengrößen. (Ingle 1961) Es folgte eine ISO-Norm, wonach die Feilengröße anhand des Durchmessers an der Feilenspitze festgelegt und farblich markiert wird und die Feile eine Konizität von 2% über 16 mm Länge aufweist. (International Organization for Standardization) Zu Beginn der Aufbereitung wird der Kanal mit einer Feile kleiner Größe sondiert, die Arbeitslänge bestimmt und ein sogenannter Gleitpfad präpariert: Der Kanal wird mit feinen, vorgebogenen Instrumenten erweitert und Hindernisse beseitigt, sodass die größeren Instrumente, dem Gleitpfad folgend, bis zur Arbeitslänge eingebracht werden können.

Handfeilen werden, abhängig vom ihrem Design, rotierend oder feilend-schabend eingesetzt. (Klimm 2010)

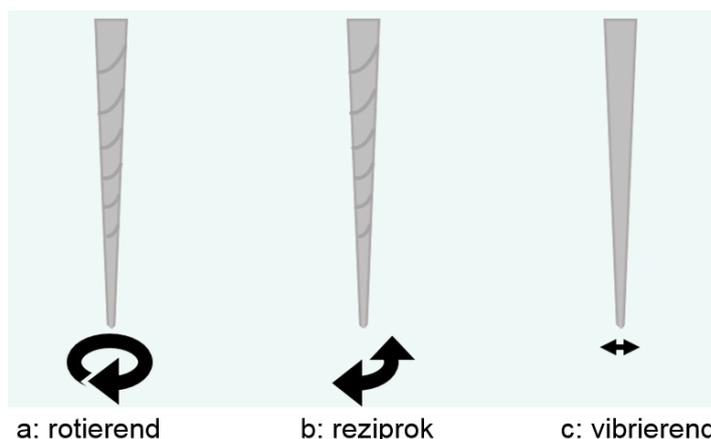
In der Step-back-Technik wird das Instrument in zwei bis drei Vierteldrehungen im Uhrzeigersinn und entgegengesetzt bewegt, wobei leichter Druck nach apikal ausgeübt wird. (Clem 1969)

Eine modifizierte Rotationstechnik, die Balanced-force-Technik, soll den Erhalt des ursprünglichen Kanalverlaufs auch bei Kanalkrümmung verbessern. Die dafür entwickelten Feilen werden unter sanftem Druck nach apikal zunächst eine Vierteldrehung im Uhrzeigersinn rotiert und dabei mittig im Kanal positioniert. Danach erfolgt eine halbe Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn, die die Abtragung von Dentin bewirkt. (Roane et al. 1985)

### 2.1.5 Maschinelle Aufbereitungstechniken

Mit dem Ziel, die Wurzelkanalaufbereitung schneller und anwenderfreundlicher durchführen zu können, wurden verschiedene maschinell angetriebene Geräte entwickelt.

Hierbei können nach Art des Antriebssystems Endodontie-Winkelstücke mit rotierender oder reziproker Arbeitsweise von Schallvibrationssystemen und Ultraschallsystemen unterschieden werden. (Abbildung 6) (Bürklein et al. 2017)



**Abbildung 6: Arbeitsweisen maschineller Aufbereitungsinstrumente**

Mit dem Endocursor (W&H, Burmoos, Austria) wurde 1925 ein Motor eingeführt, der K-Feilen oder Reamer aus Edelstahl in eine Vollrotation mit vertikalen Hubbewegungen versetzt. Die Winkelstücke der Giromatic-Serie (MicroMega, Besancon, France), die seit 1969 auf dem Markt erhältlich sind, führen hingegen eine reziproke 90°-Drehung aus; die verschiedenen zugehörigen Feilen werden also im Wechsel jeweils 90° im und entgegen dem Uhrzeigersinn rotiert.

Mit diesen sowie den weiteren frühen maschinellen Systemen konnte zwar eine Formgebung des Wurzelkanals erzielt werden, allerdings kam es häufiger zu Frakturen und zu Aufbereitungsfehlern als bei der manuellen Aufbereitung. (Grande et al. 2015a; Capar und Arslan 2016)

Entscheidende Fortschritte bei der Aufbereitung mit vollrotierend angetriebenen Instrumenten wurden erst durch die Entwicklung von hochelastischen Feilen aus Nickel-Titan-Legierungen erreicht. Deren Materialeigenschaften machen gegenüber den Stahlinstrumenten veränderte Konstruktionsmerkmale notwendig. (Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde 2005)

Die nicht schneidende Instrumentenspitze (Battspitze) bewirkt, dass die Feile besser im Wurzelkanal zentriert bleibt. Dadurch wird Kanalbegradigungen und Perforationen vorgebeugt.

Abweichend von der ISO-Norm werden Nickel-Titan-Instrumente mit verschiedenen Konizitäten (Synonym: Taper), also auch größer als 2% über 16 mm Länge, hergestellt. Durch die stärkere Zunahme des Wurzelkanaldurchmessers bei größerer Konizität der Aufbereitungsinstrumente wird ein tieferes Eindringen der Kanüle bei der Spülung mit einer verminderten Gefahr der Überpressung ermöglicht, sowie die Obturation erleichtert. (Schilder 1974) Ein Instrument mit großer Konizität ist jedoch mit Nachteilen verbunden, nämlich mit einer Abnahme der Flexibilität und einem starken Dentinabtrag im zervikalen Wurzelkanalbereich. Um diese zu verringern, wird die Konizität auch innerhalb eines Instruments variiert (Kennzeichnung: Taper~). Im Falle einer relativ großen Konizität im apikalen und einer abnehmenden Konizität im oberen Feilenbereich spricht man von einer regressiven Konizität. (McSpadden 2001)

Werden Instrumente der Aufbereitungsmethode entsprechend nicht auf der gesamten Arbeitslänge eingesetzt, wird die Länge ihres Arbeitsteils angepasst. Bei Instrumenten mit sehr großen Konizitäten, die zur Erweiterung des koronalen Kanalanteils dienen, vermindert ein stark verkürzter Arbeitsteil die einwirkende Kraft. (Hellwig et al. 2009)

Bei rotierendem Einsatz der Feilen wird deren Funktionsweise durch ihre Schneidengeometrie bestimmt: In Abhängigkeit von dem Winkel, in dem die Schneidekante über die Oberfläche bewegt wird, entsteht ein schabender oder ein schneidender Abtrag. Bei manchen Instrumenten schließt sich der Schneidekante eine Führungsfläche an, die der bearbeiteten Kanalwand anliegt. Diese Fläche (radial land) verringert Einschraubeffekt und Transportation, jedoch auch die Effektivität. (Himmel et al. 2006)



von links: 3 Shaping Files,  
5 Finishing Files

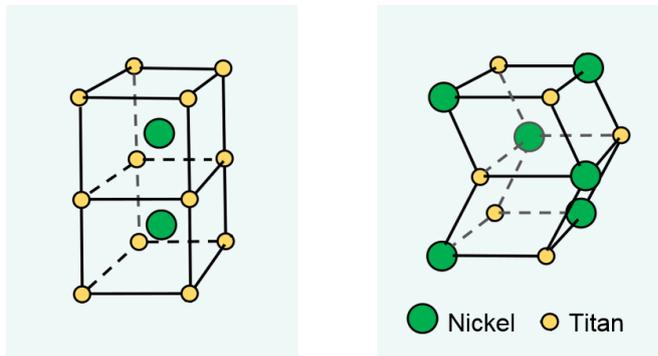
**Abbildung 7: ProTaper Universal** ([www.dentsplysirona.com](http://www.dentsplysirona.com))

Als Beispiel für Nickel-Titan-Instrumente zur maschinellen Aufbereitung sei das ProTaper Universal-System genannt. Dieses besteht aus zwei Feilensequenzen: die erste dient der Erweiterung des Kanals nach Erstellen eines Gleitpfades mit Handfeilen und umfasst drei Feilen (Shaping Files). Aus der zweiten Sequenz wird, je nach gewünschter Aufbereitungsgröße, mindestens eine Feile (Finishing File) zur abschließenden Formgebung des Kanals gewählt. (Abbildung 7) (Dentsply Maillefer 2012)

### 2.1.6 Nickel-Titan-Legierung für Aufbereitungsinstrumente

Nickel-Titan-Legierungen sind nahezu stöchiometrisch aus Nickel und Titan zusammengesetzt und werden aufgrund ihres thermischen und ihres mechanischen Formgedächtnisses auch als „intelligente Werkstoffe“ (Smart Materials) bezeichnet. Abhängig von der Temperatur weisen Nickel-Titan-Legierungen unterschiedliche Kristallstrukturen auf. Bei hoher Temperatur liegt die Austenit-Phase mit einer kubisch raumzentrierten Atomanordnung vor; bei niedriger Temperatur findet sich ein Martensit mit zick-zack-förmiger Atomanordnung. (Abbildung 8) Die Umwandlung von Martensit in Austenit und umgekehrt erfolgt diffusionslos durch Scherbewegungen, also ohne Platzwechselfvorgänge der Atome.

Die Temperaturen, bei denen der Übergang einer Phase in die andere einsetzt beziehungsweise vollzogen ist, werden durch die exakte Legierungszusammensetzung bestimmt und können so im Bereich von  $-100^{\circ}\text{C}$  bis  $+100^{\circ}\text{C}$  eingestellt werden.

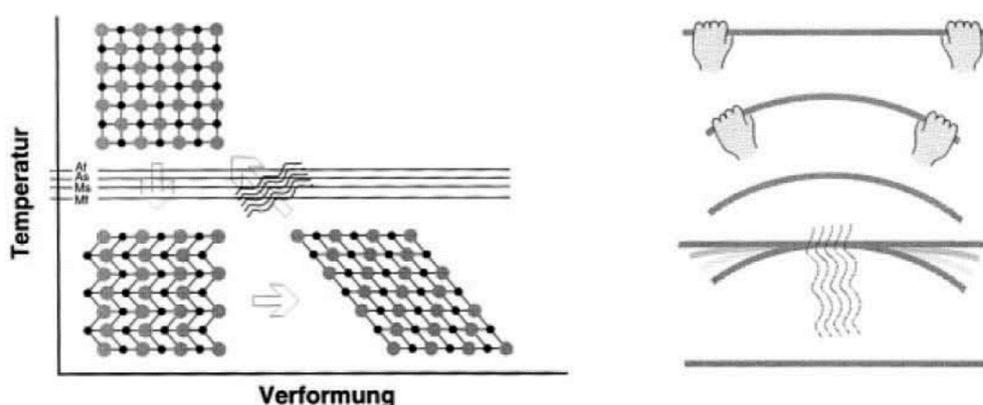


a: Austenit

b: Martensit

**Abbildung 8: Nickel-Titan-Phasen – Austenit und Martensit**

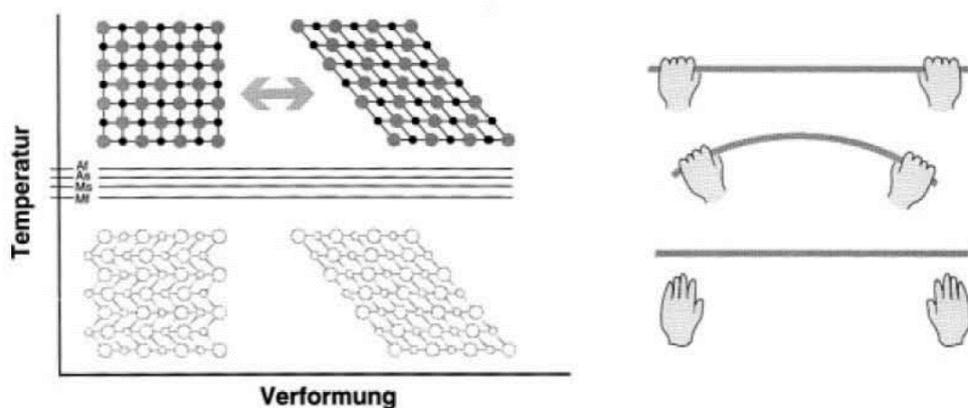
Während der Umwandlung von Austenit in Martensit beim Abkühlen kann keine makroskopische Gestaltänderung beobachtet werden, sofern keine äußere Kraft auf das Bauteil einwirkt. Ist die martensitische Phase erreicht, kann das Bauteil leicht verformt werden, wobei die Verformung nach atomistisch nicht konventionellen Mechanismen erfolgt: Die Zick-Zack-Anordnung wird sukzessive in eine einzige, schräge Orientierung umgeklappt. Verformungen um bis zu 8% erfolgen nach diesem Mechanismus und sind bei tiefer Temperatur bleibend. Wird der verformte Martensit jedoch erwärmt, stellt sich bei Überschreiten der Umwandlungstemperatur die ursprüngliche Kristallorientierung der Hochtemperaturphase und somit die ursprüngliche Gestalt wieder ein. Diese besondere Eigenschaft wird als thermisches Formgedächtnis (Shape Memory) bezeichnet. (Abbildung 9)

**Abbildung 9: Nickel-Titan – thermisches Formgedächtnis.** (Stöckel 2000)

In einem bestimmten Temperaturbereich kann die Umwandlung von Austenit zu Martensit auch mechanisch induziert werden. Die Verformung des Nickel-Titan-Bauteils überführt den Austenit in spannungsinduzierten Martensit, der sofort von der

Zick-Zack-Anordnung in ein schräges Gitter umgeklappt wird. Die Induzierung und Verformung des Martensits ist energetisch günstiger als die Verformung des Austenits mit konventionellen Mechanismen, das Bauteil lässt sich also mit geringer Kraft um bis zu 10% verbiegen und kehrt nach der Belastung wieder in die Austenit-Phase und seine ursprüngliche Form zurück.

Dieses mechanische Formgedächtnis ermöglicht eine bis zu zehnmal höhere elastische Verformbarkeit der Nickel-Titan-Legierungen, die deshalb als pseudoelastisch oder superelastisch bezeichnet werden. (Abbildung 10) (Stöckel 2000)



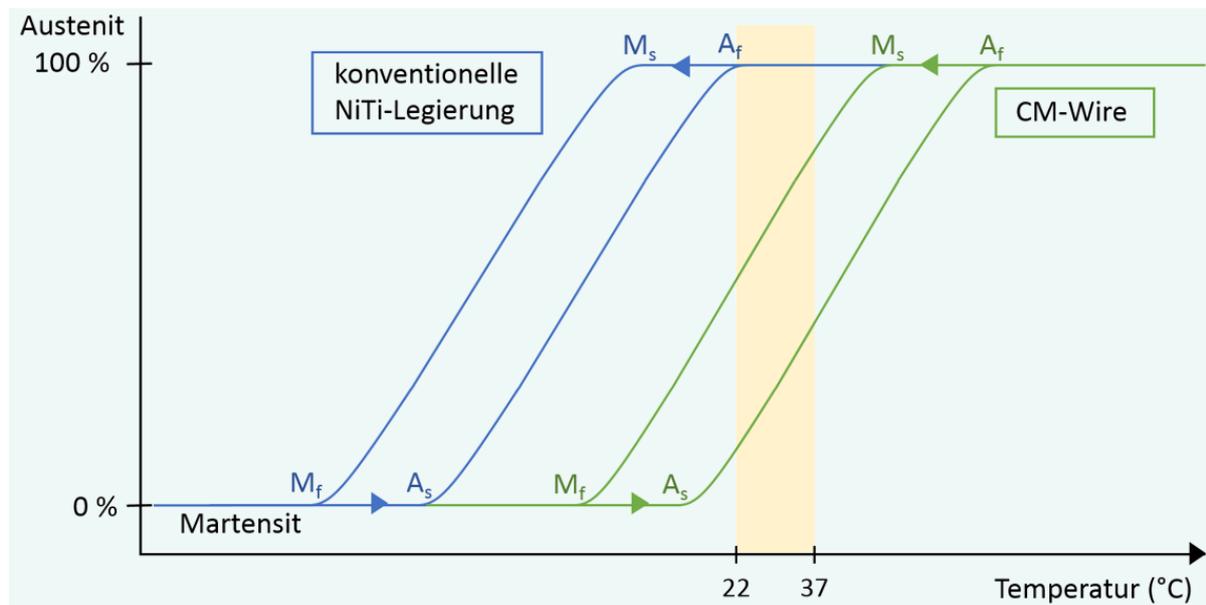
**Abbildung 10: Nickel-Titan – mechanisches Formgedächtnis** (Stöckel 2000)

Ihre Pseudoelastizität und ihre gleichzeitige Härte machen Nickel-Titan-Legierungen zu den derzeit am besten geeigneten Materialien, aus denen Feilen für die rotierende Wurzelkanalaufbereitung auch gekrümmter Kanäle produziert werden können. Geringe Veränderungen in der Zusammensetzung der Legierung, Fremdstoffe und Wärmebehandlungen während des Herstellungsprozesses können Materialeigenschaften wie die Umwandlungstemperaturen anpassen.

Um das pseudoelastische Verhalten zu nutzen, liegen die konventionellen Nickel-Titan-Legierungen der Feilen bei Raumtemperatur in ihrer Austenit-Phase vor, in der ihre Härte am größten ist. (Abbildung 11, blaue Kurve) Beim Einsatz der Feilen wandelt sich dieses in spannungsinduzierten Martensit um, der hochelastisch ist.

Nickel-Titan-Legierungen, deren Umwandlungstemperaturen oberhalb der Körpertemperatur liegen, sind bei ihrem klinischen Einsatz überwiegend in der Martensit-Phase und somit weich und verformbar. (Abbildung 11, grüne Kurve) Da die Legierungen einen geringen Austenit-Anteil aufweisen, wird dessen mechanisches Formgedächtnis im Vergleich zur reinen Austenit-Phase als „kontrolliert“ und die

Legierungen als Controlled Memory (CM)-Legierungen bezeichnet. Sie werden mit Hilfe spezieller thermomechanischer Verfahren gewonnen, die Zwillingsbildungen der Martensite bewirken. Bei Belastung kommt es zur Entzwilligung des Martensits und zur pseudoplastischen Verformung durch dessen Reorientierung. Wird die Feile nun erwärmt und in die Austenit-Phase überführt, wird diese pseudoplastische Verformung rückgängig gemacht, die Feile nimmt wieder ihre ursprüngliche Form ein und behält diese auch nach dem Abkühlen in der Martensit-Phase. (Shen et al. 2013; Zupanc und Schäfer 2017)



$M_s$ : Martensit-Start-Temperatur;  $M_f$ : Martensit-Finish-Temperatur;  
 $A_s$ : Austenit-Start-Temperatur;  $A_f$ : Austenit-Finish-Temperatur  
 gelb: Temperaturbereich bei klinischer Anwendung (22 – 37 °C)

**Abbildung 11: Temperaturhysteresediagramme einer konventionellen und einer CM-Wire Nickel-Titan-Legierung** (basierend auf Zupanc und Schäfer 2017)

Auch zur Herstellung der M-Wire Legierungen sind spezielle thermomechanische Vorbehandlungen nötig. Diese Legierungen weisen eine höhere Elastizität und einen größeren Widerstand gegen Ermüdung auf als konventionelles Nickel-Titan und haben unter klinischen Bedingungen einen Austenit- und einen R-Phase-Anteil.

Die sogenannte R-Phase entsteht beim Abkühlen des Austenits als zusätzliche rhomboedrische Zwischenphase zum Martensit. Während sie bei konventionellen Nickel-Titan-Legierungen nur eine Randerscheinung darstellt, kann sie beim Abkühlen der Legierung gezielt erzeugt werden, nämlich durch Substitution von Nickel durch Eisen, Chrom oder Aluminium oder durch bestimmte Vorbehandlungen, die eine starke mechanische Eigenspannung im Material bewirken. (Kaack 2002; Zupanc und Schäfer 2017) Ihr Formgedächtnis ist weniger ausgeprägt als das der martensitischen Umwandlung,

Zugfestigkeit und Ermüdungswiderstand sind größer als bei pseudoelastischem Nickel-Titan. (Alapati et al. 2009; Zhou et al. 2013; Zupanc und Schäfer 2017)

Im Vergleich zur Produktion von Edelstahlfeilen, in der das Verdrillen eines Drahtes mit charakteristischem Querschnitt den entscheidenden Arbeitsschritt darstellt, ist die Herstellung endodontischer Feilen aus Nickel-Titan-Legierungen deutlich komplexer: Aufgrund der hohen Elastizität kann durch Verdrillen eines Nickel-Titan-Drahtes keine bleibende Deformation zu einer Spiralförmigkeit herbeigeführt werden. Deshalb müssen die Feilen aus Rohlingen gefräst werden. (Thompson 2000)

Da die Schleifspuren und Unregelmäßigkeiten der Feilenoberfläche mögliche Ausgangspunkte für Korrosion, Rissbildung und Feilenseparation darstellen, sollen diese durch verschiedene Oberflächenbehandlungen, beispielsweise durch Elektropolitur, behoben werden.

Einzig für die R-Phase Nickel-Titan-Legierung mit ihrem verminderten Formgedächtnis wird das Verdrillen der Drahtrohlinge in der Feilenherstellung möglich, wodurch die genannten Oberflächenmängel vermieden werden sollen. Durch anschließende Wärme- und Kältebehandlungen werden die gewonnenen Feilen unter Beibehaltung ihrer äußeren Form wieder in eine Austenit-Struktur überführt. (Rapisarda et al. 2001; Alapati et al. 2005; Anderson et al. 2007)

Neben der Vermeidung von Bearbeitungsspuren in der Oberfläche bringt die Verwendung des R-Phase Nickel-Titans eine erhöhte Flexibilität und Resistenz gegenüber Spannungen und Ermüdung im Vergleich zu konventionellem Nickel-Titan mit sich.

Eine weitere Möglichkeit, Feilen aus CM-Wire ohne Schleifen herzustellen, ist die Funkenerosion. An das Instrument wird hierbei ein elektrisches Potenzial gelegt, sodass über einen Plasmakanal vom Instrument (Kathode) zum Werkzeug (Anode) Material abgetragen wird. (Zupanc und Schäfer 2017)

**Tabelle 1: Nickel-Titan-Legierungen** (basierend auf Zupanc und Schäfer 2017)

<i>Nickel-Titan-Legierung</i>	<i>überwiegen- de Phasen</i> * <sup>1</sup>	<i>spannungs- induziert</i> * <sup>1</sup>	<i>charakteristische Eigenschaft</i> * <sup>1</sup>	<i>Elast.</i> * <sup>2</sup>	<i>Res. zykl.</i> * <sup>2</sup>	<i>Res. Tors.</i> * <sup>2</sup>
<b>konventionell</b>	Austenit	Martensit	Pseudoelastizität	o	o	o
<b>M-Wire</b>	Austenit, R-Phase	R-Phase	Pseudoelastizität	+	+	o
<b>R-Phase</b>	Austenit	R-Phase	Pseudoelastizität	+	+	+
<b>CM-Wire</b>						
<b>A: CM-Wire</b>	Martensit Austenit	Martensit + Reorientierung	kontrollierter Rückstelleffekt	+	++	o
<b>B: Gold-CM-Wire</b>	Martensit, R-Phase, Austenit	Martensit + Reorientierung R-Phase	kontrollierter Rückstelleffekt	+	++	o
<b>C: CM-Wire funken- erodiert</b>	Martensit, R-Phase, Austenit	Martensit + Reorientierung R-Phase	kontrollierter Rückstelleffekt	+	+++	-

\*<sup>1</sup> bei klinischer Anwendung; \*<sup>2</sup> im Vergleich zu konventionellen Nickel-Titan-Legierungen

Elast. = Elastizität;

Res. zykl. = Resistenz gegenüber zyklischer Ermüdung;

Res. Tors. = Resistenz gegenüber Torsionsfrakturen (nach Pirani et al. 2016; Zupanc und Schäfer 2017)

### 2.1.7 Aufbereitungssysteme mit reziproker Arbeitsweise

Yared beschrieb 2008 seine Methode zur Wurzelkanalaufbereitung mit nur einer Feile: Nach Sondierung und Festlegung der Arbeitslänge mit einer Handfeile (ISO 08) wird die Aufbereitung alleine mithilfe der F2 ProTaper-Feile (ISO 25) in reziproker Arbeitsweise durchgeführt. Der hierfür verwendete programmierbare Motor ATR Vision (ATR, Pistoia, Italien) führt im Wechsel eine Rotationsbewegung von 144° im Uhrzeigersinn und 72° entgegen dem Uhrzeigersinn aus.

Der Autor vergleicht diese reziproke Bewegung mit Roanes Balanced-force-Technik und legt seiner Vorgehensweise die Überlegung zugrunde, dass durch den Wechsel der Drehrichtung ein Verklemmen der Feile im Kanal und somit die Gefahr einer Torsionsfraktur vermindert werden kann. (Yared 2008) Dass die Lebensdauer reziprok arbeitender Instrumente höher ist als die rotierender Feilen, wurde inzwischen mehrfach nachgewiesen. (Bürklein et al. 2017)

Auf Yareds Beschreibung aufbauend, wurden in den folgenden Jahren Systeme für eine reziproke Arbeitsweise entwickelt, die in den meisten Fällen die Aufbereitung mit nur einer zugehörigen Nickel-Titan-Feile ermöglichen sollen (single file). (Webber et al. 2011; Yared 2011)

Im Folgenden sollen zwei reziproke Einfeilen-Systeme – die Reciproc aus M-Wire und die WaveOne Gold aus Gold-CM-Wire – vorgestellt werden, sowie zwei Mehrfeilen-Systeme mit adaptierenden beziehungsweise kontinuierlichen Rotationsmodi – die Twisted File Adaptive aus R-Phase Nickel-Titan und die HyFlex EDM aus funkenerodiertem CM-Wire.

#### 2.1.7.1 Reciproc – Feilen der Fa. VDW

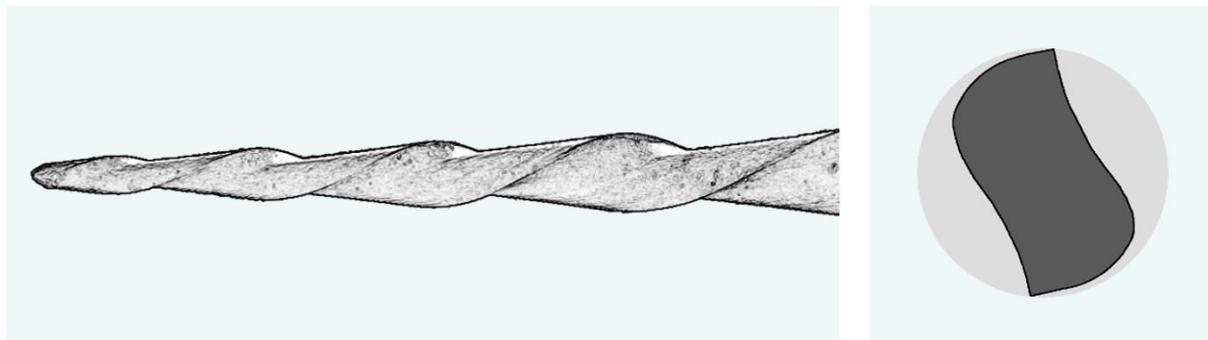
Nach seiner Beschreibung der reziproken Wurzelkanalaufbereitung mit nur einem Nickel Titan-Instrument entwickelten Yared und die Firma VDW das Reciproc-System. „Bei der reziproken Aufbereitung bewegt sich das Instrument zunächst rotierend in Schneidrichtung und wird anschließend durch Umkehr der Drehrichtung wieder freigegeben. Eine komplette Umdrehung von 360° setzt sich aus mehreren reziproken Bewegungen zusammen. Der Drehwinkel in die schneidende Richtung ist größer als der in Gegenrichtung, wodurch das Instrument kontinuierlich nach apikal vordringt. Die Winkel der reziproken Bewegung (...) sind niedriger als die Winkeleinstellungen, bei denen das Instrument seine Elastizitätsgrenze erreichen würde. Dadurch wird das Risiko von Instrumentenfrakturen minimiert.“ (VDW Dental)

Für enge Kanäle wird die Feile R25 (ISO-Größe 25, Taper 0.08~), für mittlere Kanäle die Feile R40 (ISO-Größe 40, Taper 0.06~) und für weite Kanäle die R50 (ISO-Größe 50, Taper 0.05~) empfohlen. Die Aufbereitung eines Kanals soll in den meisten Fällen mit einer Reciproc-Feile sowie einem Handinstrument zum Sondieren und Bestimmen der Arbeitslänge gelingen. Das Erstellen eines Gleitpfades wird vom Hersteller lediglich empfohlen, wenn das Handinstrument die Arbeitslänge nur vorgebogen erreicht.

Die Reciproc-Feilen werden aus M-Wire Nickel-Titan zum Einmalgebrauch hergestellt und haben einen S-förmigen Querschnitt mit zwei Schneiden, die Instrumentenspitze ist nicht schneidend. (Tabelle 2, Abbildung 12)

**Tabelle 2: Reciproc** (VDW Dental; Kim et al. 2012)

System	Material	Rotationsmodus	verfügbare Feilen	Konizität
Single file	M-Wire NiTi	reziprok: 150° ↻ - 30° ↺ ~ 300 U/min	25/0.08; 40/0.06; 50/0.05	regressiv



**Abbildung 12: Reciproc R25**

Lateralansicht und Querschnitt (Schema nach Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen)

Charakteristika der Feile sind ihre Pseudoelastizität, hohe Schneideffizienz und verkürzte Aufbereitungszeit. (Bürklein et al. 2013a)

Ob die reziproke Bewegung eine bessere Zentrierung der Instrumente im Kanal bewirkt, wurde aufgrund uneinheitlicher Studienergebnisse kontrovers diskutiert. (Marceliano-Alves et al. 2014; Saber et al. 2015b) Zahlreiche Studien erhielten ähnliche Ergebnisse für die Reciproc und andere rotierende oder reziproke Instrumente. (Bürklein et al. 2012; Capar et al. 2014)

In Studien zur Ermüdungsresistenz war die Reciproc rotierenden Instrumenten aus konventionellem Nickel-Titan überlegen. (Kim et al. 2012; Kiefner et al. 2014)

### 2.1.7.2 WaveOne Gold – Feilen der Fa. Dentsply

Bei dem WaveOne Gold-System der Firma Dentsply handelt es sich, insbesondere im Feilendesign und der Metallurgie, um eine Weiterentwicklung des reziproken Ein-Feilen-Systems WaveOne.

Die Winklereinstellungen liegen bei  $170^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn zu  $50^\circ$  im Uhrzeigersinn, die Rotationsgeschwindigkeit bei 350 Umdrehungen pro Minute. (Fidler 2014)

Das Sortiment umfasst die Small File (ISO 20, Taper 0.07), die Primary File (ISO 25, Taper 0.07~), die Medium File (ISO 35, Taper 0.06~) sowie die Large File (ISO 45, Taper 0.05~), wobei der Taper im mittleren und oberen Feilendrittel jeweils variabel ist.

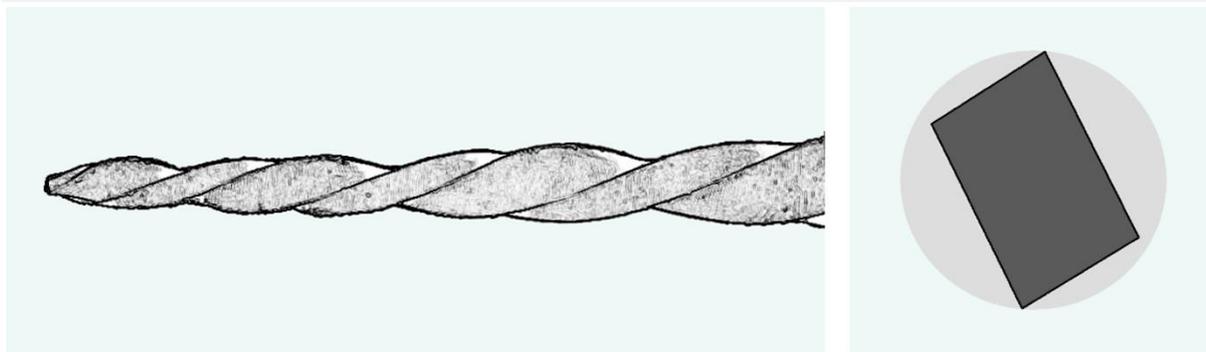
Nach manueller Präparation eines Gleitpfades mithilfe einer Handfeile (ISO 10) und der ProGlider File (ISO 16, Taper 0.02) empfiehlt der Hersteller die Aufbereitung mit der Primary File, um für die meisten Wurzelkanäle die Aufbereitung abzuschließen. Wenn diese nicht einfach vordringt, soll der Kanal zunächst mit der Small File und erst anschließend mit der Primary File erweitert werden.

Die Medium File soll bei einem Apex größer ISO 25, die Large File bei einem Apex größer ISO 35 eingesetzt werden. Die Feilen sind zum Einmalgebrauch bestimmt.

Sie haben den Querschnitt eines variablen Parallelogramms, wobei abwechselnd eine oder beide der zwei spitzen Kanten als Schneidekante arbeiten. (Tabelle 3, Abbildung 13) (Eberhardt; Dentsply 2015)

**Tabelle 3: WaveOne Gold** (Kim et al. 2012; Dentsply 2015)

System	Material	Rotationsmodus	verfügbare Feilen	Konizität
Single file + Gleitpfad	Gold-CM- Wire	reziprok: $170^\circ$ ↶ - $50^\circ$ ↷ ~ 350 U/min	20/0.07; 25/0.07; 35/0.06; 45/0.05	regressiv



**Abbildung 13: WaveOne Gold Primary**

Lateralansicht und Querschnitt (Schema nach Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen)

Ein Wärmebehandlungsverfahren nach dem Schleifen der Feilen aus CM-Wire hinterlässt eine Oxidschicht und damit die charakteristische goldene Farbe. Die Feilen weisen den kontrollierten Rückstelleffekt auf, können vorgebogen werden und sind weich und elastisch. (Zupanc und Schäfer 2017)

Die WaveOne Gold hat eine signifikant höhere Flexibilität und höhere Widerstandskraft gegen zyklische Ermüdung als Feilen aus konventionellem und M-Wire Nickel-Titan. (Özyürek 2016; Topçuoğlu et al. 2016) Obwohl für die WaveOne Gold ein geringerer Biegungswiderstand als für die Reciproc und die Twisted File Adaptive ermittelt wurde, war ihr Torsionswiderstand größer. (Elsaka et al. 2016)

### **2.1.7.3 Twisted File Adaptive – adaptierend reziprokes System der Fa.**

#### **SybronEndo**

Das Twisted File Adaptive-System der Firma SybronEndo besteht aus einer Sequenz von Feilen aus verdrehtem R-Phase Nickel-Titan, die vom zugehörigen Motor rotierend oder reziprok bewegt werden.

Die Twisted File Adaptive ist in zwei Sets mit jeweils drei Feilen erhältlich: Für Kanäle, die sich bei der manuellen Präparation des Gleitpfades bis ISO 15 als schmal oder diffizil erweisen, wird das SMALL-Set mit den Feilen SM1 (ISO-Größe 20, Taper 0.04), SM2 (ISO-Größe 25, Taper 0.06) und SM3 (ISO-Größe 35, Taper 0.04) empfohlen.

Für mittlere und große Kanäle soll das MEDIUM/LARGE-Set verwendet werden, das die Feilen ML1 (ISO-Größe 25, Taper 0.06), ML2 (ISO-Größe 35, Taper 0.06) und ML3 (ISO-Größe 50, Taper 0.04) umfasst.

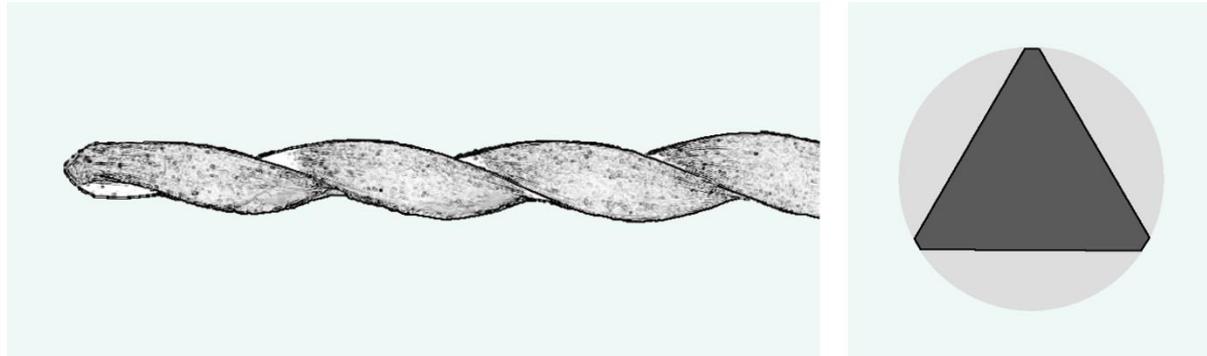
Beiden Sets ist die farbliche Codierung gemeinsam, die von der ISO-Norm abweicht: mit der grünen, ersten Feile wird der Kanal erweitert, um anschließend mit der gelben, zweiten Feile aufbereitet zu werden. Abhängig von der Weite des Wurzelkanals kann eine abschließende Präparation mit der rot markierten, dritten Feile erfolgen.

Der Elements Motor des Adaptive-Systems führt bis zu einem gewissen Widerstand an der Feile rotierende Zyklen aus. Hierbei rotiert die Feile nicht kontinuierlich, sondern macht nach einer Rotation um 600° eine Pause. Von diesen 600°- 0° Zyklen geht der Motor bei steigenden Torsionskräften in der Feile in eine reziproke Bewegung mit bis zu 370° - 50° über, wobei die Winkel andauernd dem Widerstand im Wurzelkanal angepasst werden, um Spannungen in der Feile niedrig zu halten. Bei freier Rotation liegt eine Geschwindigkeit von 400 Umdrehungen pro Minute vor.

Die Feilen haben einen dreieckigen Querschnitt und eine nicht schneidende Spitze. (Tabelle 4, Abbildung 14) (Gambarini; Moran)

**Tabelle 4: Twisted File Adaptive** (Gambarini; Moran)

System	Material	Rotationsmodus	verfügbare Feilen	Konizität
Multi file	R-Phase	rotierend: 600° ↻ - 0° bis reziprok: 370° ↻ - 50° ↻ ~ 400 U/min	20/0.04; 25/0.06; 35/0.04; 35/0.06; 50/0.04	konstant



**Abbildung 14: Twisted File Adaptive ML1**

Lateralansicht und Querschnitt (Schema nach Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen)

Die Feilen sind, charakteristisch für R-Phase Legierungen, pseudoelastisch und flexibel.

Im Vergleich mit rotierenden Feilen aus konventionellem Nickel-Titan wurde ihnen eine geringere apikale Transportation bestätigt. (Pedullà et al. 2016b)

Bei Untersuchung der Ermüdungsresistenz liegt die Twisted File Adaptive ML1 im selben Bereich wie die Reciproc R25 (Higuera et al. 2015). Im Vergleich zur Reciproc und der WaveOne Gold hat die Twisted File Adaptive einen geringeren Torsionswiderstand, ihr Biegungswiderstand liegt über dem der WaveOne Gold und unter dem der Reciproc. (Elsaka et al. 2016)

### 2.1.8 NiTi-Instrument mit rotierender Arbeitsweise: HyFlex EDM der Fa. Coltène

Bei der HyFlex EDM der Firma Coltène handelt es sich um Feilen aus CM-Nickel-Titan mit funkenenerodierter Oberfläche, die in rotierender Arbeitsweise betrieben werden und seit 2015 erhältlich sind.

Das HyFlex EDM-System enthält eine Sequenz von Feilen, die der Wurzelkanalanatomie entsprechend variiert werden soll: Optional kommt ein Orifice

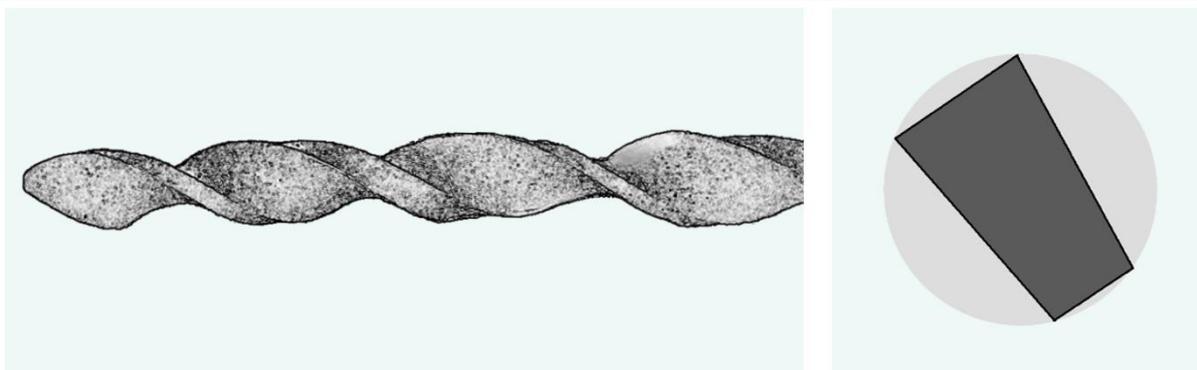
Opener (ISO-Größe 25, Taper 0.12) zur Erweiterung des Kanaleingangs zum Einsatz. Zur Erstellung eines Gleitpfades soll die Glidepath File (ISO-Größe 10, Taper 0.05) kombiniert mit einer Handfeile angewendet werden. Die anschließende Formgebung und Erweiterung (Shaping) des Kanals soll in geraden Kanälen mit der OneFile (ISO-Größe 25, Taper 0.08~), in Kanälen mit mittlerer Krümmung erst mit der HyFlex CM (ISO-Größe 20, Taper 0.04) und dann mit der OneFile der HyFlex EDM-Sequenz erreicht werden. Mithilfe der optionalen Finishing Files (40/0.04, 50/0.03, 60/0.02) sollen auch weite Kanäle ausreichend bearbeitet werden können.

Abgesehen von der Orifice Opener-Feile sollen alle HyFlex-Feilen auf Arbeitslänge eingesetzt werden. Die Glidepath-Feile kann mit einer Drehzahl von 300 Umdrehungen pro Minute und einem Drehmoment von 1,8 N\*cm betrieben werden, alle anderen mit einer Drehzahl von 400 Umdrehungen pro Minute und einem Drehmoment von 2,5 N\*cm.

Die Querschnittsfläche der Feilen variiert von einer rechteckigen Fläche im apikalen Bereich zu zwei verschiedenen Trapezformen im mittleren und koronalen Feilenabschnitt, die Formgebung der Feile erfolgt durch Funkenerosionen (EDM = Electrical Discharge Machining). (Tabelle 5, Abbildung 15) (Coltène/Whaledent)

**Tabelle 5: HyFlex EDM** (Coltène/Whaledent)

System	Material	Rotationsmodus	verfügbare Feilen	Konizität
Multi file	CM-Wire funken- erodiert	rotierend  400 U/min; 2,5 N*cm	10/0.05; 25/0.08; 40/0.04; 50/0.03; 60/0.02	regressiv



**Abbildung 15: HyFlex EDM OneFile**

Lateralansicht und Querschnitt (Schema nach Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen)

Charakteristisch für diese Feilen aus CM-Wire sind der kontrollierte Rückstelleffekt, basierend auf der Kombination von Elastizität und pseudoplastischer Verformbarkeit, sowie die durch die Funkenerosion kraterförmig gehärtete Oberfläche. (Pirani et al. 2016)

Die HyFlex EDM OneFile hat eine höhere Resistenz gegenüber zyklischer Ermüdung als die Reciproc R25. Ihr Torsionswiderstand ist niedriger als der der Reciproc, wobei sie sich um einen größeren Winkel entdrillt als die Reciproc, bis es zur Torsionsfraktur kommt. (Pedullà et al. 2016a) Analoge Ergebnisse zeigt auch der Vergleich der HyFlex EDM mit Instrumenten aus Gold-CM-Wire. (Kaval et al. 2016)

Auch im Vergleich zur WaveOne Gold ist die HyFlex EDM resistenter gegen zyklische Ermüdung. (Gündoğar und Özyürek 2017)

## 2.2 Mikrocomputertomografie

Mithilfe der Mikrocomputertomografie werden aus den Daten eines um das Objekt rotierenden Röntgendetektors horizontale Schnittbilder rekonstruiert, die zusammen eine dreidimensionale Darstellung des Objekts ermöglichen.

Die zunehmende Verwendung der Mikrocomputertomografie in medizinischen und zahnmedizinischen Studien ist in der dreidimensionalen, weitgehend überlagerungs- und verzerrungsfreien Darstellung und in ihrer hohen Auflösung mit einer Voxel-Kantenlänge von 5 bis 50 µm begründet. Zudem stellt sie ein nicht invasives, reproduzierbares Verfahren dar.

Die Unterscheidung der Gewebe – wie Knochen, Schmelz, Dentin und Pulpakammer – erfolgt anhand deren Grauwerte, die mit deren Mineralgehalt korrelieren. (Swain und Xue 2009)

Mikro-CT-Aufnahmen sind geeignet, komplexe Strukturen wie das Wurzelkanalsystem darzustellen. (Peters et al. 2000; Bergmans et al. 2001) Insbesondere die Anatomie variabler Strukturen, wie die mesiobukkalen Kanäle der Oberkiefermolaren oder die apikale Konstriktion, werden analysiert. (Domark et al. 2013; Citterio et al. 2014; ElAyouti et al. 2014; Versiani et al. 2016)

Indem Dentin und Wurzelkanal in Mikro-CT-Aufnahmen voneinander abgegrenzt werden, können die quantitativen Unterschiede zwischen den Aufnahmen vor und nach Wurzelkanalaufbereitung erfasst werden. Werden die Strukturen innerhalb des Wurzelkanals qualitativ, also anhand ihrer Grauwerte, untersucht, können Aussagen zu Volumen und Dichte anorganischen Debris gemacht werden. (Paqué et al. 2009; Robinson et al. 2012)

In der Kariologie werden Schmelz- und Dentinläsionen anhand ihrer Mineralisationsdichte charakterisiert sowie Therapiemöglichkeiten untersucht. In solchen qualitativen

Analysen werden bei jeder Mikro-CT-Aufnahme Hydroxylapatit-haltige Modelle zur Kalibrierung mitgescannt. (Huang et al. 2007; Lai et al. 2014)

In Studien der restaurativen Zahnheilkunde werden Zahnersatz- und Füllmaterialien auf Inhomogenität und Randspalten untersucht. (Kaisarly 2014; Al-Harbi et al. 2015)

Wegen der langen Aufnahmezeit und Strahlenexposition ist die Mikrocomputertomografie auf den wissenschaftlichen Einsatz begrenzt. Die Möglichkeit einer dreidimensionalen Darstellung der dentoalveolären Strukturen am Patienten besteht in der digitalen Volumetomografie, in deren Bildern Wurzelkanal und Dentin ebenfalls voneinander abgegrenzt werden können. (Nair und Nair 2007; Blattner et al. 2010; Neelakantan et al. 2010; Reis et al. 2013)

### **2.3 Aktuelle Studienlage**

Die Qualität der Wurzelkanalaufbereitung wurde in zahlreichen *in vitro*-Studien untersucht, deren Zielsetzungen und Methoden sich in folgende Bereiche unterteilen lassen:

Zum einen werden bildgebende Verfahren angewendet, um die durch die Aufbereitung erzielte Formgebung und Reinigung der Wurzelkanäle sowie die Entstehung von Dentinrissen und die Ansammlung von Debris in Isthmen zu beurteilen.

Zum anderen wird die apikale Extrusion von Debris quantitativ bestimmt, indem dieses während der Präparation gesammelt und nach Trocknung gewogen wird.

Außerdem werden mikrobiologische Tests *in vitro* und *in vivo* durchgeführt, um die Reduktion der bakteriellen Besiedelung der Wurzelkanäle nach der Aufbereitung zu evaluieren.

Zusätzlich wird bei manchen Studien verglichen, wieviel Zeit für die Wurzelkanalpräparation mit verschiedenen Aufbereitungssystemen benötigt wird.

Als Versuchsdesign dient die Wurzelkanalaufbereitung an extrahierten Zähnen oder an artifiziellen Kanälen in Kunststoffkörpern.

Im Folgenden soll ein Überblick über diejenigen Studien gegeben werden, die Volumenänderung, Bearbeitung der Wurzelkanalwände sowie Begradigung und Transportation durch die zuvor beschriebenen Feilensysteme untersuchen.

Exemplarisch werden die Ergebnisse von Gergi et al. (2014) genannt.

### 2.3.1 Studien zur Evaluation der Volumenänderung

Um die Änderung des Wurzelkanalvolumens durch die Präparation zu messen, werden mithilfe von Mikrocomputertomografie (Mikro-CT) oder digitaler Volumetomografie (DVT) dreidimensionale Aufnahmen des Wurzelkanals vor und nach Präparation erstellt. Zur Berechnung des Dentinvolumens, das bei der Aufbereitung entfernt wurde, dient die Differenz des Wurzelkanalvolumens vor und nach Aufbereitung.

Gergi et al. berechneten für die Twisted File Adaptive ein mittleres Volumen abgetragenen Dentins von 1,07 mm<sup>3</sup>, für die Reciproc von 1,61 mm<sup>3</sup>.

(Gergi et al. 2014; Versiani et al. 2013; Capar et al. 2014; Marceliano-Alves et al. 2014; Grande et al. 2015b; Amoroso-Silva et al. 2016)

### 2.3.2 Studien zur Evaluation der nicht bearbeiteten Oberfläche

Nach Registrierung der Mikro-CT-Bilder vor und nach Wurzelkanalaufbereitung wird die nicht bearbeitete Oberfläche in Prozent als Anteil der „statischen“ Oberflächenvoxel an der Gesamtzahl der Oberflächenvoxel vor Aufbereitung angegeben. (Gergi et al.; Busquim et al. 2014; Grande et al. 2015b; Amoroso-Silva et al. 2016)

Auch anhand der Distanzen jedes Oberflächenpunktes vor Aufbereitung zur Oberfläche nach Aufbereitung können Aussagen über den Anteil der unbearbeiteten Oberfläche gemacht werden. (Siqueira et al. 2013)

Der mittlere Anteil der unbearbeiteten Oberfläche bewegt sich meist in einem Bereich von 20 – 50% und liegt für die Twisted File Adaptive bei 29%, für die Reciproc bei 21%.

(Gergi et al. 2014)

### 2.3.3 Studien zur Evaluation der Kanalbegradigung und Transportation

Zur Evaluation der Veränderungen des Kanalverlaufs, also der Begradigung und der Transportation, werden verschiedene bildgebende Verfahren und verschiedene Untersuchungsgrößen herangezogen.

Die Formänderungen artifizieller Kanäle durchsichtiger Kunststoffkörper können mithilfe von Fotografien vor und nach Kanalpräparation dokumentiert werden. Als Untersuchungsgrößen dienen Veränderungen des Wurzelkanalkrümmungswinkels- und -radius, Abweichungen der Kanalaußenwände oder der Kanalachsen. (Muñoz et al.

2014; Thompson et al. 2014; Özyürek et al. 2017)

Analog dazu werden Wurzelkanäle extrahierter Zähne mithilfe von Röntgenaufnahmen der vertikalen Ebene, also mit Strahlengang senkrecht zur Zahnachse, untersucht. (Bürklein et al. 2012; Saber et al. 2015a; Alrahabi und Alkady 2017)

In der horizontalen Ebene kann beurteilt werden, ob der Dentinabtrag zur Innen- und Außenkrümmung des Kanals hin gleichmäßig ist. In der Methode nach Gambill et al. werden hierfür die kürzesten Abstände der Kanalaußenwände zur Wurzeloberfläche in definierten horizontalen Schichten der Mikro-CT- oder DVT-Aufnahmen vor und nach Wurzelkanalaufbereitung gemessen und aus diesen Werten die Transportation in mesio-distaler Richtung sowie eine Zentrierungs-Ratio berechnet. (Gambill et al. 1996; Stern et al. 2012; Capar et al. 2014; Gergi et al. 2014; Hoppe et al. 2016)

Außerdem kann die Dicke der nach Aufbereitung verbleibenden Dentinwand gemessen werden, um die Gefahr einer Perforation in die Furkation, die Gefahrenzone eines Zahnes, zu beurteilen. (Sant'Anna et al. 2014)

Zur Auswertung der Änderungen des Kanalverlaufes im dreidimensionalen Raum werden ebenfalls Mikro-CT- oder DVT-Aufnahmen genutzt.

Mithilfe der von Estrela et al. beschriebenen Methode zur Bestimmung des Wurzelkanalkrümmungsradius anhand von DVT-Aufnahmen kann die Kanalbegradigung als Differenz der Krümmungen vor und nach Aufbereitung berechnet werden. (Estrela et al. 2008; Capar et al. 2014)

Zur Beurteilung der Transportation wird berechnet, wie weit die Kanalmittellinien vor und nach Aufbereitung voneinander entfernt liegen. Die Mittellinien werden in den jeweiligen Mikro-CT- oder DVT-Aufnahmen bestimmt, indem für jede Schicht der Massenschwerpunkt des Wurzelkanalquerschnitts berechnet wird und diese Punkte entlang der z-Achse zu einer Linie verbunden und geglättet werden. Die Abstände zwischen den Mittellinien können für den gesamten Kanal und für Kanalabschnitte, wie zervikales, mittleres und apikales Wurzelkanaldrittel, als Mittelwerte der Abstände zwischen den Punkten jeder z-Schicht in Millimeter berechnet werden. (Capar et al. 2014; Zhao et al. 2014; Grande et al. 2015b)

Für die Twisted File Adaptive ergab sich eine mittlere Transportation von 0,02 mm in allen Kanalbereichen, für die Reciproc von 0,05 mm im koronalen, 0,06 mm im mittleren und 0,07 mm im apikalen Wurzelkanaldrittel. (Gergi et al. 2014)

### 3 Zielsetzung

Die vorliegende *in vitro*-Studie untersucht die Qualität der Wurzelkanalaufbereitung der vier Feilensysteme Reciproc (REC), WaveOne Gold (WOG), Twisted File Adaptive (TFA) und HyFlex EDM (HFE) an extrahierten Molaren anhand von Mikro-CT-Aufnahmen. Als Merkmale der Aufbereitungsqualität dienen Volumen des abgetragenen Dentins, Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche und Transportation.

Die Nullhypothese lautet: „Die vier Gruppen unterscheiden sich nach Wurzelkanalaufbereitung mit den Feilensystemen Reciproc, WaveOne Gold, Twisted File Adaptive oder HyFlex EDM bezüglich ihrer Aufbereitungsqualität nicht“.

Anmerkung zur Nomenklatur: Transportation wird im Folgenden als Abweichung des Wurzelkanalverlaufes nach der Aufbereitung im Vergleich zum originären Kanalverlauf verwendet, unabhängig davon, ob diese Abweichung apikal oder in den anderen Kanalabschnitten auftritt.

## 4 Material und Methode

### 4.1 Natürliche humane Zähne

Das Studienprotokoll entspricht den Leitlinien für *in vitro*-Studien der zuständigen Ethikkommission (Projekt-Nummer 357-12).

Die Auswahl der Zähne geschah anhand folgender Kriterien: Es wurden Molaren des Oberkiefers mit drei separaten Wurzeln sowie Molaren des Unterkiefers mit zwei Wurzeln verwendet. Mindestens eine der Wurzeln wies eine Wurzelkrümmung auf. Mithilfe eines Operationsmikroskops (OPMI pico, Carl Zeiss Microscopy GmbH) wurde kontrolliert, dass das Wurzelwachstum abgeschlossen und das Dentin der Wurzeloberflächen frei von Rissen, Karies oder sonstigen Defekten war.

### 4.2 Vorbehandlung der Zähne

Nach deren Extraktion wurden die Zähne mit Handinstrumenten (Scaler; HU-Friedy Mfg. Co.) gereinigt und bis zur weiteren Bearbeitung in einer Formaldehyd-Lösung (10% Formaldehyd; Sigma-Aldrich Biochemie GmbH) gelagert. Die Trepanation wurde mit diamantierten Schleifkörpern (Zylinder und Battbohrer, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG) im roten Winkelstück (KaVo Dental GmbH) mit Wasserkühlung und Müller-Bohrern im grünen Winkelstück entsprechend der DGZMK-Richtlinien durchgeführt, sodass der Pulpakammerboden dargestellt und ein geradliniger Zugang zu den Wurzelkanaleingängen geschaffen wurde. (Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde 2000)

Von jedem Molaren wurden zwei Röntgenbilder aufgenommen: eines mit oro-vestibulärem und eines mit mesio-distalem Strahlengang. Sie dienten der Einschätzung der Wurzelkanalanatomie vor der weiteren Bearbeitung und deren Eignung für diese Studie. (Abbildung 16)



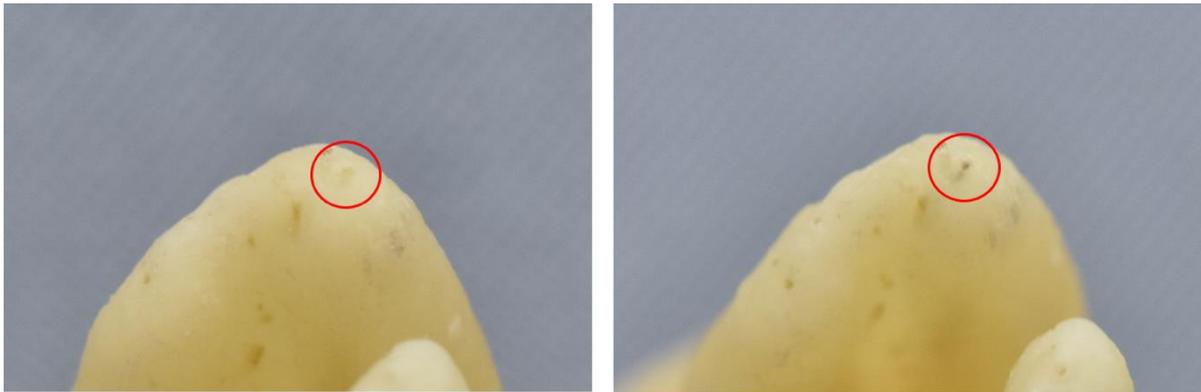
a: Strahlengang mesio-distal



b: Strahlengang oro-vestibulär

**Abbildung 16: Röntgenaufnahmen eines Oberkiefermolars**

Mit C-PILOT Feilen der ISO-Größen 08 und 10 (VDW GmbH) erfolgte die Sondierung der Wurzelkanäle unter wiederholter Spülung mit Natriumhypochlorit-Lösung (NaOCl, Natriumhypochlorit-Lösung 3% DAC, August Hedinger GmbH & Co. KG; Spritzenkörper 5ml, BD Plastipak; Endoneedle Dr. J. Buquet, Vedefar N.V.; NaviTip 30 Gauge / 25mm, Ultradent Products Inc.). Zur Bestimmung der Arbeitslänge wurde eine C-Feile der ISO-Größe 10 in den Wurzelkanal eingeführt, bis deren Spitze unter dem Operationsmikroskop (OPMI pico, Carl Zeiss Microscopy GmbH) gerade am apikalen Foramen sichtbar war; (Abbildung 17) in dieser Position wurde der Gummiring auf eine naheliegende Höckerspitze oder Randleiste eingestellt. Die Feile wurde anschließend entfernt, die eingestellte Länge an einem Stahllineal mit 0,5-Millimeter-Einteilung (HU-Friedy Mfg. Co.) gemessen und zusammen mit dem Referenzpunkt notiert. Von der gemessenen Länge wurde ein Millimeter abgezogen, um die Arbeitslänge zu erhalten.



a: Apex ohne Feile

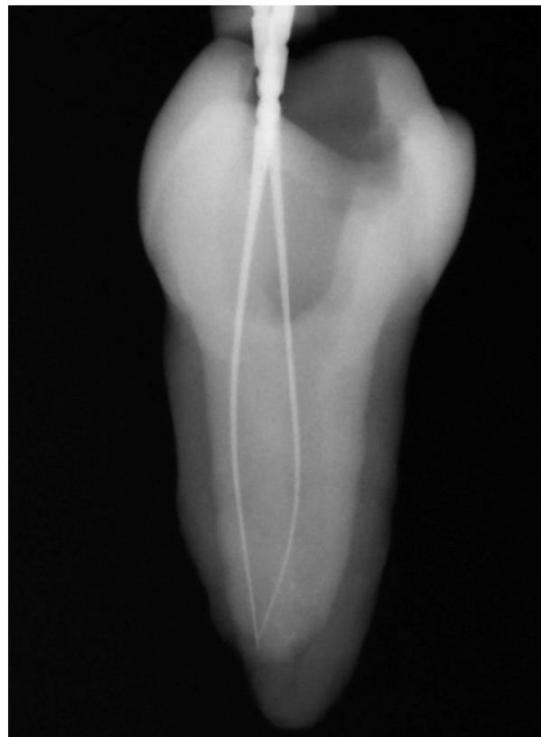
b: Feile endet am apikalen Foramen

**Abbildung 17: Bestimmung der Arbeitslänge**

Im Falle konfluierender Kanäle wurde die Arbeitslänge für den Kanal, bei dem die Feile leichter auf Arbeitslänge einzuführen war, beibehalten. Beim zweiten Kanal wurde die Arbeitslänge bis zur Einmündung reduziert. Um diese reduzierte Arbeitslänge zu bestimmen, wurde in den ersten Kanal eine Guttapercha-Spitze (Omnident HG mbH) eingebracht, so dass die Feile im zweiten Kanal nicht in den gemeinsamen apikalen Kanalabschnitt vordringen konnte. Zur Kontrolle beider Arbeitslängen wurden Röntgenbilder aufgenommen. (Abbildung 18)



a: Konfluation der Kanäle mb1 und mb2



b: Konfluation der Kanäle mb und ml

**Abbildung 18: Kontrolle der Arbeitslängen**

Die Erstellung des Gleitpfades auf Arbeitslänge erfolgte mit C-Feilen und K-Feilen (VDW GmbH) bis zur ISO-Größe 10 in einer rotierenden Arbeitsbewegung.

Für die abschließende Spülung der Wurzelkanäle sowie für die Lagerung bis zur weiteren Verwendung kam isotone Kochsalzlösung 0,9% (B. Braun Melsungen AG) zum Einsatz.

Anhand der Röntgenbilder wurden die Krümmungen der Wurzelkanäle nach der Methode von Weine vorläufig bestimmt, indem Geraden durch das Orifizium und durch den Apex gezogen wurden. (Abbildung 19) <sup>(Weine 1982)</sup> Für Werte von 0 – 20° wurden die Kanäle als wenig gekrümmt, für Werte ab 20 – 40° als moderat gekrümmt bezeichnet.

Anhand dieser Krümmungskategorien und der Arbeitslängen der Wurzelkanäle wurden die Zähne in vier ähnliche Versuchsgruppen zu je acht Oberkiefer- und acht Unterkiefermolaren eingeteilt, die jeweils mindestens 34 Kanäle mit moderater Krümmung und 20 Kanäle mit geringer Krümmung enthielten.



Zwischen den Geraden des oberen Wurzelkanalabschnittes ab dem Orifizium und der Geraden des unteren Wurzelkanalabschnittes ab dem Apex wird der Krümmungswinkel W bestimmt.

**Abbildung 19: Bestimmung des Krümmungswinkels nach Weine**

Um die Zähne sowohl während des Scannens im Mikro-CT als auch während der Wurzelkanalaufbereitung in einer starren, reproduzierbaren Position zu halten, wurden sie in hierfür hergestellte Halter eingebettet.

Diese Halter (Syndicad Ingenieurbüro) wurden aus Edelstahl gefräst und können mit ihrem zylinderförmigen, quer eingekerbten Zapfen in dem passenden Konter im Mikro-CT exakt positioniert werden. Die auf den Halter aufgesetzten Kunststoffhülsen weisen einen Durchmesser von 23 mm auf und können fixiert werden, indem der obere Teller

des Halters mit Hilfe von Schrauben nach unten gezogen wird und einen Gummiring gegen die Hülse aufspreizt. (Abbildung 20)



leerer Halter (links), Halter mit Hülle und Folie (Mitte) und mit eingebettetem Zahn (rechts)

**Abbildung 20: Probenhalter**

Als Einbettmasse wurde Technovit 4004 (Kulzer GmbH) gewählt. Dieses Methylmethacrylat-basierte Einbettmittel wurde in dem empfohlenen Mischungsverhältnis gemischt und in die Hülle auf dem Halter gegossen. (Kulzer GmbH 2015) Bei Beginn der Polymerisation wurde ein Zahn bis zur Schmelz-Zement-Grenze hineingesetzt und mit seiner Achse möglichst senkrecht ausgerichtet. Während des Aushärtens wurde der Halter zur Kühlung in ein Wasserbad gestellt.

Anschließend wurden feuchte Wattepellets in die Trepanationsöffnung und um die Zahnkrone gelegt und ein passender Kunststoffdeckel auf die Hülle gesetzt, um ein Austrocknen des Dentins zu vermeiden.

### **4.3 Mikrocomputertomografie**

Der im Halter eingebettete Zahn wurde in dem hochauflösenden Mikrocomputertomografie-Gerät (Mikro-CT 40, Scanco Medical AG) positioniert, um einen Scan vor Wurzelkanalaufbereitung aufzunehmen. Für alle Aufnahmen wurden dieselben Einstellungen, nämlich eine Beschleunigungsspannung von 70 kV und eine Stromstärke von 114  $\mu$ A in der Glühkathode, gewählt.

#### 4.4 Versuchsablauf

Die Aufbereitung aller Zähne wurde von einem Spezialisten für Endodontie entsprechend den Herstellerangaben durchgeführt, nachdem jeder Feilentyp zuvor an einigen Übungszähnen erprobt worden war.

Mithilfe einer zylinderförmigen Aussparung in einem Frasaco-Modell (frasaco GmbH) und drei Gewinden an einem Phantomkopf können die Halter darin fixiert werden. So wurde jeder Zahn in die Zahnreihe des Modells gestellt und im Phantomkopf an einer Simulationseinheit aufbereitet. (Abbildung 21)



a: Okklusalanzeige des Frasaco-Oberkiefer-Modells mit eingebettetem Zahn



b: Frasaco-Modelle im Phantomkopf



c: Phantomkopf mit Maske

**Abbildung 21: Frasaco-Modelle im Phantomkopf**

Zunächst wurde das feuchte Pellet aus der Trepanationsöffnung entfernt, das Wurzelkanalsystem mit NaOCl-Lösung geflutet und der Gleitpfad mit einer C-Feile der ISO-Größe 10 rekapituliert.

Jede Feile beziehungsweise jede Feilensequenz wurde zur Aufbereitung eines Zahnes mit drei oder vier Kanälen verwendet.

#### **4.4.1 Reciproc**

Zur Aufbereitung der Zähne der REC-Gruppe wurden die Reciproc-Feilen (VDW GmbH) vom VDW.GOLD-Motor (VDW GmbH) unter der Einstellung *RECIPROC ALL* (150°-30°; ~ 300 U/min) betrieben. Für die Kanäle der mesialen Wurzeln der Unterkiefermolaren sowie der mesiobukkalen und distobukkalen Wurzeln der Oberkiefermolaren wurden die R25-Feilen (ISO 25, Taper 0.08~), für die distalen und palatinalen Kanäle die R40-Feilen (ISO 40, Taper 0.06~) eingesetzt.

Der Beschreibung des Herstellers folgend, wurde mit dem Instrument in langsamen Auf- und Abbewegungen, sogenannten Picks, mit Amplituden von höchstens 3 mm im Kanal gearbeitet. Nach 3 Picks wurde das Instrument im Interim-Stand gereinigt, der Kanal mit NaOCl-Lösung gespült und die Gängigkeit des Kanals mit einer C-Feile der ISO-Größe 10 geprüft. Wenn die Feile die Arbeitslänge erreichte, galt die Aufbereitung als abgeschlossen. (VDW Dental)

#### **4.4.2 WaveOne Gold**

In der WOG-Gruppe wurde mit den WaveOne Gold-Feilen (Dentsply DeTrey GmbH) im VDW.GOLD-Motor (VDW GmbH) unter der Einstellung *WAVEONE ALL* (170°-50°; ~ 350 U/min) gearbeitet.

Wie vom Hersteller empfohlen, erfolgte die Aufbereitung aller Wurzelkanäle zunächst mit der WOG Primary-Feile (ISO 25, Taper 0.07~). Um die Notwendigkeit einer weiteren Aufbereitung zu prüfen, wurde die apikale Kanalgröße anhand der Klemmpassung der Feile im Kanal und anhand des entstehenden Dentinabtrags beurteilt. In den zweiten mesiobukkalen Kanälen der Oberkiefermolaren waren beide Kriterien erfüllt und es wurde nicht weiter aufbereitet. In den anderen mesiobukkalen sowie in den distobukkalen und mesiolingualen Kanälen wurde die Präparation mit den WOG Medium-Feilen (ISO 35, Taper 0.06~), in den distalen und palatinalen Kanälen mit den Large-Feilen (ISO 45, Taper 0.05~) abgeschlossen.

Die Instrumente wurden in Auf- und Abbewegungen mit Amplituden von maximal 3 mm im Kanal bewegt. Nach drei solcher Zyklen wurde das Instrument gereinigt, der Kanal gespült und mit einer C-Feile der ISO-Größe 10 rekapituliert. So wurde vorgegangen, bis die Feile die Arbeitslänge erreichte. (Dentsply 2015)

#### 4.4.3 Twisted File Adaptive

In der TFA-Gruppe kamen die Feilen der MEDIUM/LARGE-Sequenz des Twisted File Adaptive-Systems (SybronEndo – Kerr Co.) zum Einsatz, wobei der zugehörige Elements-Motor (SybronEndo – Kerr Co.) auf die verwendeten Feilen im *TF Adaptive Mode* (600°-0° bis 370°-50°, ~ 400 U/min) eingestellt wurde.

Zunächst wurde mit der grünen ML1-Feile (ISO-Größe 25, Taper 0.06) aufbereitet. Wenn Widerstand der Feile im Dentin spürbar wurde, wurde diese im Interim-Stand gereinigt, der Kanal gespült und mit einer C-Feile der ISO-Größe 10 rekapituliert. Analog zur klinischen Behandlung wurde der Substanzabtrag anhand des entstehenden Debris beurteilt und mit der ML1-Feile abgeschlossen, wenn deren Spanraum apikal mit Debris belegt war. Mit der gelben ML2-Feile (ISO-Größe 35, Taper 0.06) wurden die Kanäle ebenfalls auf Arbeitslänge aufbereitet.

In den weiten distalen Kanälen der Unterkiefermolaren und den palatinalen Kanälen der Oberkiefermolaren erfolgte die abschließende Präparation mit der roten ML3-Feile (ISO-Größe 50, Taper 0.04).

Wenn eine Feile deformiert war, wurde sie ersetzt, auch bevor alle Kanäle eines Zahnes aufbereitet waren. (Abbildung 22) (Kerr Endodontics 2015)



**Abbildung 22: Deformation und Entdrillung einer Twisted File Adaptive ML2**

#### 4.4.4 HyFlex EDM

In der HFE-Gruppe wurde mit den HyFlex EDM-Feilen (Coltène/Whaledent GmbH) in dem kabellosen Handstück CanalPro CL (Coltène/Whaledent GmbH) unter dem empfohlenen Modus (400 U/Min, 2,5 N\*cm) gearbeitet.

Nach Erweitern des Wurzelkanaleingangs mit dem Orifice Opener (ISO 25, Taper 0.25) wurde der Gleitpfad mit der Glidepath-Feile (ISO 10, Taper 0.05) auf Arbeitslänge

verifiziert. Der nächste Schritt war die Wurzelkanalpräparation mit der OneFile (ISO 25, Taper 0.08~). Für die anschließende Aufbereitung standen die Finishing-Feilen 1 (ISO-Größe 40, Taper 0.04) und 2 (ISO-Größe 50, Taper 0.03) zur Wahl. Diese wurden auf Arbeitslänge angewendet. Wenn bei der Aufbereitung kein gleichmäßiger Dentinabtrag erfolgte oder die Feile keine Klemmpassung im Kanal aufwies, wurde mit der nächstgrößeren Feile fortgefahren. Die endgültige Aufbereitungsgröße lag bei ISO 25 bis 40 für die mesiobukkalen, mesiolingualen und distobukkalen Kanäle und bei ISO 40 bis 50 für die distalen und palatinalen Kanäle.

Zwischen jedem Feilenwechsel oder bei Widerstand der Feile im Kanal wurde dieser gespült, die Gängigkeit des Kanals mit einer C-Feile der ISO-Größe 10 kontrolliert und die Feile gereinigt. <sup>(Coltène/Whaledent)</sup>

Im mesiolingualen Kanal eines Unterkiefermolars frakturierte bei der Aufbereitung eine OneFile, bevor diese die Arbeitslänge erreicht hatte. Der Zahn wurde daraufhin ersetzt und nicht für die weitere Auswertung verwendet.

Nach Abschluss der Wurzelkanalaufbereitung wurden die Kanäle nochmals gespült: zunächst mit 5 ml EDTA-, dann mit 5 ml NaOCI-Lösung (Spritzkörper 5ml, BD Plastipak; NaviTip 30 Gauge / 25mm, Ultradent Products Inc.). Nach dem Trocknen der Kanäle mit Papierspitzen (Omnident HGmbH) wurden mit isotoner Kochsalzlösung getränkte Wattepellets in die Trepanationsöffnung und in den Halter gelegt.

Beim erneuten Scannen der Zähne im Mikro-CT wurden sowohl die Position des Halters als auch die technischen Einstellungen genau wie bei der ersten Aufnahme gewählt.

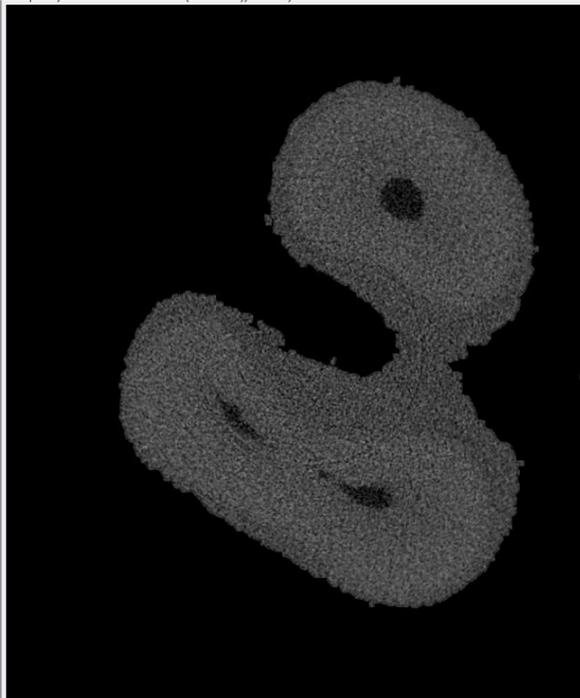
## **4.5 Auswertung**

### **4.5.1 Bildverarbeitung und Datenerhebung**

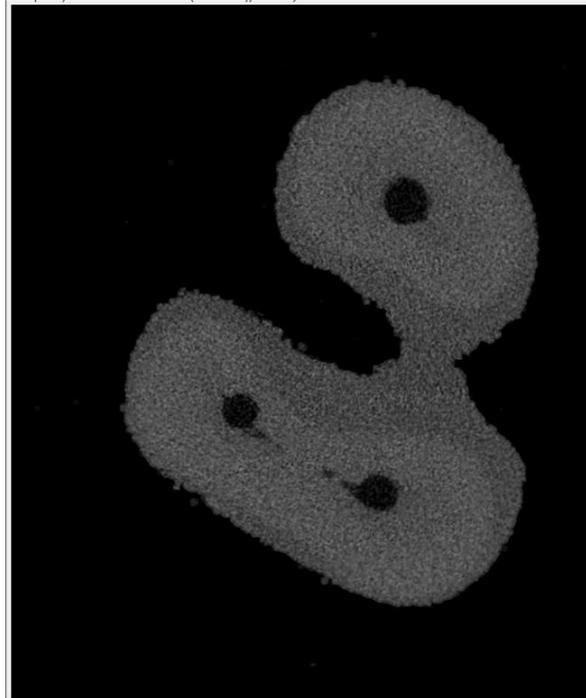
Aus den vom Mikro-CT gewonnenen Daten wurden ISQ-Files rekonstruiert, die eine Voxelgröße von 20 µm und eine Farbausdifferenzierung von 16 bit haben. Zur Verarbeitung wurde das Programm Fiji (Fiji Is Just ImageJ) genutzt.

Fiji ist ein freies und quelloffenes Bildbearbeitungsprogramm, das die Entwickler als Distribution von Plugins und Menüstrukturen für die umfangreiche Java-Bildbearbeitungsbibliothek ImageJ bezeichnen. <sup>(MediaWiki 2016)</sup>

Nach Öffnen der ISQ-Files mit dem Plugin *KHKs Scanco microct ISQ FileReader* wurden diese mithilfe des Plugins *3D IO > MetalImage Writer* im mhd-Format gespeichert. Um die Position jedes Bildes vor Wurzelkanalaufbereitung (Pre) mit dem jeweiligen Bild nach Wurzelkanalaufbereitung (Post) in Übereinstimmung zu bringen, wurde eine starre Registrierung durchgeführt, die auf dem *Insight Toolkit, ITK* (ITK.org), basiert. (Abbildung 23)



a: horizontale Schicht im Bereich der Wurzeln vor Aufbereitung (Pre)



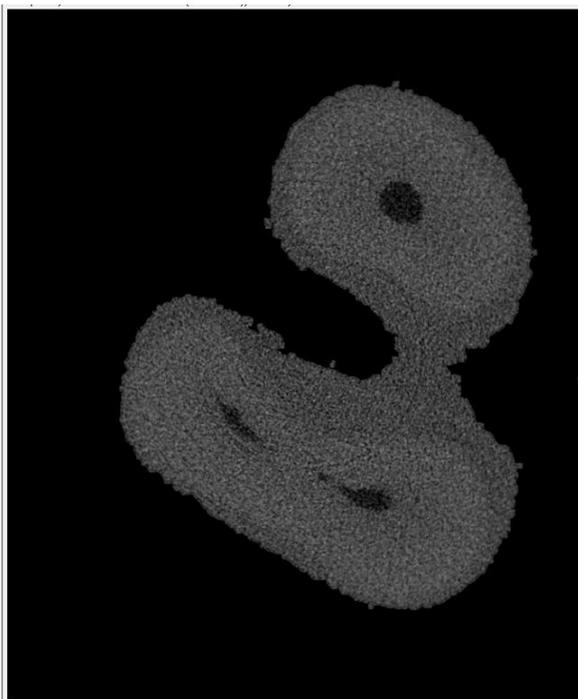
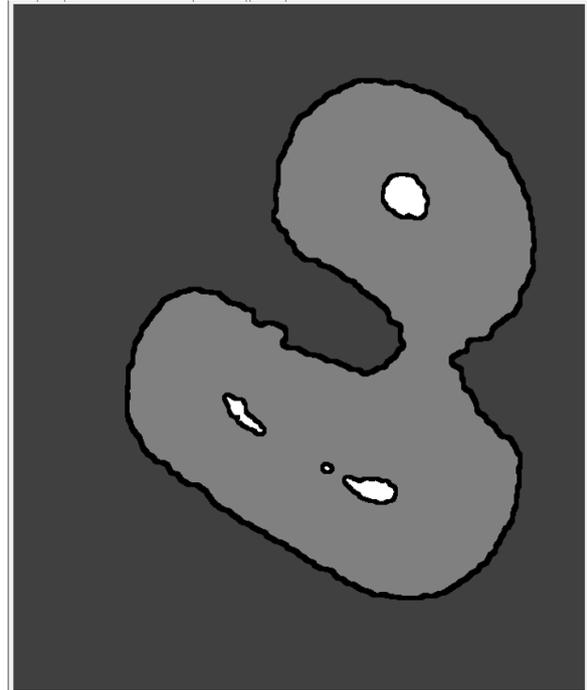
b: dieselbe Schicht des zugehörigen Post-Bildes nach starrer Registrierung

**Abbildung 23: Mikro-CT-Aufnahmen vor und nach Wurzelkanalaufbereitung**

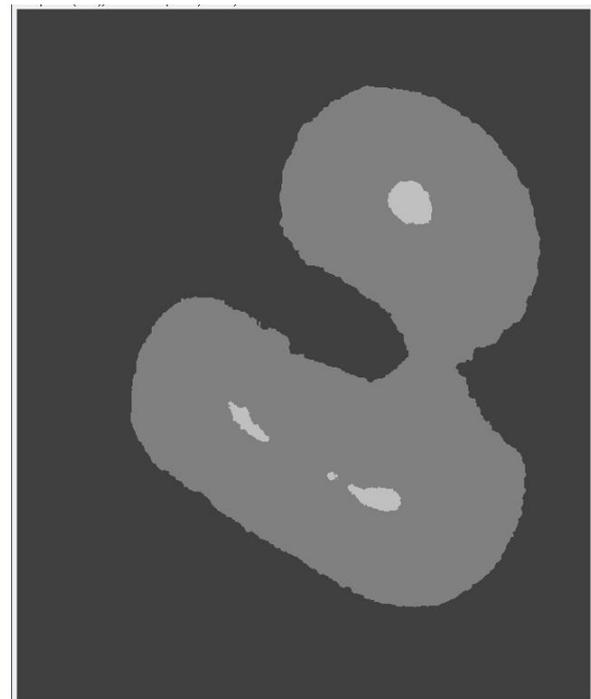
Unter *Image > Properties* wurde die Voxelgröße auf 20 µm korrigiert.

Zur Segmentierung der verschiedenen Strukturen im Bild – Dentin, Pulpa, Hintergrund und gegebenenfalls Dentikel – wurde der Schwellwert unter *Adjust threshold* jeweils auf das Dentin, die Pulpa und den Hintergrund eingestellt und jedes entstehende Binärbild mithilfe der Binärfunktion *Erode* und *Median Filter* bearbeitet, sodass gestreute Pixel entfernt und alle Komponenten verkleinert wurden. Aus den einzelnen Binärbildern wurde eine Maske erstellt, in der jeder der vorhandenen Strukturen ein fester Grauwert zugeordnet wurde. Anhand dieser Maske erfolgte die Segmentierung durch das Plugin *Segmentation > Seeded Region Growing*. (Abbildung 24)

a (rechts): Maske mit den Strukturen Pulpa (weiß), Dentin (hellgrau) und Hintergrund (dunkelgrau). In den schwarzen Bereichen werden die Strukturgrenzen vom Plugin *Seeded Region Growing* anhand des Ausgangsbildes bestimmt.



b: Ausgangsbild



c: Ergebnisbild des *Seeded Region Growing*

**Abbildung 24: Seeded Region Growing**

Anschließend erfolgte das Zuschneiden der einzelnen Kanäle aus den Bildern des gesamten Zahnes.

Im Plugin *Stacks > Crop 3D* können aus Pre- und Post-Bild dieselben Ausschnitte erstellt werden. So wurde jeder Kanal vom Wurzelkanaleingang bis zum apikalen Endpunkt der Aufbereitung, also in der Regel zur apikalen Konstriktion, ausgewählt,

der Schwellwert auf den Grauwert des Wurzelkanals eingestellt und das gewonnene binäre Bild im mhd-Format gespeichert.

Wenn Kanäle konfluieren oder über Isthmen verbunden sind, ist es nicht möglich, diese zuzuschneiden. Deshalb konnten konfluierende mesiale und mesiobukkale Kanäle nicht mithilfe der folgenden Schritte ausgewertet werden.

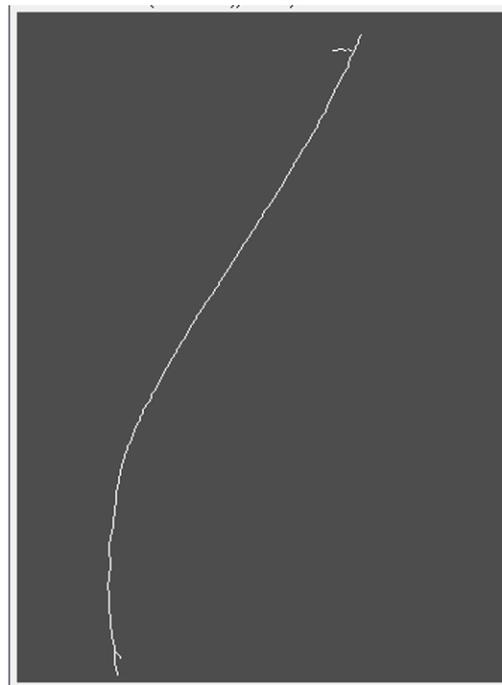
Zur Glättung der Kanal-Bilder wurde der dreidimensionale Medianfilter unter *Process > Filters > Median 3D* verwendet.

#### 4.5.1.1 Bestimmung der Wurzelkanalmittellinien

Um die Wurzelkanallänge, -krümmung und Transportation bestimmen zu können, wurden die Mittellinien der Wurzelkanäle in den Pre- und Post-Kanal-Bildern bestimmt. Hierfür wurde das Plugin *Skeleton > Skeletonize (2D/3D)* verwendet. Dieses entfernt so lange die Oberflächen-Voxel eines Körpers, bis nur noch dessen „Skelett“ beziehungsweise dessen Mittellinie vorhanden ist. (Abbildung 25)



a: Wurzelkanal



b: Ergebnis der Skelettierung:  
Die Mittellinie ist an beiden Enden verkürzt  
und hat abzweigende Linien

**Abbildung 25: Skelettierung** (vereinfachte, zweidimensionale Darstellung)

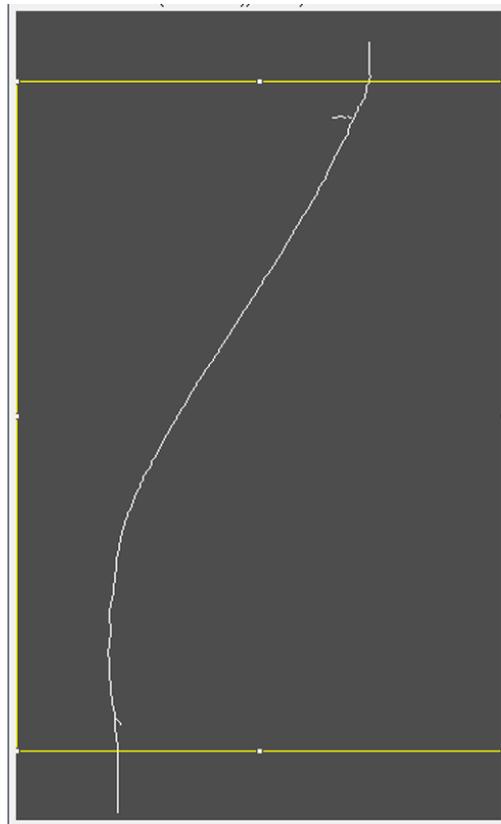
Da hierbei auch die Voxel der obersten (zervikalen) und untersten (apikalen) Schichten entfernt werden, wurde vor der Skelettierung sowohl die erste als auch die letzte

Schicht fünfzigmal kopiert und angefügt. Nach der Skelettierung wurden diese insgesamt einhundert zusätzlichen Schichten wieder entfernt. Die Skelett-Linien konnten somit auf der gesamten Länge des Wurzelkanals erstellt werden. (Abbildung 26)

In Bereichen, in denen der Wurzelkanalquerschnitt weniger rund, sondern eher längsoval oder kantig ist, entstehen beim Skelettieren zusätzliche, von der Mittellinie in diese Nischen abzweigende Linien. Solche abzweigenden Linien wurden entfernt, indem die Mittellinie in den betroffenen Abschnitten mit dem *Oval selection*-Tool markiert und die außerhalb dieser Selektion liegenden Linien mit dem Plugin *KHKs Utilities > ClearOutsideWithNaN* gelöscht wurden. (Abbildung 27)

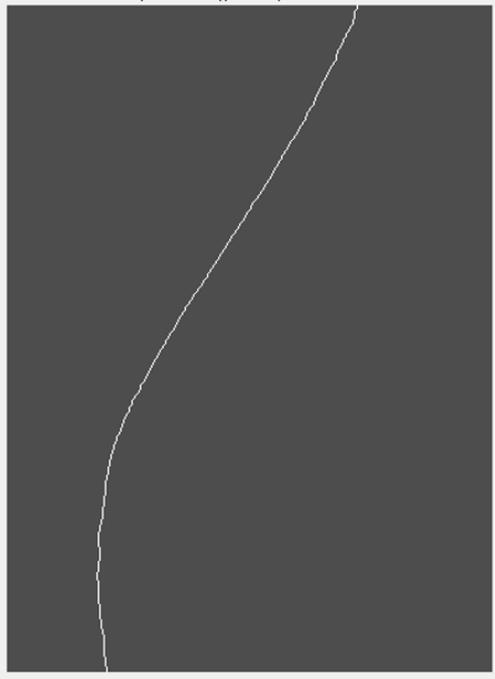


a: Wurzelkanal mit angefügten z-Schichten oben und unten



b: Skelett-Linien. Der Bereich der angefügten Schichten ist markiert (gelbe Linien)

**Abbildung 26: Skelettierung eines Kanals mit vervielfachter erster und letzter Schicht**  
(vereinfachte, zweidimensionale Darstellung)



a: Skelett-Mittellinie nach Entfernen der angefügten z-Schichten und der abzweigenden Linien



b: Verlauf der Mittellinie im Wurzelkanal

**Abbildung 27: Mittellinie als Ergebnis von Skelettierung und Nachbearbeitung**  
(vereinfachte, zweidimensionale Darstellung)

Die Mittellinien von Pre- und Post-Kanal-Bild wurden von dem Programm *RootCanalAnalysis* (Rösch 2011) unter Verwendung des *Insight Toolkits ITK* erfasst. Die vom Programm ausgegebenen Text-Dateien enthalten für jeden Mittellinien-Punkt die Koordinaten im dreidimensionalen Raum und die Lagebeziehung zu Nachbarpunkten.

Die Koordinaten der Mittellinienpunkte wurden auch für die Berechnung der Wurzelkanallänge genutzt. (siehe Formel [1])

Vom letzten apikalen Punkt aus wurde jeder Kanal in drei jeweils 3 mm lange Abschnitte eingeteilt. Die Z-Koordinaten, in denen die Mittellinien-Punkte mit 3 mm, 6 mm und 9 mm Entfernung zum apikalen Punkt liegen, wurden als Z(P3), Z(P6) und Z(P9) bezeichnet.

Die Bilder wurden unter *Stacks > Crop* jeweils bis zur Z-Schicht Z(P3), Z(P6) und Z(P9) zugeschnitten, um die folgenden Schritte zur Bestimmung der Volumina und der Oberflächen für die Wurzelkanalabschnitte separat durchführen zu können.

#### 4.5.1.2 Bestimmung der Volumina

Um die Volumina der Wurzelkanäle vor und nach Wurzelkanalaufbereitung zu bestimmen, wurde mit dem *3D Objects Counter* eine *Statistics*-Tabelle (OC-Tabelle)

für jedes Pre- und Post-Kanal-Bild erstellt und als Excel-Dokument gespeichert. Diese OC-Tabelle enthält das Volumen in mm<sup>3</sup>, die Oberfläche in mm<sup>2</sup>, die Anzahl der Voxel und der Oberflächen-Voxel sowie Angaben zur Verteilung der Grauwerte.

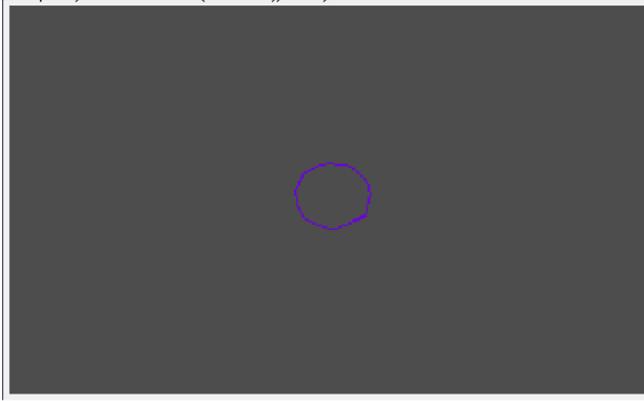
#### **4.5.1.3 Bestimmung der Wurzelkanaloberfläche und der nicht bearbeiteten Oberfläche**

Die Oberfläche des Kanal-Bildes umfasst sowohl die Wurzelkanaloberfläche als auch die Schnittflächen der ersten und letzten Schicht. Um die Wurzelkanaloberfläche allein berechnen zu können, wurden die Schnittflächen der ersten und letzten Schicht bestimmt.

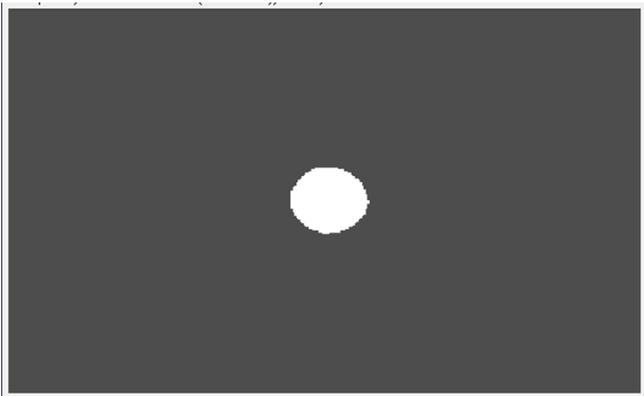
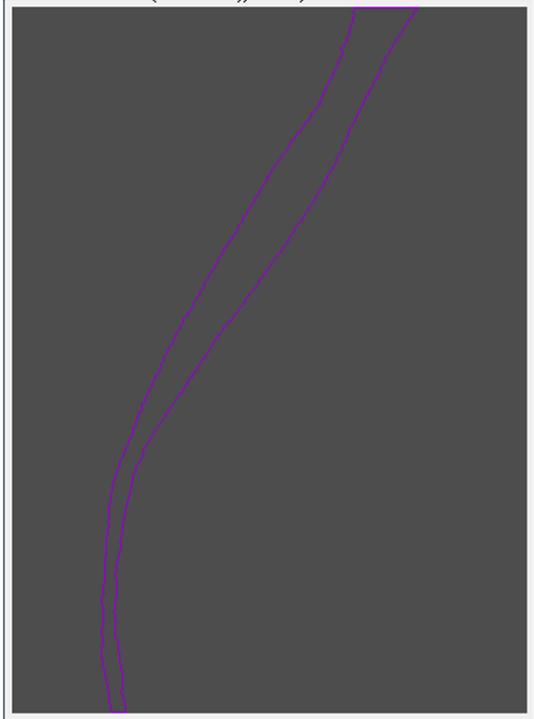
Die *Surface map* des Pre-Kanal-Bildes, ebenfalls mithilfe des *3D Objects Counters* erstellt, enthält ausschließlich die Oberflächen-Voxel des Ausgangsbildes. Nach Löschen der beiden Schnittflächen wurde der Grauwert der Oberflächen-Voxel durch die *Multiply*-Funktion auf 5 gesetzt.

Im zugehörigen Post-Kanal-Bild wurden mit dem *Binary-Tool Erode* die Oberflächen-Voxel hingegen entfernt und durch die *Subtract*-Funktion der Grauwert des Kanalvolumens auf 2 gesetzt.

Anschließend wurde mithilfe des *Image Calculators* von der Pre-Surface map das Post-Kanalvolumen subtrahiert. Das Ergebnisbild enthält die unbearbeiteten Oberflächen-Voxel des Pre-Bildes unverändert mit einem Grauwert von 5 sowie diejenigen Oberflächen-Voxel mit einem Grauwert von 3, die bei der Präparation abgetragen wurden und somit im Post-Kanal-Bild innerhalb der Wurzelkanaloberfläche liegen. (Abbildung 28)

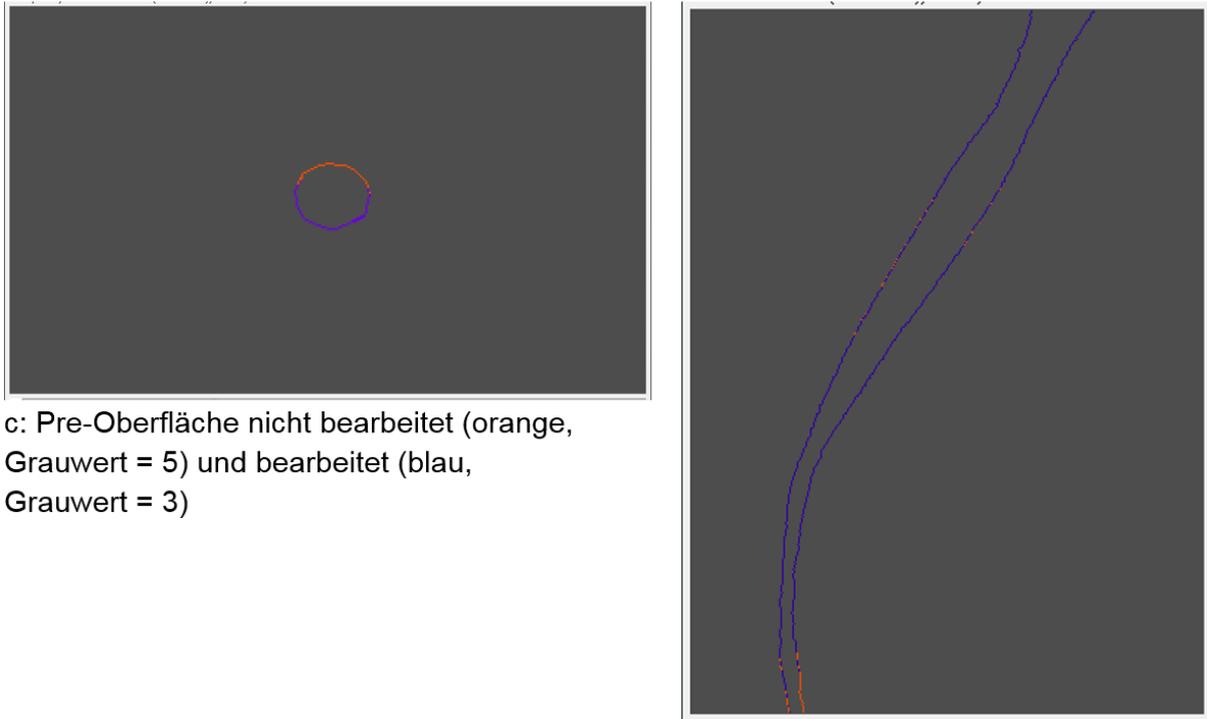


a: Pre-Oberfläche (blau, Grauwert = 5)



b: Post-Volumen *eroded* (weiß, Grauwert = 2)





c: Pre-Oberfläche nicht bearbeitet (orange, Grauwert = 5) und bearbeitet (blau, Grauwert = 3)

**Abbildung 28: Bestimmung der nicht bearbeiteten Oberfläche** (horizontale und vertikale Schicht)

Dieses Ergebnisbild wurde jeweils bis zur Z-Schicht Z(P3), Z(P6) und Z(P9) zugeschnitten und im mhd-Format gespeichert. Zur Analyse wurde der *3D Objects Counter* auf einen *Threshold* von 4 und einen *Size filter* von 10 eingestellt. Die gewonnene Ergebnistabelle enthält die Flächen der nicht bearbeiteten Oberfläche, die mindestens 10 Voxel groß sind, und wurde als Excel-Dokument gespeichert.

#### 4.5.1.4 Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung

Die Krümmungswinkel der Wurzelkanäle wurden anhand zweier 3 mm langer Liniensegmente für jeden Punkt der geglätteten Mittellinien, der mindestens 3 mm vom obersten und untersten Punkt entfernt ist, bestimmt (*centreLineBendingAngle.py*).

(Rösch 2011)

#### 4.5.1.5 Bestimmung der Transportation

Das Programm *CentreLineShift.py* glättet die Mittellinien mit einem Dreiecksfilter und berechnet die Distanz der Pre- und Post-Mittellinien zueinander. Die vom Programm ausgegebenen Text-Dateien enthalten für jeden Mittellinien-Punkt die Koordinaten im dreidimensionalen Raum und die Distanz zum nächstgelegenen Punkt der zugehörigen Pre-/Post-Mittellinie. (Rösch 2011)

#### 4.5.2 Datenberechnung

Die erhobenen Daten wurden in einer Excel-Tabelle zusammengefasst. Diese enthält außerdem für jeden Wurzelkanal folgende Informationen:

- Zahn: Oberkiefer- (OK) oder Unterkiefermolar (UK)
- Kanal: mesiobukkaler (mb), distobukkaler (db) oder palatinaler (p) Kanal für Oberkiefermolaren
- Mesiobukkaler (mb), mesiolingualer (ml) oder distaler (d) Kanal für Unterkiefermolaren
- Feile: REC, WOG, TFA, HFE
- Aufbereitungsgröße: ISO 25, ISO 45 oder ISO 50 für die REC  
ISO 25, ISO 35 oder ISO 45 für die WOG  
ISO 25, ISO 35 oder ISO 50 für die TFA  
ISO 25, ISO 40 oder ISO 50 für die HFE

##### 4.5.2.1 Auswertung der Wurzelkanallänge

Die Wurzelkanallänge  $L$  wurde als Summe aller geometrischen Abstände benachbarter Mittellinien-Punkte bestimmt.

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} l_i \quad \text{mit } l_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad [1]$$

$n$  = Anzahl der ausgewerteten Mittellinien-Punkte

Raumkoordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$

##### 4.5.2.2 Auswertung der Volumenänderung

Aus den OC-Tabellen wurden die Wurzelkanalvolumina vor und nach Aufbereitung in  $\text{mm}^3$  übernommen und die Volumenänderung  $\Delta V$ , die dem Volumen des abgetragenen Dentins entspricht, berechnet.

$$\Delta V = V_{Post} - V_{Pre} \quad [2]$$

Die Volumina und die Volumenänderung wurden für den gesamten Kanal sowie für jedes Wurzelkanaldrittel angegeben.

#### 4.5.2.3 Auswertung der Wurzelkanaloberfläche und der nicht bearbeiteten Oberfläche

Zunächst wurde die Wurzelkanaloberfläche  $A$  berechnet, indem von der Oberfläche des gesamten Segments  $A_{Seg}$  die der beiden Schnittflächen  $S1$  ( $A_{S1}$ ) und  $S2$  ( $A_{S2}$ ) subtrahiert wurden.

$$A [\text{mm}^2] = A_{Seg} - A_{S1} - A_{S2} \quad [3]$$

Zur Berechnung des Anteils der nicht bearbeiteten Oberfläche  $R_{nb0}$  wurde die Summe der nicht bearbeiteten Flächen ( $A_{nb}$ ) gebildet und zur Wurzelkanaloberfläche vor Aufbereitung ( $A_{Pre}$ ) in Relation gesetzt:

$$R_{nb0}[\%] = \frac{A_{nb}}{A_{Pre}} \times 100 \quad [4]$$

Die Oberflächen und der Anteil der nicht bearbeiteten Oberflächen wurden für den gesamten Kanal sowie für jedes Wurzelkanaldrittel berechnet.

#### 4.5.2.4 Auswertung der Wurzelkanalkrümmung

Die Wurzelkanalkrümmungen  $\gamma_{Pre}$  und  $\gamma_{Post}$  wurden folgendermaßen definiert:

Für den Pre-Kanal wurde das Maximum der Krümmungswinkel  $\gamma(z)$  ermittelt und festgehalten, in welcher Schicht ( $z_\gamma$ ) dieses liegt.

$$\gamma_{Pre} = \gamma_{Pre}(z = z_\gamma) = \max(\gamma_{Pre}(z)) \quad [5]$$

Für den Post-Kanal wurde der Krümmungswinkel in derjenigen Schicht ( $z_\gamma$ ) angegeben, in der die Pre-Krümmung liegt.

$$\gamma_{Post} = \gamma_{Post}(z = z_\gamma) \quad [6]$$

#### 4.5.2.5 Auswertung der Transportation

Zur Beurteilung der Transportation  $T$  wurde der Mittelwert  $\bar{d}_{1;n}$  der Distanzen ( $d$ ) der Punkte der Post-Mittellinie zur Pre-Mittellinie berechnet.

$$T [\text{mm}] = \bar{d}_{1;n} \quad [7]$$

$n$  = Anzahl der ausgewerteten Mittellinien-Punkte

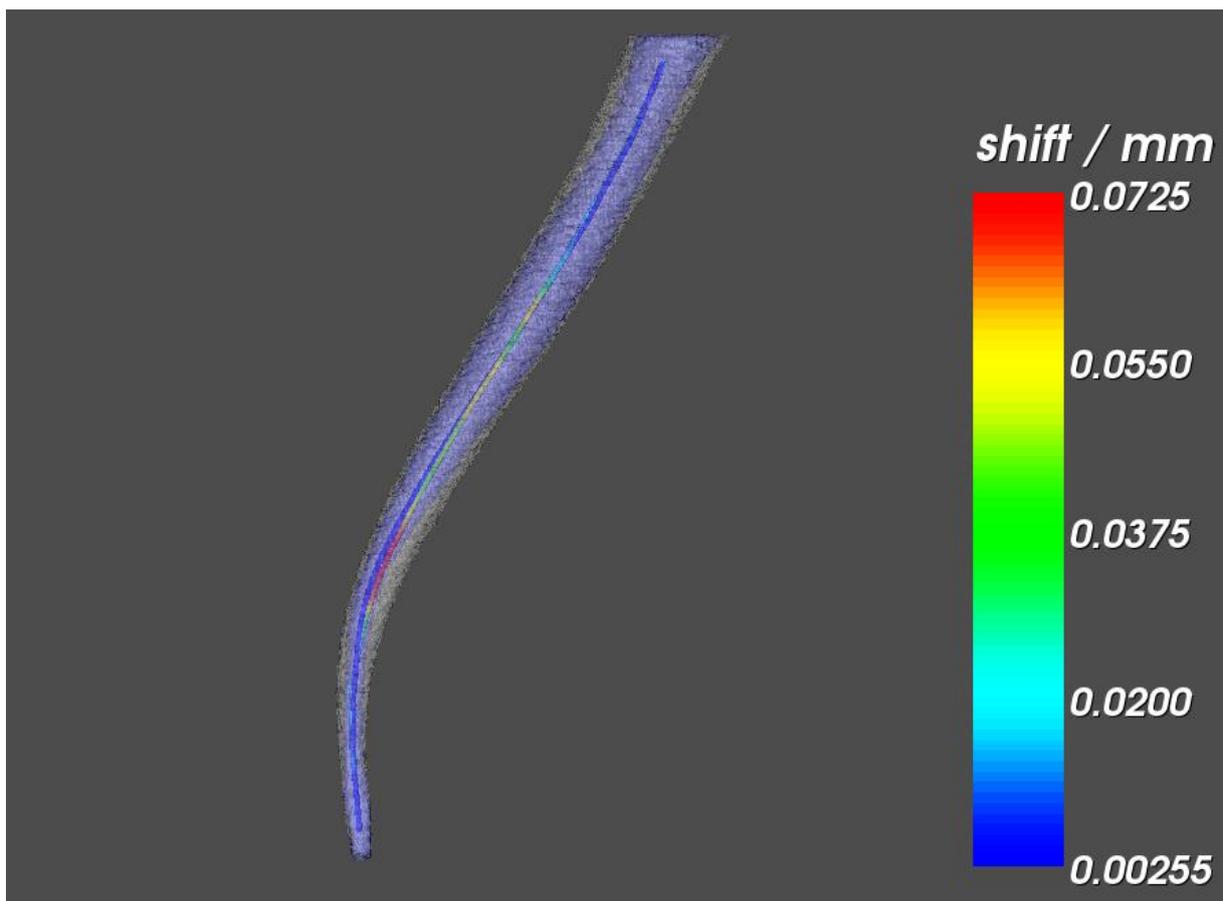
Die Transportation wurde für den gesamten Wurzelkanal anhand aller Mittellinien-Punkte, als auch separat für das zervikale, das mittlere und das apikale Wurzelkanaldrittel bestimmt.

#### 4.5.3 Visualisierung der Transportation

Zur Visualisierung der Transportation wurde ein auf dem Visualization Toolkit (VTK.org) basierendes Programm genutzt (*showShiftOverlay*). Dieses zeigt die Mittellinien vor und nach Wurzelkanalpräparation und deren Lage im Wurzelkanal.

Dabei wird jeder Punkt der Mittellinien als Kugel dargestellt, deren Farbe im Falle der Post-Linie farblich kodiert ist, um die Größe der Transportation zu veranschaulichen. Die Oberflächen des Pre- und Post-Wurzelkanals werden semitransparent dargestellt.

(Abbildung 29) (Rösch 2011)



**Abbildung 29: Visualisierung der Transportation**

blau: Pre-Kanal (Oberfläche und Mittellinie)

grau: Post-Kanal (Oberfläche)

blau-grün-gelb-rot: Transportation des Post-Kanals (Mittellinie)

## **4.6 Statistische Auswertung**

Mithilfe der statistischen Auswertung soll die Nullhypothese überprüft werden: „Die vier Gruppen unterscheiden sich nach Wurzelkanalaufbereitung mit den Feilensystemen Reciproc, WaveOne Gold, Twisted File Adaptive beziehungsweise HyFlex EDM bezüglich ihrer Aufbereitungsqualität nicht.“ Als Merkmale für die Aufbereitungsqualität dienen Verhältnis der Volumenänderung, nicht bearbeitete Oberfläche und Transportation.

### **4.6.1 Auswahl der Wurzelkanäle für die statistische Auswertung**

Nachdem keine konfluierenden Kanäle für die Auswertung verwendet werden konnten, war die Anzahl der Kanäle in den Gruppen vor der statistischen Auswertung unterschiedlich.

Die Gruppen erschienen inhomogen in Bezug auf ihre Wurzelkanalkrümmung, wobei diese zwischen  $5,9^\circ$  und  $42,6^\circ$  lag.

Um die Gruppen auf möglichst ähnliche Ausgangswerte zu begrenzen, wurden die Kanäle in der Excel-Tabelle aufsteigend nach ihrer Wurzelkanalkrümmung sortiert. Für die statistische Auswertung wurden für die jeweiligen Kanaltypen diejenigen 4 distalen und palatinalen beziehungsweise 8 mesialen, mesiobukkalen und distobukkalen Kanäle ausgewählt, deren Werte innerhalb von  $11^\circ$  bis  $31^\circ$  lagen.

### **4.6.2 Statistische Auswertung**

Die Auswertung wurde mithilfe des Statistik-Programmes SPSS (IBM SPSS Statistics, Version 2.4) durchgeführt.

Die unabhängigen Variablen – Volumen, Oberfläche und Krümmung des Wurzelkanals vor Aufbereitung – und die abhängigen Variablen – Volumenänderung, nicht bearbeitete Oberfläche und Transportation – der vier Gruppen (REC, WOG, TFA, HFE) wurden sowohl für die gesamten Gruppen als auch separat für die Untergruppen der kleinen ISO-Größen (Aufbereitung bis ISO 25 – ISO 35) und der großen ISO-Größen (Aufbereitung bis ISO 40 – ISO 50) gegeneinander getestet.

Zuvor wurden alle Variablen mit dem Shapiro-Wilk-Test auf ihre Normalverteilung geprüft. Wenn für eine Variable sowohl über die Gesamtheit der Gruppen als auch

über die Gruppe der einzelnen Feilen eine Normalverteilung vorlag, so wurde diese mit dem ANOVA-Test (einfaktorielle Varianzanalyse) ausgewertet.

Im Falle nicht-normalverteilter Variablen wurde der Kruskal-Wallis-Test herangezogen. Das Signifikanzniveau wurde auf 5% gesetzt: In den Daten gefundene Unterschiede werden als nicht signifikant bezeichnet, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit ( $p$ ) nach Bonferroni-Korrektur größer als 5% ist ( $p > 0,05$ ), beziehungsweise als signifikant bezeichnet, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit bei höchstens 5% liegt ( $p \leq 0,05$ ).

## 5 Ergebnisse

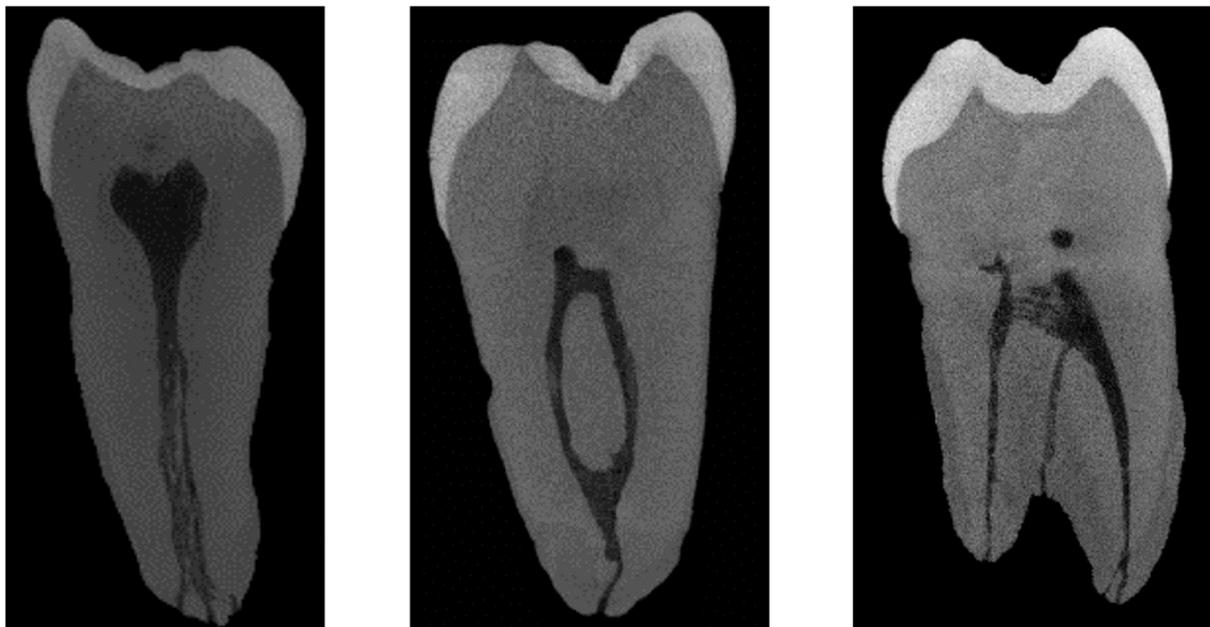
### 5.1 Morphologie der Wurzelkanäle

Nachdem sich schon bei Trepanation der Zähne die Variabilität der Wurzelkanalsysteme gezeigt hatte, wurde dies auch in den Mikro-CT-Aufnahmen sichtbar. (Abbildung 30, Abbildung 31)

Bei den 32 Unterkiefermolaren lagen in 14 (44%) mesialen Wurzeln konfluierende Kanalkonfigurationen und in 16 (50%) mesialen Wurzeln zwei separate Kanäle vor, zweimal (6%) hatte die mesiale Wurzel drei Kanäle; in neun (28%) distalen Wurzeln lagen zwei Kanäle vor.

Von den 32 mesiobukkalen Wurzeln der Oberkiefermolaren hatten 18 (56%) konfluierende Kanäle, achtmal (25%) wurden einzelne Kanäle und sechsmal (19%) zwei separate mesiobukkale Kanäle vorgefunden. Distobukkal und palatinal lag in allen Zähnen je ein Kanal vor.

Dentikel wurden in 12 der 32 Zähne (18%) gefunden. War ein Kanal in weiten Teilen von Dentikeln obliteriert, wurde er nicht in die Auswertung einbezogen.



a: distale Wurzel

b: mesiale Wurzel

c: mesiale Wurzel

**Abbildung 30: Anatomie der Unterkiefermolaren** (Rekonstruktion aus vertikalen Mikro-CT-Schichten)



a-c: Darstellung der mesiobukkalen und der palatinalen Wurzeln

**Abbildung 31: Anatomie der Oberkiefermolaren** (Rekonstruktion aus vertikalen Mikro-CT-Schichten)

## 5.2 Volumen, Oberfläche und Wurzelkanalkrümmung vor Wurzelkanalaufbereitung

Die unabhängigen Variablen Wurzelkanalvolumen, Oberfläche und Wurzelkanalkrümmung weisen für die gesamten Kanäle in beiden Untergruppen ISO 25 – 35 und ISO 40 – 50 Normalverteilungen und keine signifikanten Unterschiede zwischen den jeweils vier Untersuchungsgruppen HFE, REC, TFA, WOG auf.

In der Untergruppe ISO 25 – 35 haben die Kanäle vor Aufbereitung ein mittleres Volumen von  $1,29 \pm 0,43 \text{ mm}^3$ , in der Untergruppe ISO 40 – 50 von  $2,79 \pm 1,14 \text{ mm}^3$ . Die Wurzelkanaloberflächen haben einen Mittelwert von  $19,8 \pm 3,8 \text{ mm}^2$  beziehungsweise  $28,0 \pm 7,2 \text{ mm}^2$ . Die Wurzelkanalkrümmung liegt in der Untergruppe ISO 25 – 35 bei  $20,8^\circ \pm 5,0^\circ$ , in der Untergruppe ISO 40 – 50 bei  $16,7^\circ \pm 3,6^\circ$ .

Die Mittelwerte und Standardabweichungen von Volumen, Oberfläche und Wurzelkanalkrümmung für die Kanäle jeder Gruppe sind in Tabelle 6 aufgeführt.

**Tabelle 6: Volumen, Oberfläche und Wurzelkanalkrümmung****a: Untergruppe ISO 25 – 35**

	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Oberfläche [mm <sup>2</sup> ]	Krümmung [°]
HFE	1,37 ± 0,57	20,0 ± 4,5	22,9 ± 5,5
REC	1,34 ± 0,44	20,6 ± 3,9	20,5 ± 4,9
TFA	1,15 ± 0,40	18,3 ± 3,1	20,1 ± 5,2
WOG	1,32 ± 0,40	20,3 ± 4,0	20,8 ± 5,0

**b: Untergruppe ISO 40 – 50**

	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Oberfläche [mm <sup>2</sup> ]	Krümmung [°]
HFE	2,56 ± 1,39	26,4 ± 8,2	17,6 ± 3,9
REC	2,85 ± 0,92	28,5 ± 6,5	16,8 ± 2,7
TFA	2,72 ± 0,95	28,6 ± 6,6	16,9 ± 3,8
WOG	3,26 ± 1,01	30,0 ± 7,0	14,8 ± 3,4

Mittelwert ± Standardabweichung

Volumina und Oberflächen wurden auch separat für apikale, mittige und koronale Wurzelkanalabschnitte ausgewertet, wobei sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zeigten.

### 5.3 Volumenänderung

Die Volumenänderung beträgt für die gesamten Kanäle im Mittel  $1,66 \pm 0,56 \text{ mm}^3$  in der Untergruppe ISO 25 – 35 und  $1,25 \pm 0,58 \text{ mm}^3$  in der Untergruppe ISO 40 – 50. Die Unterschiede zwischen den Feilen sind nicht signifikant.

Im apikalen Abschnitt beträgt die relative Volumenänderung im Mittel  $0,23 \pm 0,12 \text{ mm}^3$  bei den kleinen ISO-Größen und  $0,29 \pm 0,16 \text{ mm}^3$  bei den großen ISO-Größen. Hier ist die Volumenänderung bei den kleinen ISO-Größen in der WOG-Gruppe signifikant größer als in der HFE-Gruppe (ANOVA,  $p = 0,018$ ) und in der REC-Gruppe (ANOVA,  $p = 0,000$ ): Sie hat in der WOG-Gruppe einen Mittelwert von  $0,32 \pm 0,12 \text{ mm}^3$ , in der HFE-Gruppe von  $0,18 \pm 0,10 \text{ mm}^3$  und in der REC-Gruppe von  $0,16 \pm 0,10 \text{ mm}^3$ .

In den mittleren und koronalen Wurzelkanalabschnitten liegen die Mittelwerte bei  $0,53 \pm 0,19 \text{ mm}^3$  und  $0,89 \pm 0,31 \text{ mm}^3$  für die Untergruppe ISO 25 – 35 beziehungsweise bei  $0,43 \pm 0,23 \text{ mm}^3$  und  $0,52 \pm 0,27 \text{ mm}^3$  für die Untergruppe ISO 40 – 50, ohne signifikante Unterschiede zwischen den Feilen. (Tabelle 7)

**Tabelle 7: Volumen des abgetragenen Dentins****a: Untergruppe ISO 25 – 35**

	$V_{\text{apikal}} [\text{mm}^3]$	$V_{\text{mittig}} [\text{mm}^3]$	$V_{\text{koronal}} [\text{mm}^3]$	$V_{\text{gesamt}} [\text{mm}^3]$
<i>HFE</i>	$0,18 \pm 0,10^a$	$0,59 \pm 0,23$	$0,91 \pm 0,31$	$1,67 \pm 0,61$
<i>REC</i>	$0,16 \pm 0,10^a$	$0,50 \pm 0,19$	$0,86 \pm 0,26$	$1,52 \pm 0,50$
<i>TFA</i>	$0,25 \pm 0,10^{ab}$	$0,50 \pm 0,21$	$0,90 \pm 0,43$	$1,65 \pm 0,71$
<i>WOG</i>	$0,32 \pm 0,12^b$	$0,57 \pm 0,17$	$0,90 \pm 0,25$	$1,80 \pm 0,46$

**b: Untergruppe ISO 40 – 50**

	$V_{\text{apikal}} [\text{mm}^3]$	$V_{\text{mittig}} [\text{mm}^3]$	$V_{\text{koronal}} [\text{mm}^3]$	$V_{\text{gesamt}} [\text{mm}^3]$
<i>HFE</i>	$0,33 \pm 0,16$	$0,47 \pm 0,27$	$0,65 \pm 0,35$	$1,44 \pm 0,68$
<i>REC</i>	$0,23 \pm 0,14$	$0,38 \pm 0,19$	$0,38 \pm 0,12$	$0,99 \pm 0,37$
<i>TFA</i>	$0,33 \pm 0,16$	$0,43 \pm 0,23$	$0,54 \pm 0,20$	$1,30 \pm 0,54$
<i>WOG</i>	$0,25 \pm 0,20$	$0,39 \pm 0,23$	$0,41 \pm 0,16$	$1,06 \pm 0,50$

Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung

unterschiedliche hochgestellte Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede an ( $p < 0,05$ )

## 5.4 Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche

Die nicht bearbeitete Oberfläche macht bei den kleinen ISO-Größen einen Anteil von  $17,6 \pm 11,8$  % und bei den großen ISO-Größen einen Anteil von  $29,0 \pm 17,6$  % an der gesamten Wurzelkanaloberfläche aus. Der Unterschied zwischen der TFA-Gruppe mit  $10,2 \pm 9,1$  % und der REC-Gruppe mit  $22,9 \pm 11,1$  % in der Untergruppe ISO 25 – 35 ist signifikant (Kruskal Wallis-Test,  $p = 0,012$  nach Bonferroni-Korrektur).

Im apikalen Wurzelkanalabschnitt liegt der Mittelwert des Anteils der nicht bearbeiteten Oberfläche in der Untergruppe ISO 25 – 35 bei  $22,6 \pm 21,0$  % und in der Untergruppe ISO 40 – 50 bei  $25,1 \pm 21,0$  %. Auch hier ist der Unterschied zwischen der TFA-Gruppe mit  $11,1 \pm 13,9$  % und der REC-Gruppe mit  $35,6 \pm 23,4$  % bei den kleinen ISO-Größen signifikant (Kruskal Wallis-Test,  $p = 0,005$  nach Bonferroni-Korrektur).

In den mittigen und koronalen Abschnitten liegen die Mittelwerte bei  $13,7 \pm 12,9$  % und  $16,4 \pm 13,0$  % für die Untergruppe ISO 25 – 35 und bei  $27,3 \pm 22,9$  % und  $30,6 \pm 17,4$  % für die Untergruppe ISO 40 – 50. Die Unterschiede zwischen den Feilen sind nicht signifikant. (Tabelle 8)

**Tabelle 8: Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche****a: Untergruppe ISO 25 – 35**

	$R_{nbO\_apikal} [\%]$	$R_{nbO\_mittig} [\%]$	$R_{nbO\_koronal} [\%]$	$R_{nbO\_gesamt} [\%]$
<i>HFE</i>	33,2 ± 23,1 <sup>ab</sup>	17,3 ± 12,7	15,2 ± 15,8	19,7 ± 15,1 <sup>ab</sup>
<i>REC</i>	35,6 ± 23,4 <sup>a</sup>	17,4 ± 13,6	18,7 ± 12,3	22,9 ± 11,1 <sup>a</sup>
<i>TFA</i>	11,1 ± 13,9 <sup>b</sup>	6,3 ± 6,3	11,1 ± 11,7	10,2 ± 9,1 <sup>b</sup>
<i>WOG</i>	15,8 ± 13,6 <sup>ab</sup>	15,6 ± 14,1	20,0 ± 12,8	18,8 ± 10,4 <sup>ab</sup>

**b: Untergruppe ISO 40 – 50**

	$R_{nbO\_apikal} [\%]$	$R_{nbO\_mittig} [\%]$	$R_{nbO\_koronal} [\%]$	$R_{nbO\_gesamt} [\%]$
<i>HFE</i>	21,6 ± 19,8	25,2 ± 26,2	26,9 ± 21,3	25,9 ± 19,9
<i>REC</i>	26,9 ± 21,1	31,3 ± 19,0	33,3 ± 10,8	32,1 ± 12,1
<i>TFA</i>	20,8 ± 16,1	22,7 ± 20,8	26,6 ± 17,0	24,6 ± 17,0
<i>WOG</i>	34,7 ± 27,2	32,2 ± 23,8	39,0 ± 13,2	36,7 ± 18,1

Mittelwert ± Standardabweichung

unterschiedliche hochgestellte Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede an ( $p < 0,05$ )

## 5.5 Transportation

Die Transportation der Kanäle ist für beide Untergruppen normalverteilt und ohne signifikante Unterschiede zwischen den Feilen. Sie beträgt  $0,070 \pm 0,029$  mm bei den kleinen und  $0,059 \pm 0,020$  mm bei den großen ISO-Größen.

In den einzelnen Kanalabschnitten beträgt die Transportation in der Untergruppe der kleinen ISO-Größen  $0,039 \pm 0,018$  mm (apikal),  $0,066 \pm 0,033$  mm (mittig) und  $0,10 \pm 0,060$  mm (koronal). In der Untergruppe der großen ISO-Größen liegen die Mittelwerte bei  $0,046 \pm 0,020$  mm (apikal),  $0,062 \pm 0,029$  mm (mittig) und  $0,068 \pm 0,031$  mm (koronal). (Tabelle 9)

Die koronale Transportation der HFE-Gruppe ISO 25 – 35 wurde mit dem Kruskal Wallis-Test gegen die anderen Gruppen getestet, nach Bonferroni-Korrektur lag die Irrtumswahrscheinlichkeit jedoch über dem Signifikanzniveau. Somit liegen in allen Kanalabschnitten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Feilen vor.

Tabelle 9: Transportation

## a: Untergruppe ISO 25 - 35

	$T_{\text{apikal}} [\text{mm}]$	$T_{\text{mittig}} [\text{mm}]$	$T_{\text{koronal}} [\text{mm}]$	$T_{\text{gesamt}} [\text{mm}]$
HFE	$0,038 \pm 0,022$	$0,079 \pm 0,042$	$0,065 \pm 0,027$	$0,062 \pm 0,027$
REC	$0,038 \pm 0,017$	$0,069 \pm 0,036$	$0,119 \pm 0,056$	$0,076 \pm 0,028$
TFA	$0,036 \pm 0,016$	$0,048 \pm 0,024$	$0,098 \pm 0,076$	$0,061 \pm 0,035$
WOG	$0,043 \pm 0,020$	$0,073 \pm 0,024$	$0,117 \pm 0,054$	$0,078 \pm 0,024$

## b: Untergruppe ISO 40 - 50

	$T_{\text{apikal}} [\text{mm}]$	$T_{\text{mittig}} [\text{mm}]$	$T_{\text{koronal}} [\text{mm}]$	$T_{\text{gesamt}} [\text{mm}]$
HFE	$0,046 \pm 0,016$	$0,065 \pm 0,033$	$0,066 \pm 0,031$	$0,059 \pm 0,021$
REC	$0,042 \pm 0,035$	$0,062 \pm 0,024$	$0,063 \pm 0,022$	$0,055 \pm 0,022$
TFA	$0,049 \pm 0,016$	$0,067 \pm 0,032$	$0,075 \pm 0,043$	$0,064 \pm 0,020$
WOG	$0,048 \pm 0,015$	$0,048 \pm 0,015$	$0,069 \pm 0,028$	$0,057 \pm 0,019$

Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung

## 5.5.1 Visualisierung der Ergebnisse

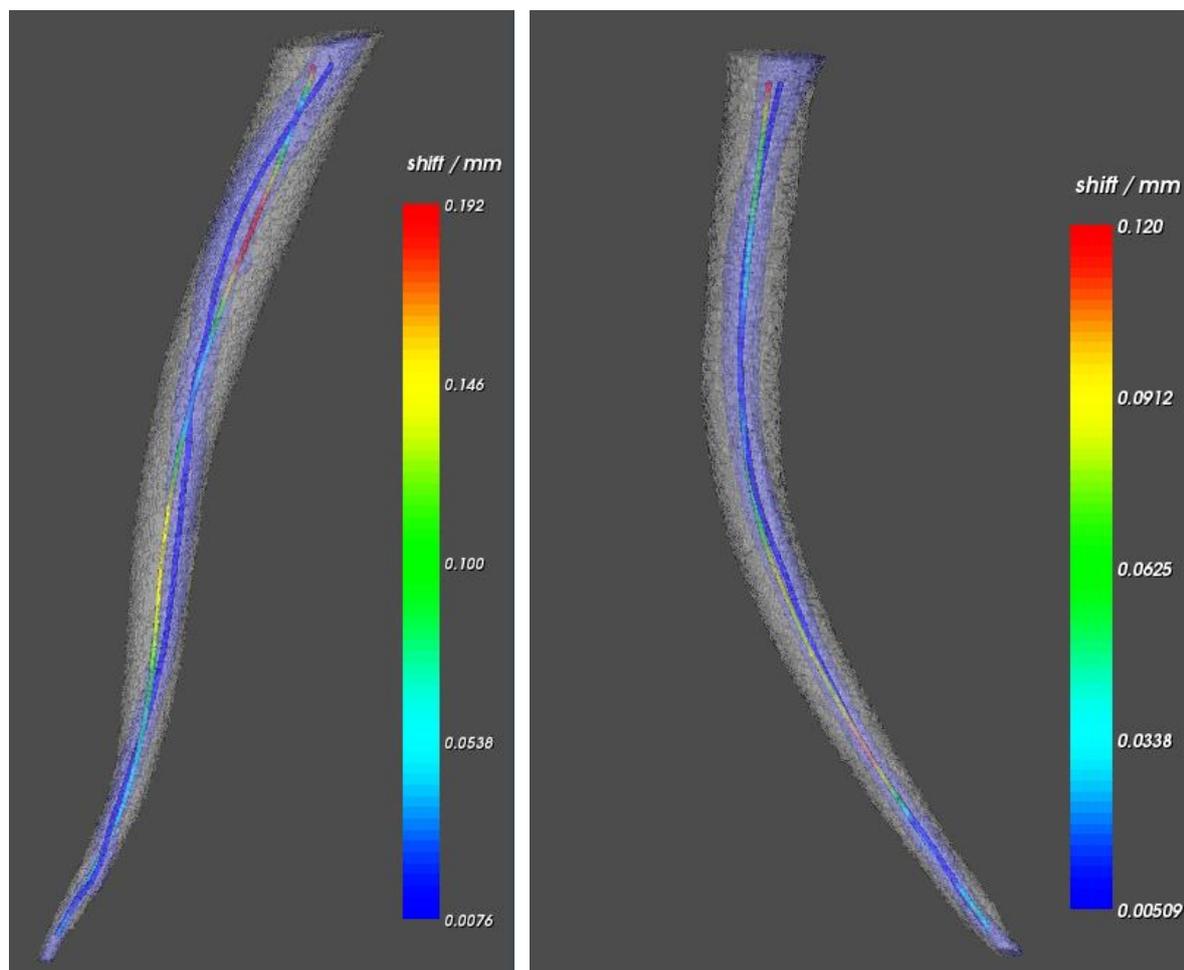


Abbildung 32: Beispiele aus der HFE-Gruppe

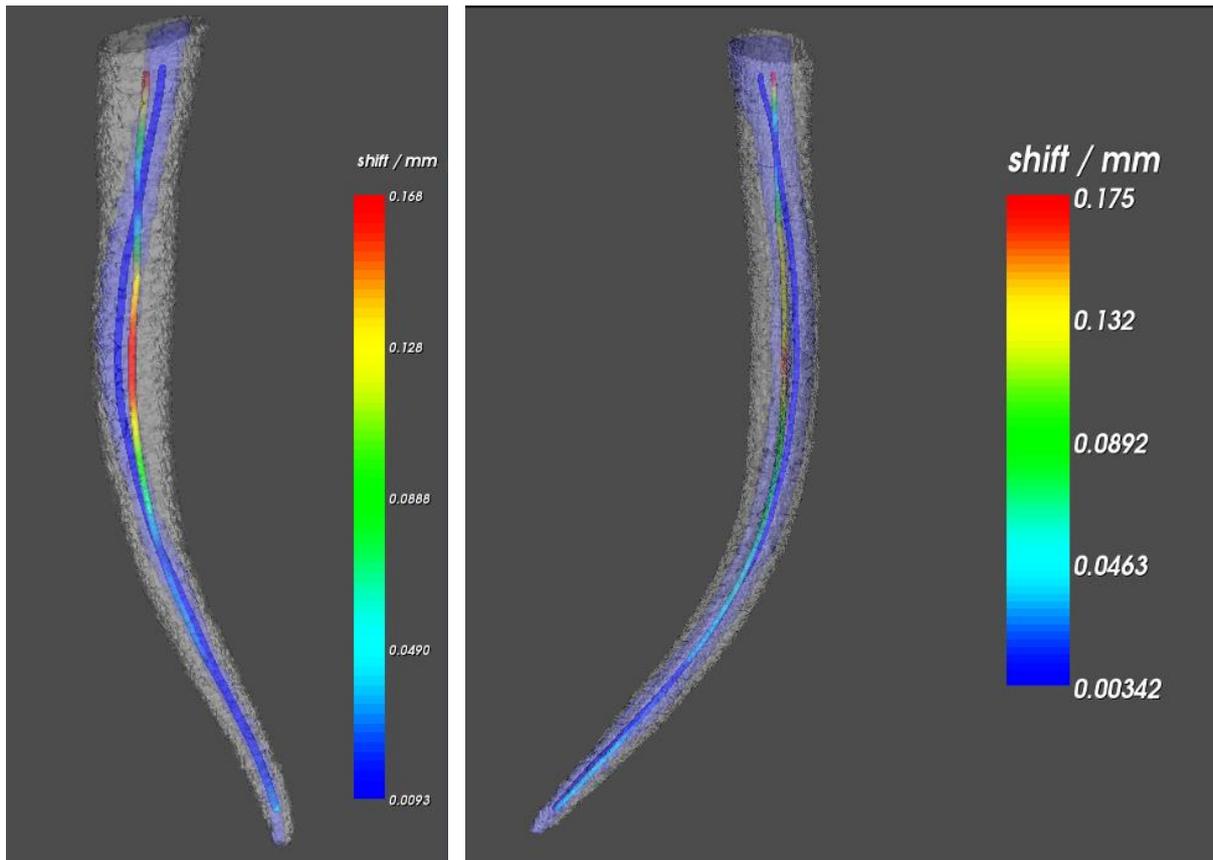


Abbildung 33: Beispiele aus der REC-Gruppe

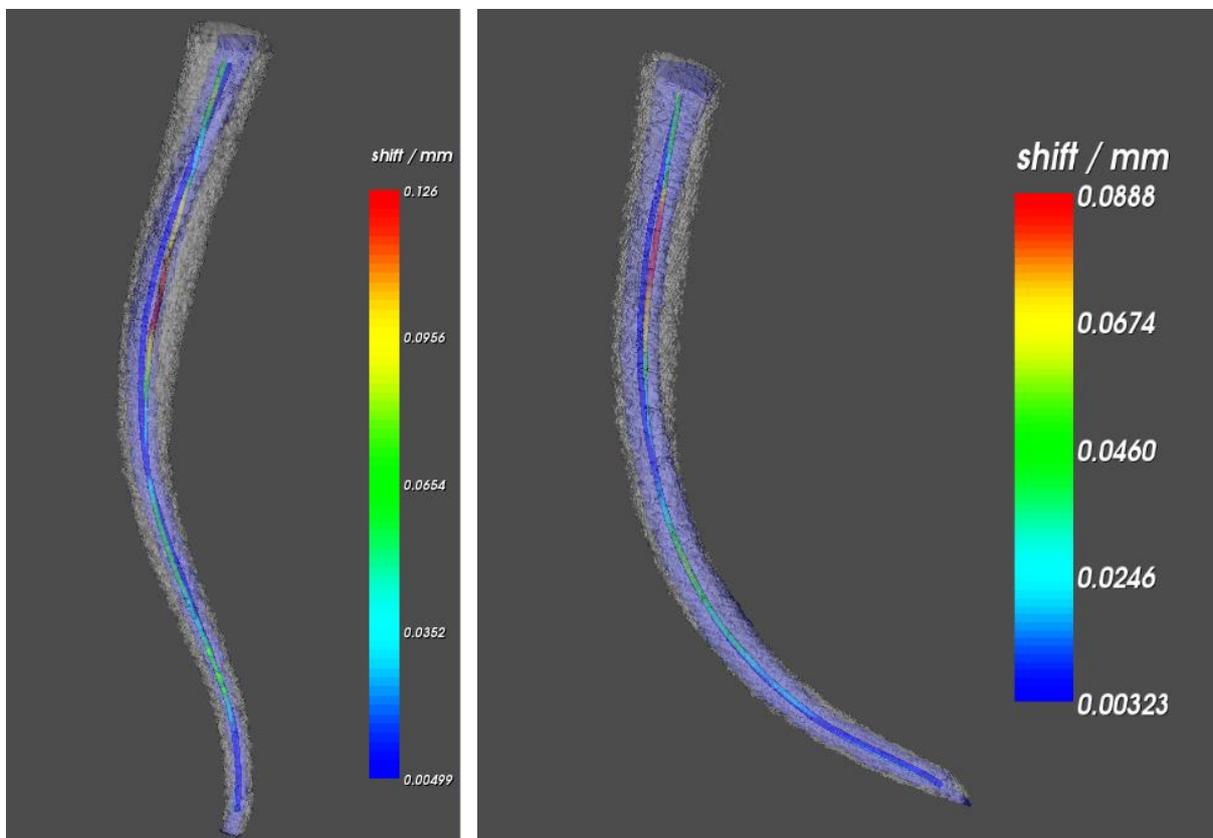
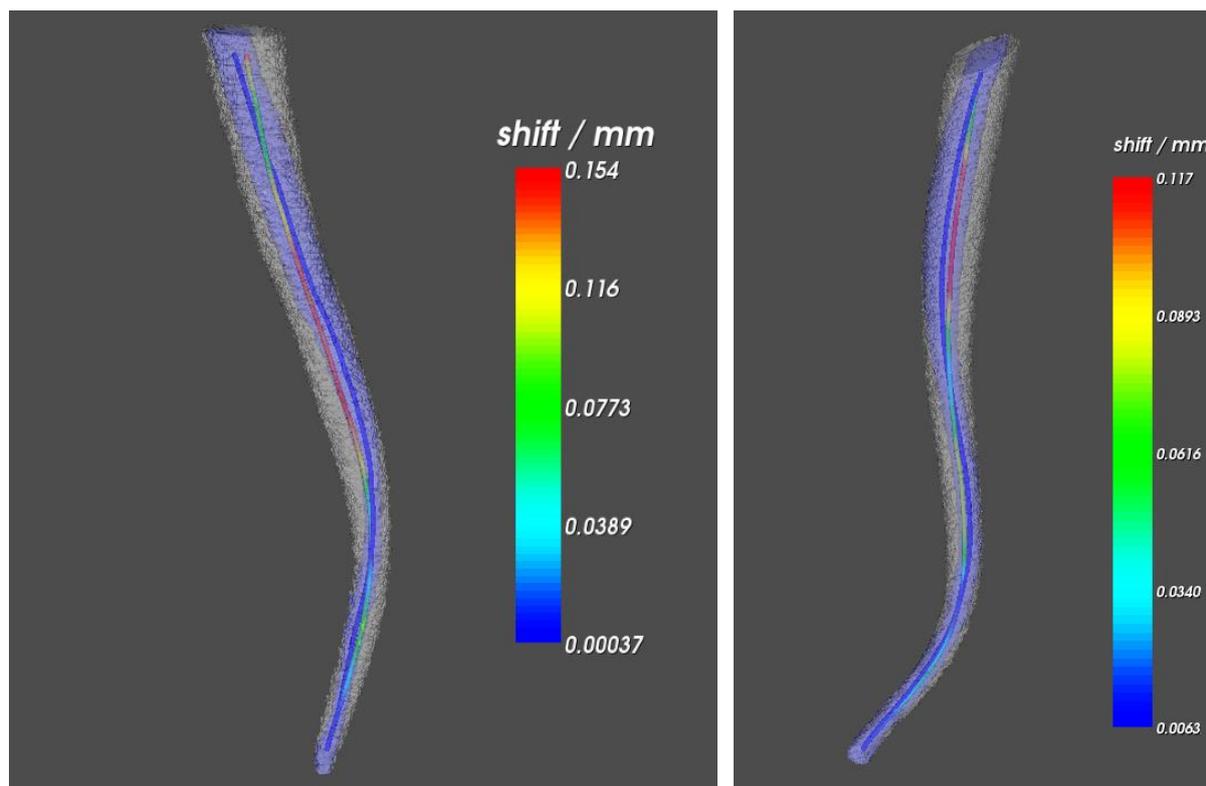


Abbildung 34: Beispiele aus der TFA-Gruppe



**Abbildung 35: Beispiele aus der WOG-Gruppe**

blau: Pre-Kanal (Oberfläche und Mittellinie)

grau: Post-Kanal (Oberfläche)

blau-grün-gelb-rot: Transportation des Post-Kanals (Mittellinie)

## 6 Diskussion

Die Intention der vorliegenden Studie ist die Evaluation der Aufbereitungsqualität der reziproken Wurzelkanalaufbereitungssysteme Reciproc (REC) und WaveOne Gold (WOG), des adaptierend rotierend-reziproken Systems Twisted File Adaptive (TFA) und des rotierenden Systems HyFlex EDM (HFE) anhand von Mikro-CT-Aufnahmen. Die untersuchten Feilensysteme unterscheiden sich neben ihren Rotationsmodi auch in der Feilenanzahl, im Feilendesign und Material.

Insbesondere der reziproke Rotationsmodus und die hohe Elastizität neuer Nickel-Titan-Legierungen sollen die Zentrierung der Feilen im Wurzelkanal verbessern und eine Transportation verhindern, weshalb die Untersuchung der Transportation in dieser Studie besonders interessiert.

### 6.1 Material und Methode

#### 6.1.1 Studiendesign natürliche humane Zähne

*In vitro*-Untersuchungen zur Wurzelkanalaufbereitung werden an natürlichen Wurzelkanälen extrahierter humaner Zähne oder auch an artifiziellen Kanälen in Kunststoffprüfkörpern durchgeführt. Bei letzteren können standardisierte Bedingungen bezüglich der Kanalform und Materialeigenschaften geschaffen werden. (Dummer et al. 1991) Jedoch bestehen Unterschiede in der Mikrohärtigkeit von Dentin und Kunststoff. Zudem kann eine Wärmeentwicklung während der Aufbereitung zur Erweichung des Kunststoffs führen. (Lim et al. 2013) Somit sind Ergebnisse, die bei Aufbereitung artifizieller Kanäle gewonnen werden, nicht in vollem Umfang auf die klinische Situation übertragbar. (Thompson und Dummer 1997)

Bei Verwendung natürlicher Wurzelkanäle kann nicht ausgeschlossen werden, dass Variationen der Wurzelkanalanatomie und Inhomogenitäten der Dentinbeschaffenheit das Ergebnis der Aufbereitung beeinflussen. (Tepel et al. 1993; Tepel 2000) Dennoch erscheinen sie vielen Autoren am geeignetsten, insbesondere zur Beurteilung der Kanalreinigung. (Hülsmann et al. 2003; Grande et al. 2015b)

Häufig werden Molaren des Unterkiefers genutzt, deren mesiobukkale und mesiolinguale Kanäle in der Regel akzentuierte Krümmungen und enge Dimensionen

aufweisen. Dieser hohe Schwierigkeitsgrad gilt als prädestiniert, um die Wahrscheinlichkeit von Aufbereitungsfehlern und Unterschiede zwischen den Feilensystemen zu untersuchen. (Berutti und Fedon 1992; Tepel et al. 1997; Stern et al. 2012)

Auch Molaren des Oberkiefers, die ebenfalls gekrümmte Kanäle aufweisen, werden für Studien herangezogen, wobei häufig flache mesiobukkale und runde distobukkale Kanäle sowie palatinale Kanäle mit größerem Volumen vorgefunden werden. Sie können somit als Studiendesign, das der Variabilität der klinischen Situation nahe kommt, gesehen werden. (Ahmetoglu et al. 2015)

Wie bei Grande et al. wurden in der vorliegenden Studie alle vorhandenen Kanäle von Ober- und Unterkiefermolaren aufbereitet, wodurch ein repräsentativer Querschnitt an Wurzelkanalanatomien vorlag. Mit jeweils 8 Oberkiefer- und 8 Unterkiefermolaren umfassten die Versuchsgruppen insgesamt 16 Zähne und waren ähnlich groß wie bei Grande et al. mit 20 Zähnen. (Grande et al. 2015b)

Unter Beachtung von Größen wie Wurzelkanallänge, Wurzelkanalkrümmungswinkel und -radius wird in der Regel die Zuteilung der Wurzelkanäle in homogene Untersuchungsgruppen angestrebt.

Auch in dieser Studie wurden die Wurzelkanalkrümmungen anhand von Röntgenbildern nach der Methode von Weine (Weine 1982) bestimmt sowie die Arbeitslängen berücksichtigt, um die Zähne gleichmäßig verteilen zu können. Dieses Vorgehen beinhaltet jedoch drei Einschränkungen: erstens kann ein Wurzelkanal in der zweidimensionalen Darstellung des Röntgenbildes verzerrt dargestellt und seine Krümmung unter- oder überschätzt werden; zweitens setzt sich die Arbeitslänge aus der Wurzelkanallänge (apikale Konstriktion bis Orifizium) und der Tiefe der Trepanationsöffnung (Orifizium bis Höckerspitze) zusammen, weshalb wegen der variablen Lage der Orifizien Fehleinschätzungen der Wurzelkanallänge auftreten können. Außerdem wurden Zähne ausgewählt, deren Kanäle klinisch und röntgenologisch eine apikale Konfluation, in der Mikro-CT-Aufnahme jedoch eine großflächige Verbindung über einen Isthmus zeigten und deshalb nicht ausgewertet werden konnten.

Um die größtmögliche Anzahl von Kanälen auswerten zu können, sollten Wurzelkanallänge, Krümmung und insbesondere Konfluationen vor Gruppenzuteilung anhand von Mikro-CT-Aufnahmen bestimmt werden.

Mit 24 ausgewerteten Kanälen pro Feile liegt diese Studie im oberen Bereich des üblichen Probenumfangs vergleichbarer Studien mit 12 – 24 Kanälen. (Siqueira et al. 2013; Baek et al. 2014; Marceliano-Alves et al. 2014)

Die Zähne wurden stets feucht gehalten, da das Austrocknen des Dentins dessen mechanische Eigenschaften verändern würde. (Goodis et al. 1991; Kansal et al. 2014)

### 6.1.2 Aufbereitung der Zähne

Nach Trepanation der Zähne und Sondierung der Kanäle wurden die Längenbestimmung unter optischer Vergrößerung und die Präparation eines Gleitpfades der ISO-Größe 15 mit Handfeilen, analog zu anderen Studien, durchgeführt. (Capar et al. 2014; Marceliano-Alves et al. 2014; Sant'Anna et al. 2014) Zwar soll mit den REC- und WOG-Feilen in den meisten Fällen die Wurzelkanalaufbereitung ohne vorherige Gleitfadpräparation möglich sein, doch sollten hierdurch Unterschiede der Weite und Gängigkeit der Kanäle reduziert werden. (Berutti et al. 2012)

Die Einbettmasse auf Methylmethacrylat-Basis fixiert die Zähne starr in den Probenhaltern. Eine Beeinträchtigung der Aufbereitung durch Bewegungen der Proben kann somit vermieden werden. Da die starre Fixierung jedoch nicht der desmodontalen Aufhängung (Syndesmose) der Zähne im Alveolarknochen entspricht (Natali et al. 2004; Boldt et al. 2012), sind Folgen der Krafteinwirkung auf die Zähne, wie die Entstehung von Dentinrissen, in diesem Versuchsdesign nur eingeschränkt auf die klinische Situation übertragbar. Auch über eine Debrisextrusion kann keine Aussage gemacht werden. Für beide Fragestellungen wurden jeweils geeignetere Versuchsdesigns beschrieben. (Bürklein et al. 2013b; De-Deus et al. 2015; Karataş et al. 2015) (Bürklein und Schäfer 2012; Arslan et al. 2016; Topçuoğlu et al. 2016)

Die Zähne wurden nicht sofort in die flüssige Einbettmasse gesetzt, sondern gewartet, bis diese eine zähe Konsistenz hatte. Dadurch konnte vermieden werden, dass die Einbettmasse in die apikalen Foramina hineinläuft, außerdem war die senkrechte Ausrichtung der Zähne im Halter besser kontrollierbar.

Die Aufbereitung der Zähne wurde an einer Behandlungseinheit mit Phantomkopf durchgeführt, wodurch Position und Arbeitshaltung des Behandlers der klinischen Situation entsprachen. (Saber et al. 2017)

Alle Zähne wurden von einem Spezialisten für Endodontie, der Routine in der Wurzelkanalaufbereitung mit verschiedenen Feilensystemen hat, aufbereitet. Somit konnte die gleichbleibende Qualität der Aufbereitung seitens des Behandlers

gewährleistet werden, da nach der Einarbeitung in jedes System an Übungszähnen mit keiner Veränderung der Aufbereitungsmanier im Laufe der Versuche gerechnet werden musste.

Bei Verwendung jedes Feilensystems wurden die Hinweise des Herstellers umgesetzt. Für die Systeme REC, TFA und HFE wurden jeweils der zugehörige Motor und das Winkelstück des Herstellers in der passenden Einstellung genutzt. Die WOG-Feilen wurden im VDW.Gold-Motor betrieben, wobei der für diese Feilen programmierte Modus gewählt wurde.

Alle Feilensysteme beinhalten eine Feile der ISO-Größe 25, die für enge Kanäle genutzt wurde. Da auch in Kanälen mittlerer Weite, den Herstellerangaben und dem klinischen Behandlungsziel entsprechend, ein ausreichender Substanzabtrag angestrebt wurde, konnte bei diesen keine für alle Gruppen einheitliche Aufbereitungsgröße festgelegt werden. Deshalb wurde die Feilengröße in solchen Kanälen individuell bestimmt, indem das abgetragene, im Spanraum der Feilen liegende Dentin beurteilt wurde. (Grande et al. 2015b) Auch bei weiten Kanälen war die Aufbereitungsgröße nicht einheitlich, da die Large-Feile des WOG-Systems mit der ISO-Größe 45 von den großen Feilen der anderen Systeme mit der ISO-Größe 50 abweicht. (Tabelle 10)

**Tabelle 10: ISO-Größen und Taper**

	ISO 25	ISO 30	ISO 35	ISO 40	ISO 45	ISO 50
<i>HFE</i>	OneFile 0.08~			Finishing 0.04~		Finishing 0.03~
<i>REC</i>	R25 0.08~			R40 0.06~		R50 0.05~
<i>TFA</i>	ML1 0.06		ML2 0.06			ML3 0.04
<i>WOG</i>	Primary 0.07~		Medium 0.06~		Large 0.05~	

In der Auswertung wurden die beiden Untergruppen mit den Aufbereitungsgrößen ISO 25 – 35 und ISO 40 – 50 gebildet. Auch Bürklein et al. verglichen die Aufbereitungsqualität unterschiedlicher Größen, da dies der klinischen Situation entspricht, in der der Behandler zwischen Systemen mit verschiedenen Feilengrößen wählen muss. Zudem konstatierten sie, dass der geringe Größenunterschied zwischen REC und WaveOne der ISO-Größe 25 und den rotierenden Vergleichsgruppen der ISO-Größe 30 für die Aufbereitungsergebnisse nicht entscheidend waren. (Bürklein et al. 2012)

Mit einem Feilen-Set wurde jeweils ein Zahn aufbereitet, also höchstens vier Kanäle. Zwei ML1- und eine ML2-Feile des TFA-Systems wurden früher ersetzt, da die Verdrillungen der Schneiden sichtbar aufgebogen waren.

Es ereignete sich eine Feilenfraktur in der HFE-Gruppe: Eine OneFile brach in einem mesiolingualen Kanal eines Unterkiefermolars. Der Zahn wurde ersetzt und nicht in die Auswertung einbezogen, da der Krümmungswinkel des Kanals im Röntgenbild unterschätzt worden war und in der Mikro-CT-Aufnahme über 45° betrug.

Seit Durchführung der Versuche hat die Firma Coltène die Anwenderhinweise für die Präparation stark gekrümmter Kanäle modifiziert und eine weitere Feile des HyFlex CM-Systems empfohlen: Nach Verwendung der Glidepath File (ISO 10) soll zunächst eine CM-Feile (ISO 20) und anschließend die OneFile (ISO 25) verwendet werden. Danach soll der Kanal erst mit einer CM-Feile (ISO 30) erweitert werden, bevor die abschließende Präparation mit den Finishing Files erfolgen kann.

Durch Verwendung der beiden CM-Feilen in Zwischengrößen soll die Gefahr einer Feilenfraktur verringert werden.

Da die Wurzelkanäle bei den Ein-Feilen-Systemen REC und WOG nach jeweils drei sogenannten Pecking-Bewegungen und bei den Mehr-Feilen-Systemen TFA und HFE nach jedem Feilenwechsel gespült wurden, entsprachen sich Zeit und Menge der verwendeten Spüllösungen bei den verschiedenen Systemen. Zudem wurde die abschließende Spülung jedes Kanals nach einem einheitlichen Spülprotokoll vorgenommen.

### **6.1.3 Mikrocomputertomografie und Auswertung**

Die Mikrocomputertomografie wird dem Anspruch an eine reproduzierbare, nicht-destruktive, detaillierte dreidimensionale Bildgebung des Wurzelkanalsystems gerecht und hat sich in den vergangenen Jahren bei der Beurteilung der Wurzelkanalaufbereitungsqualität etabliert. (Rhodes et al. 1999; Peters et al. 2000; Bergmans et al. 2001; Grande et al. 2012)

Abhängig von der Fragestellung wurden unterschiedliche Bildverarbeitungsmethoden von Mikro-CT-Daten beschrieben.

Da es bei der Positionierung der Zähne im Mikro-CT vor und nach Aufbereitung in der Regel zu Abweichungen kommt, ist vor der vergleichenden Auswertung beider Aufnahmen eine Registrierung durchzuführen. (Hill et al. 2001; Neves et al. 2015) Im Zuge einer starren Registrierung werden zwei isotrope Bilder exakt aufeinander gelegt, indem

unveränderte Bildkomponenten, beispielsweise die Außenwände der Zähne, als Maske genutzt werden. In der vorliegenden Studie diente das Pre-Bild des Zahnes als *rigid body*, das Post-Bild wurde als *moving mask* nach ersterem ausgerichtet. Dabei kann die *moving mask* in 6 Freiheitsgraden bewegt werden, nämlich durch Translationen in x-, y-, z-Richtung und Rotationen an x-, y-, z-Achsen.

Die Genauigkeit der starren Registrierung wird mit 1-2 Voxel angegeben und ist limitiert, da die Bildpunkte der *moving mask* mit denen des *rigid body* in Deckung gebracht werden müssen. (Hill et al. 2001; De-Deus et al. 2014)

Das freie Bildbearbeitungsprogramm Fiji basiert auf ImageJ. Als freies Open-Source-Programm vereint dieses Transparenz, eine erweiterbare Plugin-Struktur sowie langzeitige und weit verbreitete Verwendung und gilt insbesondere in der biologischen und medizinischen Forschung als Mittel der Wahl. (Schindelin et al. 2012; Schneider et al. 2012; Schindelin et al. 2015)

Für die Auswertung dieser Studie wurden sowohl Tools des Kernprogramms als auch Plugins anderer Entwickler verwendet. Die ausschlaggebenden Schritte sind dabei die Segmentierung und die Mittellinienbestimmung.

Die Segmentierung der Strukturen – Dentin, Pulpa und Hintergrund – durch das Plugin *Seeded Region Growing* (Entwickler: Sacha Jarek) erfolgt anhand deren Grauwerte und einer manuell erstellten Maske. Für jede Struktur der Maske, die sogenannten *Seeds* (Samen), berechnet das Plugin den mittleren Grauwert. In jedem Schritt des Algorithmus wird das Voxel mit der geringsten Abweichung zu einer benachbarten Struktur dieser Struktur zugeordnet, wodurch die Strukturen wachsen und immer neue benachbarte Voxel auf ihre Zugehörigkeit geprüft werden. Der Algorithmus wird wiederholt, bis alle Voxel einer der Strukturen zugeordnet sind. (Kunzelmann; Adams und Bischof 1994; Jarek 2009)

Die Oberfläche der Wurzelkanäle beinhaltet somit die äußersten Voxel, deren Grauwerte dem des Kanalinneren näher sind als dem des Dentins. Da die so entstehenden Oberflächen regelmäßig Unebenheiten aufweisen, wurden die segmentierten, binärisierten und zugeschnittenen Wurzelkanäle mit einem dreidimensionalen Medianfilter (Entwickler: Benjamin Schmid) geglättet. Das Medianfilter ersetzt jedes Bildelement durch den Median der Pixelwerte der Filterregion. Im Falle der Binärbilder mit den Werten 0 (Hintergrund/Dentin) oder 1 (Wurzelkanal) erhält das Bildelement folglich den Wert, den die Mehrzahl der Pixel der

Filterregion hat. Dadurch werden Ecken abgerundet und Unebenheiten bereinigt, glatte Außenflächen bleiben unverändert. Das Medianfilter stellt daher ein geeignetes Tool dar, um Störungen ohne größere Veränderung der wichtigen Strukturen zu entfernen. (Abbildung 36) (Burger und Burge 2006; Schmid 2014)



a: Ausgangsbild



b: Ergebnisbild

**Abbildung 36: Anwendung des 3D Medianfilters** (horizontale Schicht eines Wurzelkanals)

Die genaue Methode, die Zahnstrukturen zu segmentieren, wird in den meisten Studien nicht beschrieben. Wenn automatisierte Bildverarbeitungsprogramme zum Einsatz kommen, lässt dies auf eine Segmentierung mittels automatischer Schwellwerte schließen. (Stern et al. 2012) Wurzelkanalbereiche, die Dentikel oder Debris enthalten, werden dabei dem Dentin zugeordnet. (Neves et al. 2015)

Die manuelle Berechnung einer Maske für das *Seeded Region Growing* bedeutet einen höheren Zeitaufwand, ermöglicht aber die sichere Zuordnung solcher kritischer Bereiche zur gewünschten Struktur.

Das Plugin *Skeletonize (2D/3D)* (Entwickler: Ignacio Arganda-Carreras) führt eine iterative Erosion aus, mit der Strukturen auf eine Dicke von einem Voxel reduziert werden. (Burger und Burge 2006; Arganda-Carreras 2008) Bei einem schmalen Zylinder verbleiben nach der Skelettierung diejenigen Voxel, die dessen Mittellinie beschreiben. Analog dazu wurden die Mittellinien der Wurzelkanäle mithilfe der Skelettierung bestimmt.

In Vorversuchen wurden bei der Skelettierung zwei nachteilige Effekte festgestellt: Erstens kam es zu einem Informationsverlust, da die Oberflächen-Voxel nicht nur an der Kanaloberfläche, sondern auch an den apikalen und zervikalen Schnittflächen der Kanäle entfernt wurden. Insbesondere bei Kanälen mit großem Durchmesser muss das Programm häufig erodieren, bis nur noch ein Mittelpunkt in horizontaler Ebene verbleibt, und ebenso stark wird die Mittellinie in vertikaler Richtung verkürzt. Zweitens wurden abzweigende Linien gebildet, wenn der Kanal eine längsovale Form oder Isthmen hatte.

Beide Effekte wurden durch Vor- beziehungsweise Nachbearbeitung abgestellt: Die Vervielfachung der ersten und letzten Schicht vor Skelettierung wirkt der Verkürzung der Mittellinie entgegen; abzweigenden Äste wurden entfernt und die Kontinuität der Mittellinie mithilfe des Plugins *Analyze Skeleton* (Entwickler: Ignacio Arganda-Carreras) geprüft. (Arganda-Carreras 2017)

In anderen Studien wurde die Mittellinie des Wurzelkanals als Summe der Massenschwerpunkte aller horizontalen Schichten definiert. (Marceliano-Alves et al. 2014; Zhao et al. 2014; Grande et al. 2015b) Im Falle runder Wurzelkanalquerschnitte ist für beide Verfahren dasselbe Ergebnis zu erwarten. Hat ein Wurzelkanal einen Isthmus, so verschieben sich die Massenschwerpunkte in dessen Richtung. Als Ergebnis der Skelettierung wird man in diesem Fall eine Hauptlinie in dem voluminösen Anteil des Wurzelkanals und zusätzliche abzweigende Linien in den Isthmus erhalten. (Abbildung 37)



a: Massenschwerpunkt

b: Skeleton-Punkte der Mittellinie (grüner Pfeil) und der abzweigenden Linie (rote Pfeile)

**Abbildung 37: Bestimmung der Mittellinie** (horizontale Schicht eines Kanals mit Isthmus)

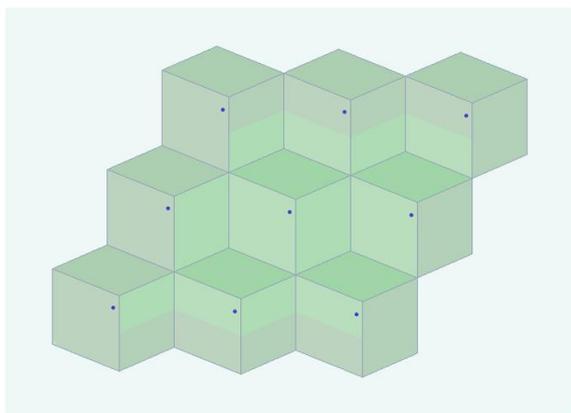
Als Vorteil der Bestimmung der Mittellinie anhand der Massenschwerpunkte ist deren eindeutiges Ergebnis zu sehen. Die Bestimmung der Mittellinie als Hauptlinie des Skeletts bringt demgegenüber den Nachteil eines erhöhten Aufwandes durch die Kontrolle und gegebenenfalls Entfernung abzweigender Linien mit sich. Mithilfe der Skelettierung soll die Mittellinie dort bestimmt werden, wo der Kanal seinen größten Durchmesser hat. Ob dieser theoretische Vorteil eine Überlegenheit gegenüber der anderen Auswertungsmethode bringt, ist noch zu eruieren.

Anhand der Koordinaten der Mittellinien-Punkte wurde die Länge des Wurzelkanals berechnet, um den Kanal in drei 3 mm lange Abschnitte, beginnend am Apex, zu teilen. Trotz der Auswahl der Zähne anhand ihrer Arbeitslänge wurden Kanäle ausgewertet, deren Länge unter 9 mm liegt. Für diese Kanäle wurden der apikale und der mittlere

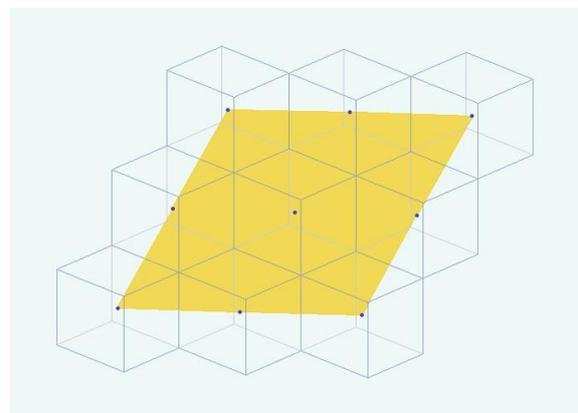
Abschnitt regulär bestimmt, lediglich ihr koronaler Abschnitt ist weniger als 3 mm lang, bei den beiden kürzesten Kanälen 2,1 mm.

Die Wurzelkanalkrümmungswinkel wurden anhand der Mittellinien-Punkte mit dem Python-Programm *centreLineBendingAngle* (Rösch) berechnet. Die Berechnung erfolgt für jeden Punkt mithilfe zweier 3 mm langer Mittelliniensegmente im dreidimensionalen Raum und weicht somit von den in der Zahnmedizin üblichen Methoden zur Bestimmung der Kanalkrümmung anhand von Röntgenbildern ab. Die berechneten Winkel sind deshalb geeignet, die Kanalkrümmungen innerhalb dieser Studie mit hoher Genauigkeit zu vergleichen, lassen jedoch keinen direkten Vergleich mit Angaben in der Literatur zu.

Die Volumina und Oberflächen wurden für jeden Wurzelkanal insgesamt und für die drei Abschnitte separat mit dem *3D Objects Counter* (Entwickler: Fabrice Cordelieres, Daniel James White) in Fiji bestimmt. Die Ergebnisse werden vom *3D Objects Counter* sowohl als Anzahl der Voxel und Oberflächen-Voxel als auch in Kubikmillimeter beziehungsweise in Quadratmillimeter angegeben. Dabei erfolgt die Berechnung der physikalischen Größen, indem die Voxel wie Würfel behandelt werden: Das Volumen in  $\text{mm}^3$  wird als Summe der Würfelvolumina, die Oberfläche in  $\text{mm}^2$  als die Summe der Flächen der außenliegenden Würfelseiten berechnet. Da Voxel streng genommen keine Würfel, sondern Bildpunkte in einem Gitter sind, ist diese übliche Berechnungsmethode vereinfachend. Insbesondere die so bemessene Oberfläche wird wegen deren Rauigkeit überschätzt. Eine genauere Berechnung könnte durch Interpolation zwischen den Bildpunkten erfolgen. (Abbildung 38) (Cordelieres et al. 2017)



a: Voxel als Würfel



b: Voxel als Punkte, Fläche interpoliert

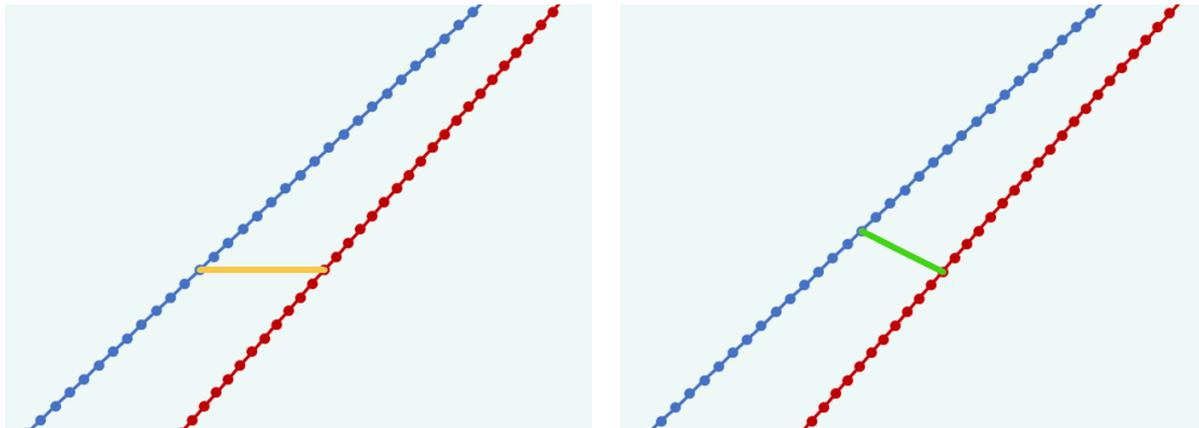
**Abbildung 38: Berechnung der Oberfläche** (Schema)

Der Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche wurde als Verhältnis der Anzahl der unbearbeiteten Oberflächen-Voxel zur Anzahl aller Oberflächen-Voxel vor Aufbereitung bestimmt. Ein Oberflächen-Voxel des Wurzelkanals vor Aufbereitung gilt dann als unbearbeitet, wenn es in der Oberfläche des Kanals nach Aufbereitung enthalten ist oder innerhalb der Oberfläche nach Aufbereitung liegt. Letzteres kann vorkommen, da die starre Registrierung und die Glättung der Wurzelkanäle mit dem Medianfilter zu Ungenauigkeiten in einer Größenordnung von bis zu 3 Voxel führen und den Kanal nach Aufbereitung in seltenen Fällen kleiner als vor Aufbereitung erscheinen lassen können. Eine andere mögliche Ursache besteht darin, dass Debris an der Wurzelkanalwand bei Segmentierung nicht vom Dentin unterschieden werden konnte. Umgekehrt kann die Ungenauigkeit auch zugunsten der aufbereiteten Oberfläche ausfallen, wenn ein in Wirklichkeit unbearbeiteter Oberflächenbereich außerhalb des Kanals vor Aufbereitung dargestellt wird.

Die Auswertung der nicht bearbeiteten Oberfläche erfolgte analog zu anderen Studien, die mit Bildauflösungen von 11 µm bis 28 µm arbeiteten. Mit der Auflösung von 20 µm liegt die vorliegende Studie in demselben Bereich, Unterschiede bestehen lediglich in den oben genannten Verfahren zur Segmentierung. (Stern et al. 2012; Busquim et al. 2014; Zhao et al. 2014; Amoroso-Silva et al. 2016)

Die Transportation wurde für jeden Kanalabschnitt als Mittelwert der Distanzen zwischen den Mittellinien-Punkten des aufbereiteten Kanals zur Mittellinie vor Aufbereitung berechnet. Diese Distanzen wurden vom Programm *CentreLineShift* (Rösch) für jeden Punkt einzeln bestimmt, der innerhalb des Dreiecksfilters lag. Da an den beiden Enden ein 0,3 mm langer Abschnitt vom Filter entfernt wurde, enthalten der apikale und der koronale Abschnitt jeweils ungefähr 10% weniger Messpunkte als der mittlere Abschnitt.

Im Unterschied zu anderen Studien, die die Distanzen zwischen den Mittellinienpunkten in jeder horizontalen Schicht bestimmen, wird dies in *CentreLineShift* unabhängig von der Lage des Wurzelkanals im dreidimensionalen Raum vorgenommen. Das Ergebnis wird somit nicht von der unzureichenden senkrechten Ausrichtung aller Kanalabschnitte bei Kanalkrümmung beeinflusst. (Abbildung 39)



a: orange: Distanz eines Punktes der roten Mittellinie zur blauen Mittellinie in der horizontalen Ebene

b: grün: kürzeste Distanz desselben roten Punktes zur blauen Mittellinie

**Abbildung 39: Bestimmung der Transportation als Distanz zwischen den Mittellinien vor und nach Aufbereitung** (Schema, vertikale Ebene)

## 6.2 Ergebnisse

### 6.2.1 Volumen, Oberfläche und Wurzelkanalkrümmung vor Aufbereitung

Die vier Untersuchungsgruppen mit jeweils 24 Wurzelkanälen sind bezüglich der Variablen Volumen, Oberfläche und Krümmung vor Aufbereitung normalverteilt und ohne signifikante Unterschiede. Sie sind deshalb geeignet, die verschiedenen Aufbereitungssysteme zu vergleichen.

Um Untersuchungsgruppen zu erhalten, deren Wurzelkanäle in Bezug auf die genannten Variablen genau übereinstimmen, müssten alle Kanäle erst anhand der Mikro-CT-Aufnahmen vor Aufbereitung ausgewertet und anschließend auf die Gruppen verteilt werden.

Da die Größenunterschiede der Kanäle verschiedene Aufbereitungsgrößen erfordern, wurden die beiden Untergruppen mit den Aufbereitungsgrößen ISO 25 – 35 und ISO 40 – 50 gebildet.

### 6.2.2 Volumenänderung

Als Ziel des Dentinabtrags kann kein allgemein gültiger Wert für dessen Volumen gelten. Vielmehr soll das Volumen des abgetragenen Dentins ausreichend sein, um die Elimination infizierten Gewebes und Dentins, die Spülung des gesamten

Kanalsystems und dessen dichten Verschluss mit einer Füllung zu ermöglichen. Andererseits darf der Abtrag nicht übermäßig sein, um Aufbereitungsfehlern und einer Schwächung der Dentinwände vorzubeugen. (Peters und Peters 2006)

Für die Auswahl der apikalen Aufbereitungsgröße werden verschiedene Überlegungen angestellt:

Erstens kann eine effiziente Spülung nur erfolgen, wenn die Spülkanüle ausreichend tief in den Kanal eingebracht werden kann, da die Spüllösungen nur 1 mm über die Kanülenöffnung hinaus vordringen. (Peters 2004; Boutsoukis et al. 2009; Boutsoukis et al. 2010) Bei den in dieser Studie verwendeten Spülkanülen mit einem Durchmesser von 0,31 mm ist die Aufbereitung mit einer ISO 25, Taper 0,08-Feile geeignet, den Kanal 1 mm vor dem Apex auf einen Durchmesser von 0,33 mm aufzubereiten und theoretisch das kontrollierte Spülen des apikalen Wurzelkanalabschnitts zu ermöglichen. In gekrümmten Kanälen ist jedoch nicht allein die Aufbereitungsgröße, sondern auch die Kanalform ein Faktor, der das Vordringen der Spülkanüle limitiert. Andererseits kann durch das Rekapitulieren des Kanals mit einer Handfeile auf Arbeitslänge die Effizienz der apikalen Spülung verbessert werden, wenn koronal ein angemessener Taper präpariert wurde. (Peters und Peters 2006)

Zweitens hängt die Größe der apikalen Aufbereitung, die für die Obturation des Wurzelkanalsystems nötig ist, von der verwendeten Obturationstechnik ab. Um einen Kanal mit Guttaperchapoints randständig füllen zu können, muss der apikale Querschnitt möglichst dem der Guttaperchapoints entsprechen und die gesamten ursprünglichen Kanalwände einschließen. Mithilfe thermoplastischer Wurzelfüllmethoden können hingegen auch bei kleineren apikalen Dimensionen suffiziente Füllungen erzielt werden. (Peters 2004)

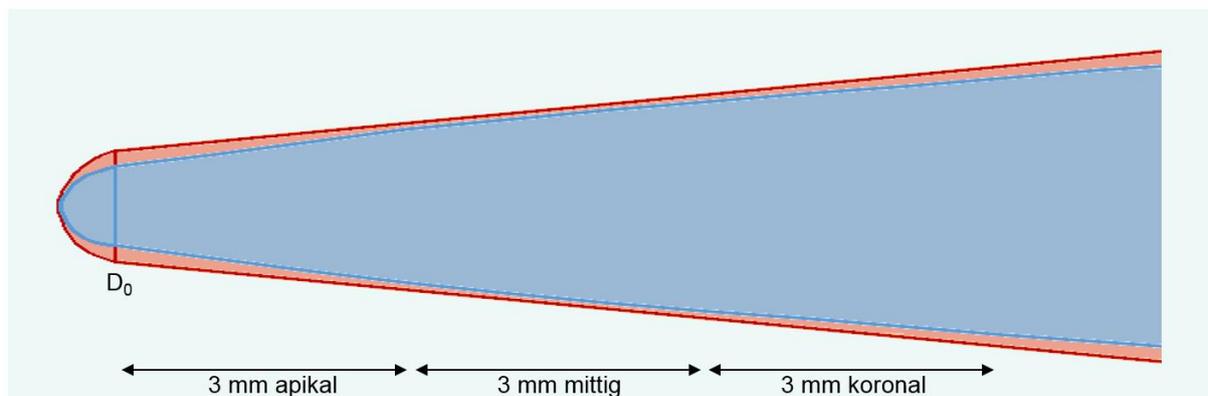
Schließlich wurde das Konzept der optischen Kontrolle (visual gauging) beschrieben, das eine Entscheidungshilfe für die zu wählende Aufbereitungsgröße ist: Während der Präparation wird Menge und Aussehen des Dentins beurteilt, welches sich bei der Aufbereitung in den Schneiden der Feile ansammelt. Wird mit dem apikalen Feilenanteil gesundes Dentin abgetragen, kann die Aufbereitung abgeschlossen werden. (Grande et al. 2015b)

Zusammenfassend sollen also die klinischen und röntgenologischen Befunde, wie vorliegende Pathologie, Wurzelkanalanatomie und Dicke der Kanalwände, und die Ziele der Aufbereitung, abhängig von Spülprotokoll und Obturationsmethode, unter optischer Kontrolle des erfolgten Dentinabtrags die Aufbereitungsgröße bestimmen.

In dieser Studie wurde zur Vereinheitlichung der Aufbereitung der optischen Kontrolle des abgetragenen Dentins in allen Gruppen eine entscheidende Rolle zugetragen. Die Dentinspäne bei der Aufbereitung mit REC schienen größer zu sein als mit den rotierenden Systemen. Diese Beobachtung passt zu denen anderer Studien, die der REC eine hohe Effizienz und verkürzte Aufbereitungszeit im Vergleich zu rotierenden Mehrfeilensystemen bescheinigen. (Bürklein und Schäfer 2012; Bürklein et al. 2014)

Im apikalen Kanalabschnitt wurde in der Untergruppe ISO 25 – 35 mit der WOG signifikant mehr Dentin abgetragen als mit der HFE und der REC. Der entscheidende Faktor für die unterschiedlich große Zunahme des Wurzelkanalvolumens ist hier die Aufbereitungsgröße: Bei der WOG steht ebenso wie bei der TFA eine Feile in der ISO-Größe 35 zur Verfügung, die in diesen beiden Gruppen für die Mehrzahl der Kanäle genutzt wurde.

Dass nur in den apikalen 3 mm des Wurzelkanals ein signifikanter Unterschied gefunden wurde, passt zu den verschiedenen Konizitäten der Feilen: Während die WOG- und TFA-Feilen in ISO 35 einen Taper von 6% haben, nimmt der Durchmesser der REC- und HFE-Feilen in ISO 25 mit einem Taper von 8% in den unteren Millimetern stärker zu, was zu einer Annäherung der Feilendurchmesser in den mittleren Feilenabschnitten führt. (Abbildung 40)



**Abbildung 40: Feilendurchmesser der REC 25/0.08~ (regressiver Taper) (blau) und der TFA 35/0.06 (rot)** (Schema basierend auf Herstellerangaben; horizontal gestaucht)

Vergleicht man das Volumen des abgetragenen Dentins verschiedener Studien, so fallen die deutlichen Unterschiede auf. Diese können im Studiendesign begründet sein, da unterschiedlich lange Wurzelkanäle ausgewertet wurden.

Siqueira et al. geben für die REC R25 ein mittleres abgetragenes Volumen von  $1,0 \text{ mm}^3$  in mesiolingualen und mesiobukkalen Kanälen mit einer Arbeitslänge von 13 mm an. (Siqueira et al. 2013)

Bei Gergi et al. wurden mit der REC  $1,61 \pm 0,95 \text{ mm}^3$  und mit der TFA  $1,07 \pm 0,60 \text{ mm}^3$  in mesiolingualen und mesiobukkalen Kanälen abgetragen. (Gergi et al. 2014)

Grande et al. hatten eine Volumenänderung von  $1,8 \pm 0,9 \text{ mm}^3$  mit der REC in den Kanälen von Oberkiefer- und Unterkiefermolaren, wobei sowohl die R25 als auch die R40 benutzt wurden. (Grande et al. 2015b)

Bei Capar et al. (2013) lag die Volumenänderung in mesiobukkalen und mesiolingualen Kanälen bei  $3,51 \pm 1,73 \text{ mm}^3$  mit der REC und bei  $1,98 \pm 1,27 \text{ mm}^3$  mit der TFA. (Capar et al. 2014)

Die mittleren Volumenänderungen der vorliegenden Studie liegen in einem ähnlichen Bereich wie bei Gergi und Grande, die jedoch keine Angaben zur Länge der Wurzelkanäle machen.

Zur Aufbereitung mit den HFE- und WOG-Feilen liegen bisher keine volumetrischen Auswertungen anderer Autoren vor. Özyürek et al. vergleichen lediglich die Weite artifizierender Kanäle, die mit der WOG, HFE und REC der ISO 25 aufbereitet wurden, anhand von Fotografien. (Özyürek et al. 2017)

### 6.2.3 Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche

Da der Abtrag infizierten Dentins eine erhebliche Reduktion der bakteriellen Besiedelung der Wurzelkanäle bewirkt, gilt ein möglichst niedriger Anteil nicht bearbeiteter Oberfläche als Ziel der mechanischen Aufbereitung. (Metzger et al. 2013; Siqueira et al. 2013) Bei runden engen Kanälen, die ein günstiges Verhältnis von Oberfläche zu Volumen aufweisen, wurde dieses Ziel im Rahmen der vorliegenden Studie mit bis zu 0% unbearbeiteter Oberfläche erreicht.

Bei Kanälen mit ovalem Querschnitt oder Isthmen kann dieses Ziel nur dann ohne das Risiko einer Schwächung oder Perforation der Dentinwände angestrebt werden, wenn die Aufbereitung über die Bearbeitung eines runden Querschnitts hinausgeht. Eine mögliche zusätzliche Methode ist das Circumferential Filing mit Handinstrumenten, die die Isthmen und Nischen mit einer schabenden Bewegung bearbeiten sollen. Ein maschinelles System, das sich der Kanalform anpassen soll, ist die Self Adjusting File. Auch nach deren Anwendung in längsovalen Kanälen wurde jedoch ein Anteil von 23.5 – 33,3 % nicht bearbeiteter Kanalwände beschrieben. (Paqué und Peters 2011; Siqueira et al. 2013)

Dies unterstreicht die Wichtigkeit der chemischen Komponente der Aufbereitung zur Keimreduktion.

Im Rahmen dieser Studie wurden alle Kanäle von Oberkiefer- und Unterkiefermolaren aufbereitet, um einen repräsentativen Querschnitt an Wurzelkanalanatomien zu beschreiben. Nicht enthalten sind jedoch die über Isthmen kommunizierenden Kanäle, die einen deutlich höheren Anteil nicht bearbeiteter Oberflächen haben.

Bei den weiten Kanälen der Untergruppe ISO 40 – 50 ist der Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche höher, was sich folgendermaßen erklären lässt: Zum einen haben die distalen Kanäle der Unterkiefermolaren meist eine ovale Form, zum anderen wurde im Mittel weniger Dentin abgetragen als in der Untergruppe ISO 25 – 35.

Der Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche ist bei der TFA am niedrigsten, wobei der Unterschied im apikalen Drittel in der Untergruppe ISO 25 – 35 mit  $11,1 \pm 13,9\%$  signifikant niedriger als bei der REC mit  $35,6 \pm 23,4\%$  ist. In der TFA-Gruppe, die meist bis zur ISO 35 aufbereitet wurde, wurde mehr Dentin abgetragen als mit der REC der ISO 25 (nicht signifikant), was den Unterschied erklären kann. Auch im Vergleich aller vier Feilen ist ersichtlich, dass bei Aufbereitung bis ISO 35 apikal mehr Dentin abgetragen und ein größerer Anteil der Oberfläche bearbeitet wird.

Hübscher et al. beschreiben eine starke Korrelation zwischen der Wurzelkanalanatomie und dem Anteil der nicht instrumentierten Oberflächen. (Hübscher et al. 2003) Auch in dieser Studie können die Unterschiede in den Wurzelkanalanatomien vor Aufbereitung zu den Ergebnissen beigetragen haben: Volumen und Oberfläche der TFA-Untergruppe ISO 25 – 35 liegen unter denen der anderen Gruppen, und in dieser Untergruppe ist die TFA den anderen Feilen deutlicher überlegen als in der Untergruppe ISO 40 – 50; die WOG hat vor Aufbereitung in der Untergruppe ISO 40 – 50 größere Mittelwerte für Volumen und Oberfläche und nach Aufbereitung den größten Anteil nicht bearbeiteter Oberflächen.

Im apikalen Wurzeldrittel waren bei der REC  $35,6 \pm 23,4\%$  und bei der TFA  $11,1 \pm 13,9\%$  der Oberfläche nicht instrumentiert. Gergi et al. beschreiben einen entgegengesetzten signifikanten Unterschied zwischen dem Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche der REC von  $20,55 \pm 10,27\%$  und der TFA von  $28,77 \pm 18,65\%$ . Das Studienprotokoll von Gergi et al. entspricht weitgehend dem der Untergruppe ISO 25 – 35, unterscheidet sich aber in der einheitlichen Aufbereitungsgröße ISO 25. (Gergi et al.

<sup>2014)</sup> Dies ist bei den untersuchten Kanälen, deren initiale Größe einer ISO 15 entsprechen soll, eine wenig invasive Aufbereitung.

Bei Siqueira et al. bleibt ein Anteil von 20,7 %, bei Grande et al. von  $48 \pm 15,7$  % mit der REC unbearbeitet. (Siqueira et al. 2013; Grande et al. 2015b)

Zum Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche der Feilen HFE und WOG wurden keine anderen Studien gefunden.

#### 6.2.4 Transportation

Ziel der Aufbereitung ist die Beibehaltung des Kanalverlaufs und die Vermeidung einer Transportation, wodurch die beste Inkorporation des Kanals unter Schonung der Dentinwände erreicht wird. Klinische Studien zeigen bessere Erfolgsraten bei besserer Erhaltung der ursprünglichen Kanalform (Pettiette et al. 2001) und schlechtere Erfolgsraten bei Aufbereitungsfehlern als Folge apikaler Transportation (Cheung und Liu 2009).

Ob es während der Aufbereitung zur Transportation des Wurzelkanals kommt, hängt von zahlreichen Faktoren ab. Maßgeblich sind die Wurzelkanalkrümmung und die Elastizität des Aufbereitungsinstruments. (Peters 2004)

Die Elastizität der Nickel-Titan-Feilen kann durch thermische Verfahren, ihre genaue Zusammensetzung sowie den Herstellungsprozess erhöht werden. Ob sich die veränderten Eigenschaften wirklich einer geringeren Transportation niederschlagen, sollte untersucht werden. Pinheiro et al. konnten im Vergleich der Aufbereitungsqualität von rotierenden Feilen aus funkenenerodiertem CM-Wire (HFE), Gold-CM-Wire, CM-Wire und konventionellem Nickel-Titan anhand von Mikro-CT-Aufnahmen keine Unterschiede in der apikalen Transportation feststellen. (Pinheiro, SR et al. 2017)

Die vier untersuchten Feilen weisen unterschiedliche Nickel-Titan-Klassen auf. Auch das Design der Feilen unterscheidet sich, wobei ein kleiner Taper und ein kleiner Kerndurchmesser eine höhere Elastizität zulassen. Andererseits muss die Feile stabil genug sein, um eine ausreichende Resistenz gegenüber Frakturen und Deformationen der Schneidekanten zu gewährleisten.

Seit der Wiederentdeckung der reziproken Bewegung maschineller Systeme durch Yared wurde auch die Rolle des reziproken Rotationsmodus zur Zentrierung der Feilen im Kanal und Vermeidung von Transportation diskutiert. (Yared 2008; Bürklein und Schäfer 2013; Kiefner et al. 2014)

Vergleiche der Aufbereitungsqualität verschiedener Instrumente ergaben jedoch meist ähnliche Ergebnisse für rotierende und reziproke Systeme, (Bürklein et al. 2012; Junaid et al. 2014;

Bürklein et al. 2017) oder stellten sogar eine erhöhte Tendenz zur Transportation bei reziproken Einfeilen-Systemen im Vergleich zu rotierenden Mehrfeilen-Systemen fest. (Gergi et al. 2014; Marceliano-Alves et al. 2014)

Der Rotationsmodus ist auch in der vorliegenden Untersuchung ein Aspekt, da die untersuchten Feilen in verschiedenen Modi betrieben werden. (Tabelle 11)

Da alle genannten Faktoren zusammenwirken, können beobachtete Effekte jedoch nicht einem einzelnen Feilenmerkmal sicher zugeschrieben werden.

**Tabelle 11: Merkmale der untersuchten Feilen**

	<i>Material</i>	<i>Querschnitt</i>	<i>Größen</i>	<i>Rotationsmodus</i>
<i>HFE</i>	CM-Wire funkenerodiert	variable Trapezform, koronal kurze Seite als Radial Land	25/0.08	rotierend
			40/0.04	
			50/0.03	
<i>REC</i>	M-Wire	S-Form	25/0.08	reziprok 150°-30°
			40/0.06	
			50/0.05	
<i>TFA</i>	R-Phase Nickel- Titan	Dreieck mit Radial Lands	25/0.06	adaptierend rotierend oder reziprok, 600°-0° bis 370°-50°
			35/0.06	
			50/0.04	
<i>WOG</i>	Gold-CM-Wire	Parallelogramm	25/0.07	reziprok 170°-50°
			35/0.06	
			45/0.05	

Es kam in allen Gruppen zur Transportation der Wurzelkanäle. Diese fiel jedoch gering aus, so dass keine massive Ausdünnung der Dentinwände beobachtet wurde.

Zwischen den Feilen liegen keine signifikanten Unterschiede vor. In der Untergruppe ISO 25 – 35 haben die beiden reziproken Systeme REC und WOG mit einer Transportation von  $0,076 \pm 0,028$  mm beziehungsweise  $0,078 \pm 0,024$  mm im gesamten Kanal höhere Mittelwerte als die HFE und TFA mit  $0,062 \pm 0,027$  mm beziehungsweise  $0,061 \pm 0,035$  mm.

Während die TFA in der Untergruppe ISO 25 – 35 die geringste Transportation hat, liegt sie in der Untergruppe ISO 40 – 50 mit einem Mittelwert von  $0,064 \pm 0,020$  über denen der anderen Feilen. In dieser Untergruppe wurde die TFA ISO 50 für alle palatinalen und distalen Kanäle verwendet.

Bei den anderen Feilen sind die Aufbereitungsgrößen in der Untergruppe ISO 40 – 50 kleiner, nämlich ISO 45 bei der WOG und ISO 40 in den meisten Kanälen der HFE- und REC-Gruppen, da die ISO 50 nach dem Visual gauging-Konzept in nur einem von acht Kanälen gebraucht wurde. Es ist möglich, dass der Anstieg der Feilengröße der

TFA von ISO 35 auf ISO 50 mit einer Verminderung der Elastizität und einer größeren Neigung zur Transportation einhergeht.

Die etwas geringeren Transportationen der Untergruppe ISO 40 – 50 in den mittleren und koronalen Kanalabschnitten können in den geringeren Kanalkrümmungen der palatinalen und distalen Kanäle und dem geringeren Volumen abgetragenen Dentins begründet sein, die tendenziell höheren Werte im apikalen Abschnitt in der geringeren Elastizität der größeren Instrumente.

Gergi et al. und Capar et al. bestimmten die Transportation der TFA und der REC nach der Methode von Gambill et al. in der horizontalen Ebene von Mikro-CT-beziehungsweise DVT-Aufnahmen. In beiden Studien wurde mit der REC eine höhere Transportation als mit der TFA beschrieben, bei Gergi war der Unterschied signifikant.

(Capar et al. 2014; Gergi et al. 2014)

Gergi et al. geben folgende Transportationen an:

TFA:  $0,02 \pm 0,04$  mm (apikal),  $0,02 \pm 0,06$  mm (mittig) und  $0,02 \pm 0,07$  mm (koronal)

REC:  $0,07 \pm 0,07$  mm (apikal),  $0,06 \pm 0,08$  mm (mittig) und  $0,05 \pm 0,09$  mm (koronal).

Die Mittelwerte von Capar et al. sind höher, was in der niedrigeren Auflösung der DVT-Aufnahmen begründet sein kann: eine Transportation von einem Voxel beläuft sich bei ihnen auf 0,075 mm, bei Gergi et al. sowie in der vorliegenden Studie auf 0,020 mm.

Grande et al. werteten die Transportation ihrer Mikro-CT-Daten dreidimensional aus:

(Grande et al. 2015b)

REC:  $0,02 \pm 0,01$  mm (apikal),  $0,04 \pm 0,02$  mm (mittig) und  $0,04 \pm 0,03$  mm (koronal), ebenso Marceliano-Alves et al.: (Marceliano-Alves et al. 2014)

REC:  $0,16 \pm 0,08$  mm (apikal)  $0,11 \pm 0,06$  mm (mittig) und  $0,07 \pm 0,06$  mm (koronal).

Die von Venino et al. zweidimensional bestimmte Transportation der HFE ergab Mittelwerte von 0,059 mm apikal bis zu 0,129 mm koronal in bucco-lingualer Richtung.

(Venino et al. 2017)

Zur Transportation der WOG liegt derzeit noch keine Studie vor.

Da sich die Methoden zur Bestimmung der Transportation verschiedener Autoren teilweise deutlich unterscheiden, sind Vergleiche zwischen diesen kaum möglich. Hierfür wäre ein einheitliches Studienprotokoll, wie es Bürklein et al. beschrieben haben, nötig. (Bürklein et al. 2012; Bürklein und Schäfer 2013) Da die Aufbereitungsqualität auch vom Behandler abhängt und die Anatomie der natürlichen Zähne keine vollständige

Vereinheitlichung zulässt, sind Unterschiede jedoch selbst bei entsprechender technischer Ausstattung und Durchführung nicht auszuschließen.

Einheitlich schließen die Autoren der genannten Studien, dass mit den untersuchten Feilen eine sichere Aufbereitung der Wurzelkanäle möglich ist. Dies kann auch für die im Rahmen dieser Studie untersuchten Feilen bestätigt werden.

### 6.3 Schlussfolgerungen

Mit den Aufbereitungssystemen HFE, TFA, REC und WOG konnten Wurzelkanäle mit Krümmungen zwischen  $11^\circ$  und  $31^\circ$  suffizient und ohne erhebliche Aufbereitungsfehler präpariert werden.

Die Nullhypothese ist abzulehnen:

In der Untergruppe ISO 25 – 35 ist das Volumen des abgetragenen Dentins im apikalen Wurzelkanalabschnitt in der WOG-Gruppe ( $0,32 \pm 0,12 \text{ mm}^3$ ) signifikant höher als in den HFE- ( $0,18 \pm 0,10 \text{ mm}^3$ ) und REC-Gruppen ( $0,16 \pm 0,10 \text{ mm}^3$ ); der Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche ist in der Untergruppe ISO 25 – 35 in der TFA-Gruppe im gesamten Kanal und im apikalen Abschnitt ( $10,2 \pm 9,1 \%$  bzw.  $11,1 \pm 13,9 \%$ ) signifikant niedriger als in der REC-Gruppe ( $22,9 \pm 11,1 \%$  bzw.  $35,6 \pm 23,4 \%$ ).

Bezüglich der Transportation wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Feilen festgestellt.

Die untersuchten Feilen unterscheiden sich bezüglich ihrer Materialeigenschaften, Feilendesigns und Rotationsmodi. Dennoch zeigen sie ein ähnliches Transportationsmuster. Möglicherweise sind aktuelle Feilensysteme so ausgereift, dass mit dieser Form der Wurzelkanalaufbereitung lediglich geringfügige Verbesserungen über das aktuell mögliche Niveau hinaus erreicht werden können.

Die gefundenen Unterschiede der Volumenänderung sowie der bearbeiteten Oberfläche korrelieren in der Regel mit der ISO-Größe des verwendeten Aufbereitungsinstruments: Die Aufbereitung mit der TFA und der WOG der ISO 35 resultierte in geringeren Anteilen nicht bearbeiteter Oberflächen als die Aufbereitung mit der HFE und der REC der ISO 25.

Dies lässt auf die Bedeutung der individuellen Auswahl einer geeigneten Feilengröße schließen. Auch die Bedeutung der chemischen Komponente der Wurzelkanalaufbereitung wird deutlich, da mit keinem Feilensystem alle Wurzelkanaloberflächen vollständig instrumentiert werden können.

Diesbezüglich scheinen Mehrfeilen-Systeme Vorteile gegenüber Einfeilen-Systemen zu haben: Die Aufbereitung mit mehreren Feilen zunehmender Größe hält den Behandler zur wiederholten Wurzelkanalspülung sowie zur Beurteilung des Substanzabtrags und der am besten geeigneten endgültigen Aufbereitungsgröße an. Die Verwendung eines Einfeilen-Systems kann hingegen zu einer routinemäßigen Aufbereitung verleiten, die zwar einen mechanischen Abtrag unter geringem Zeitaufwand ermöglicht, der Behandlung einer Infektionserkrankung in einem komplexen Wurzelkanalsystem jedoch nicht in jedem Fall gerecht wird.

Bei der Beschreibung von Feilensystemen finden meist Neuerungen der Metallurgie, des Feilendesigns und des Antriebs große Beachtung. Vor dem Hintergrund dieser Studie scheint der Zusammenstellung der Feilensequenz mit verschiedenen ISO-Größen und geeigneten Konizitäten jedoch eine mindestens genauso hohe Bedeutung zuzukommen.

## 7 Zusammenfassung

Die Intention der vorliegenden Studie ist die Evaluation der Aufbereitungsqualität der reziproken Wurzelkanalaufbereitungssysteme Reciproc (REC) und WaveOne Gold (WOG), des adaptierend rotierend-reziproken Systems Twisted File Adaptive (TFA) und des rotierenden Systems HyFlex EDM (HFE) anhand von Mikro-CT-Aufnahmen. Extrahierte Molaren wurden nach Trepanation und Gleitpfadpräparation auf vier Untersuchungsgruppen verteilt, mit Methylmethacrylat-basierter Einbettmasse in Haltern fixiert und im Mikro-CT gescannt.

Zur Aufbereitung standen Feilen der ISO-Größen 25 bis 50 jedes Systems sowie die zugehörigen Motoren zur Verfügung. Die Aufbereitungsgröße wurde, der klinischen Situation entsprechend, anhand der Wurzelkanalanatomie und des beobachteten Dentinabtrags individuell festgelegt.

Die Mikro-CT-Aufnahmen jedes Zahnes vor und nach Aufbereitung wurden segmentiert und die Volumina und Oberflächen der Kanäle bestimmt. Wurzelkanalkrümmung und Transportation wurden dreidimensional und unabhängig von der Ausrichtung der Wurzelkanäle anhand deren Mittellinien bestimmt.

Zur statistischen Auswertung wurden die Feilengruppen zu jeweils 24 Kanälen mit einem Signifikanzniveau von 5% gegeneinander getestet.

Die Volumina, Oberflächen und Krümmungswinkel vor Aufbereitung waren normalverteilt (Shapiro-Wilk-Test) und ohne signifikante Unterschiede zwischen den vier Gruppen (ANOVA). Die Volumenänderung, der Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche und die Transportation wurden für den apikalen, mittigen und koronalen Kanalabschnitt und für die Untergruppen ISO 25 – 35 und ISO 40 – 50 separat ausgewertet.

In der Untergruppe ISO 40 – 50 liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Feilen vor. In der Untergruppe ISO 25 – 35 ist die Volumenänderung im apikalen Wurzelkanalabschnitt in der WOG-Gruppe signifikant höher als in den HFE- und REC-Gruppen (ANOVA); der Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche ist in der Untergruppe ISO 25 – 35 in der TFA-Gruppe im gesamten Kanal und im apikalen Abschnitt signifikant niedriger als in der REC-Gruppe (Kruskall Wallis-Test).

Die gefundenen Unterschiede der Volumenänderung und der Bearbeitung der Oberflächen, einschließlich der nicht signifikanten, korrelieren meist mit der ISO-Größe

des verwendeten Aufbereitungsinstruments: Die Aufbereitung mit der TFA und der WOG der ISO 35 resultierte in höheren Volumina abgetragenen Dentins im apikalen Wurzelkanalabschnitt und in geringeren Anteilen nicht bearbeiteter Oberflächen als die Aufbereitung mit der HFE und der REC der ISO 25. Bezüglich der Transportation wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Feilen festgestellt. Folglich kommt der Auswahl der geeigneten Feilengröße eine entscheidende Bedeutung für die Qualität der Wurzelkanalaufbereitung zu.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufnahme W. C. Röntgens von Albert von Köllikers Hand, 1896 .....	1
Abbildung 2: Pulpitis und Pulpanekrose infolge einer kariösen Läsion .....	4
Abbildung 3: Wurzelkanalaufbereitung und Obturation eines Unterkiefermolars (Rekonstruktion der vertikalen Ebene aus Mikro-CT-Aufnahmen) .....	5
Abbildung 4: mesiale Wurzel des Molars aus Abbildung 3 .....	6
Abbildung 5: Dentinabtrag durch die Wurzelkanalaufbereitung (blau) .....	7
Abbildung 6: Arbeitsweisen maschineller Aufbereitungsinstrumente .....	10
Abbildung 7: ProTaper Universal ( <a href="http://www.dentsplysirona.com">www.dentsplysirona.com</a> ) .....	12
Abbildung 8: Nickel-Titan-Phasen – Austenit und Martensit .....	13
Abbildung 9: Nickel-Titan – thermisches Formgedächtnis. (Stöckel 2000) .....	13
Abbildung 10: Nickel-Titan – mechanisches Formgedächtnis (Stöckel 2000) .....	14
Abbildung 11: Temperaturhysteresediagramme einer konventionellen und einer CM- Wire Nickel-Titan-Legierung (basierend auf Zupanc und Schäfer 2017) .....	15
Abbildung 12: Reciproc R25 .....	19
Abbildung 13: WaveOne Gold Primary .....	20
Abbildung 14: Twisted File Adaptive ML1 .....	22
Abbildung 15: HyFlex EDM OneFile .....	23
Abbildung 16: Röntgenaufnahmen eines Oberkiefermolars .....	30
Abbildung 17: Bestimmung der Arbeitslänge .....	31
Abbildung 18: Kontrolle der Arbeitslängen .....	31
Abbildung 19: Bestimmung des Krümmungswinkels nach Weine .....	32
Abbildung 20: Probenhalter .....	33
Abbildung 21: Frasaco-Modelle im Phantomkopf .....	34
Abbildung 22: Deformation und Entdrillung einer Twisted File Adaptive ML2 .....	36
Abbildung 23: Mikro-CT-Aufnahmen vor und nach Wurzelkanalaufbereitung .....	38
Abbildung 24: Seeded Region Growing .....	39
Abbildung 25: Skelettierung (vereinfachte, zweidimensionale Darstellung) .....	40
Abbildung 26: Skelettierung eines Kanals mit vervielfachter erster und letzter Schicht (vereinfachte, zweidimensionale Darstellung) .....	41
Abbildung 27: Mittellinie als Ergebnis von Skelettierung und Nachbearbeitung (vereinfachte, zweidimensionale Darstellung) .....	42

Abbildung 28: Bestimmung der nicht bearbeiteten Oberfläche (horizontale und vertikale Schicht) .....	45
Abbildung 29: Visualisierung der Transportation .....	48
Abbildung 30: Anatomie der Unterkiefermolaren (Rekonstruktion aus vertikalen Mikro-CT- Schichten).....	51
Abbildung 31: Anatomie der Oberkiefermolaren (Rekonstruktion aus vertikalen Mikro-CT-Schichten).....	52
Abbildung 32: Beispiele aus der HFE-Gruppe .....	56
Abbildung 33: Beispiele aus der REC-Gruppe.....	57
Abbildung 34: Beispiele aus der TFA-Gruppe .....	57
Abbildung 35: Beispiele aus der WOG-Gruppe .....	58
Abbildung 36: Anwendung des 3D Medianfilters (horizontale Schicht eines Wurzelkanals).....	65
Abbildung 37: Bestimmung der Mittellinie (horizontale Schicht eines Kanals mit Isthmus).....	66
Abbildung 38: Berechnung der Oberfläche (Schema) .....	67
Abbildung 39: Bestimmung der Transportation als Distanz zwischen den Mittellinien vor und nach Aufbereitung (Schema, vertikale Ebene) .....	69
Abbildung 40: Feilendurchmesser der REC 25/0.08~ (regressiver Taper) (blau) und der TFA 35/0.06 (rot) (Schema basierend auf Herstellerangaben; horizontal gestaucht).....	71

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nickel-Titan-Legierungen (basierend auf Zupanc und Schäfer 2017).....	17
Tabelle 2: Reciproc (VDW Dental; Kim et al. 2012) .....	19
Tabelle 3: WaveOne Gold (Kim et al. 2012; Dentsply 2015) .....	20
Tabelle 4: Twisted File Adaptive (Gambarini; Moran) .....	22
Tabelle 5: HyFlex EDM (Coltène/Whaledent) .....	23
Tabelle 6: Volumen, Oberfläche und Wurzelkanalkrümmung.....	53
Tabelle 7: Volumen des abgetragenen Dentins.....	54
Tabelle 8: Anteil der nicht bearbeiteten Oberfläche.....	55
Tabelle 9: Transportation.....	56
Tabelle 10: ISO-Größen und Taper .....	62
Tabelle 11: Merkmale der untersuchten Feilen.....	75

## 10 Verzeichnis der Hersteller

August Hedinger GmbH & Co. KG, Heiligenwiesen 26, 70327 Stuttgart;  
[www.hedinger.de](http://www.hedinger.de)

B. Braun Melsungen AG, Carl-Braun-Str. 1, 34212 Melsungen; [www.bbraun.de](http://www.bbraun.de)

Becton Dickinson GmbH, Tullastr. 8-12, 69126 Heidelberg; [www.bd.com](http://www.bd.com)

Carl Zeiss Microscopy GmbH, Carl-Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena; [www.zeiss.de](http://www.zeiss.de)

Coltène/Whaledent GmbH, Feldwiesenstr. 20, CH-9450 Altstätten, Schweiz;  
[www.coltene.com](http://www.coltene.com)

Dentsply DeTrey GmbH, De-Trey-Str. 1, 78467 Konstanz; [www.dentsply.de](http://www.dentsply.de)

frasaco GmbH, Oberhofer Str. 18, 88069 Tettnang; [www.frasaco.de](http://www.frasaco.de)

Heraeus Kulzer GmbH, Grüner Weg 11, 63450 Hanau; [www.kulzer.de](http://www.kulzer.de)

HU-Friedy Mfg. Co., LLC., Astropark, Lyoner Str. 9, 60528 Frankfurt am Main; [www.hu-friedy.com](http://www.hu-friedy.com)

IBM Deutschland GmbH, IBM-Allee 1, 71137 Ehningen; [www.ibm.com](http://www.ibm.com)

KaVo Dental GmbH, Bismarckring 39, 88400 Biberach; [www.kavo.com](http://www.kavo.com)

Komet Dental - Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Trophagener Weg 25, 32657 Lemgo;  
[www.kometdental.de](http://www.kometdental.de)

Omnident Dental-Handelsgesellschaft mbH, Gutenbergring 7-9, 63110 Rodgau Nieder-Roden; [www.omnident.de](http://www.omnident.de)

Scanco Medical AG, Fabrikweg 2, CH-8306 Brüttisellen, Schweiz; [www.scanco.ch](http://www.scanco.ch)

Sigma-Aldrich Biochemie GmbH, Georg-Heyken-Straße 14, 21147 Hamburg;  
[www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com)

Sybronendo – Kerr Corporation, 1717 West Collins Avenue, 92867 Orange – California, U.S.A; [www.kerrdental.com](http://www.kerrdental.com)

Syndicad Ingenieurbüro, Landsberger Str. 234, 80687 München; [www.syndicad.de](http://www.syndicad.de)

Ultradent Products Inc., Am Westhover Berg 30, 51149 Köln; [www.ultradent.com](http://www.ultradent.com)

VDW GmbH, Bayerwaldstr. 15, 81709 München; [www.vdw-dental.de](http://www.vdw-dental.de)

Veddefar N.V., Moeremanslaan 29, BE-1700 Dilbeek, Belgien; [www.veddefar.co](http://www.veddefar.co)

## 11 Literaturverzeichnis

- Adams R, Bischof L (1994):** Seeded Region Growing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 16: 641–647.
- Adorno CG, Yoshioka T, Suda H (2009):** The Effect of Root Preparation Technique and Instrumentation Length on the Development of Apical Root Cracks. *Journal of Endodontics* 35: 389–392.
- Ahmetoglu F, Keles A, Simsek N, Ocak M, Yologlu S (2015):** Comparative evaluation of root canal preparations of maxillary first molars with self-adjusting file, reciproc single file, and revo-s rotary file: A micro-computed tomography study. *Scanning* 37: 218–225.
- Alapati SB, Brantley WA, Iijima M, Clark WA, Kovarik L, Buie C, Liu J, Ben Johnson W (2009):** Metallurgical Characterization of a New Nickel-Titanium Wire for Rotary Endodontic Instruments. *Journal of Endodontics* 35: 1589–1593.
- Alapati SB, Brantley WA, Svec TA, Powers JM, Nusstein JM, Daehn GS (2005):** SEM Observations of Nickel-Titanium Rotary Endodontic Instruments that Fractured During Clinical Use. *Journal of Endodontics* 31: 40–43.
- Al-Harbi F, Kaisarly D, Michna A, ArRejaie A, Bader D, El Gezawi M (2015):** Cervical Interfacial Bonding Effectiveness of Class II Bulk Versus Incremental Fill Resin Composite Restorations. *Operative Dentistry* 40: 622–635.
- Alrahabi M, Alkady A (2017):** Comparison of root canal apical transportation associated with Wave One, ProTaper Next, TF, and OneShape nickel–titanium instruments in curved canals of extracted teeth: A radiographic evaluation. *The Saudi Journal for Dental Research* 8: 1–4.
- American Association of Endodontics (2012):** Glossary of Endodontic Terms, 8. Aufl.
- Amoroso-Silva P, Alcalde M, Duarte M, Deus G de, Ordinola-Zapata R, Freire LG, Cavenago BC, Moraes IG de (2016):** Effect of finishing instrumentation using niti hand files on volume, surface area and uninstrumented surfaces in C-shaped root canal systems. *Int Endod J*: n/a-n/a.

- Anderson ME, Price JW, Parashos P (2007):** Fracture Resistance of Electropolished Rotary Nickel–Titanium Endodontic Instruments. *Journal of Endodontics* 33: 1212–1216.
- Arganda-Carreras I (2008):** Skeletonize 3D. 2D and 3D skeletonization of binary images. <https://imagej.net/Skeletonize3D>.
- Arganda-Carreras I (2017):** Analyze Skeleton. Analysis of 2D and 3D skeleton images. <http://imagej.net/AnalyzeSkeleton>.
- Arslan H, Doğanay E, Alsancak M, Çapar ID, Karataş E, Gündüz HA (2016):** Comparison of apically extruded debris after root canal instrumentation using Reciproc® instruments with various kinematics. *Int Endod J* 49: 307–310.
- Baek JY, Yoo HM, Park DS, Oh TS, Kum KY, Shin SY, Chang SW (2014):** Comparison of the shaping abilities of three nickel–titanium instrumentation systems using micro-computed tomography. *Journal of Dental Sciences* 9: 111–117.
- Bergmans L, van Cleynenbreugel J, Wevers M, Lambrechts P (2001):** A methodology for quantitative evaluation of root canal instrumentation using microcomputed tomography. *International Endodontic Journal* 34: 390–398.
- Berutti E, Chiandussi G, Paolino DS, Scotti N, Cantatore G, Castellucci A, Pasqualini D (2012):** Canal Shaping with WaveOne Primary Reciprocating Files and ProTaper System: A Comparative Study. *Journal of Endodontics* 38: 505–509.
- Berutti E, Fedon G (1992):** Thickness of cementum/dentin in mesial roots of mandibular first molars. *Journal of Endodontics* 18: 545–548.
- Blattner TC, George N, Lee CC, Kumar V, Yelton CD (2010):** Efficacy of Cone-Beam Computed Tomography as a Modality to Accurately Identify the Presence of Second Mesio Buccal Canals in Maxillary First and Second Molars: A Pilot Study. *Journal of Endodontics* 36: 867–870.
- Boldt J, Knapp W, Proff P, Rottner K, Richter E-J (2012):** Measurement of tooth and implant mobility under physiological loading conditions. *Dental Implantology* 194: 185–189.
- Boutsioukis C, Gogos C, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, van der Sluis LW (2010):** The effect of apical preparation size on irrigant flow in root canals

evaluated using an unsteady Computational Fluid Dynamics model. *International Endodontic Journal* 43: 874–881.

**Boutsioukis C, Lambrianidis T, Kastrinakis E (2009):** Irrigant flow within a prepared root canal using various flow rates: a computational fluid dynamics study. *International Endodontic Journal* 42: 144–155.

**Burger W, Burge MJ (2006):** Digitale Bildverarbeitung. Eine Einführung mit Java und ImageJ. Springer, 2., überarb. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York.

**Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2013a):** Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *International Endodontic Journal* 46: 590–597.

**Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2014):** Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems: Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo. *Int Endod J* 47: 405–409.

**Bürklein S, Donnermeyer D, Schäfer E (2017):** Nickel-Titan-Instrumente - rotierend, vibrierend, reziprozierend. *Endodontie Quintessenz* 26: 299–307.

**Bürklein S, Hinschitza K, Dammaschke T, Schäfer E (2012):** 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* 45: 449–461.

**Bürklein S, Schäfer E (2012):** Apically Extruded Debris with Reciprocating Single-File and Full-sequence Rotary Instrumentation Systems. *Journal of Endodontics* 38: 850–852.

**Bürklein S, Schäfer E (2013):** Critical evaluation of root canal transportation by instrumentation. *Endod Topics* 29: 110–124.

**Bürklein S, Tsotsis P, Schäfer E (2013b):** Incidence of Dentinal Defects after Root Canal Preparation: Reciprocating versus Rotary Instrumentation. *Journal of Endodontics* 39: 501–504.

**Busquim S, Cunha, R. S., Freire L, Gavini G, Machado, M. E., Santos M (2014):** A micro-computed tomography evaluation of long-oval canal preparation using reciprocating or rotary systems. *International Endodontic Journal*: n/a.

**Çalışkan MK, Pehlivan Y, Sepetçioğlu F, Türkün M, Tuncer SŞ (1995):** Root canal morphology of human permanent teeth in a Turkish population. *Journal of Endodontics* 21: 200–204.

**Capar ID, Arslan H (2016):** A review of instrumentation kinematics of engine-driven nickel–titanium instruments. *Int Endod J* 49: 119–135.

**Capar ID, Ertas H, Ok E, Arslan H, Ertas ET (2014):** Comparative Study of Different Novel Nickel-Titanium Rotary Systems for Root Canal Preparation in Severely Curved Root Canals. *Journal of Endodontics* 40: 852–856.

**Cheung GS, Liu CS (2009):** A Retrospective Study of Endodontic Treatment Outcome between Nickel-Titanium Rotary and Stainless Steel Hand Filing Techniques. *Journal of Endodontics* 35: 938–943.

**Citterio F, Pellegatta A, Citterio CL, Maddalone M (2014):** Analysis of the apical constriction using micro-computed tomography and anatomical sections. *Giornale Italiano di Endodonzia* 28: 41–45.

**Clem WH (1969):** Endodontics: The adolescent patient. *Dental Clinics of North America* 13: 483–493.

**Coltène/Whaledent:** HyFlex. Die neue NiTi Feilen Generation.

**Cordelieres F, White DJ, Rueden C (2017):** 3D Objects Counter (Image J). [https://imagej.net/3D\\_Objects\\_Counter](https://imagej.net/3D_Objects_Counter).

**DEDERICH DN (1999):** CO2 LASER FUSION OF A VERTICAL ROOT FRACTURE. *The Journal of the American Dental Association* 130: 1195–1199.

**De-Deus G, Belladonna FG, Souza EM, Silva, Emmanuel João Nogueira Leal, Neves, Aline de Almeida, Alves H, Lopes RT, Versiani MA (2015):** Micro–computed Tomographic Assessment on the Effect of ProTaper Next and Twisted File Adaptive Systems on Dentinal Cracks. *Journal of Endodontics* 41: 1116–1119.

**De-Deus G, Silva, Emmanuel João Nogueira Leal, Marins J, Souza E, Neves, Aline de Almeida, Gonçalves Belladonna F, Alves H, Lopes RT, Versiani MA (2014):** Lack of Causal Relationship between Dentinal Microcracks and Root Canal Preparation with Reciprocation Systems. *Journal of Endodontics*.

**Dentsply (2015):** WaveOne Gold. Broschüre.

**Dentsply Maillefer (2012):** Gebrauchsanweisung ProTaper Universal.

**Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde (2000):**

Wurzelkanalaufbereitungen. Stellungnahme.

**Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde (2005):** Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung. Stellungnahme, Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift.

**Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde (2007):** "Good clinical practice": Die Wurzelkanalbehandlung. Stellungnahme des Endodontie-Beirats der DGZ.

**Domark JD, Hatton JF, Benison RP, Hildebolt CF (2013):** An Ex Vivo Comparison of Digital Radiography and Cone-beam and Micro Computed Tomography in the Detection of the Number of Canals in the Mesiobuccal Roots of Maxillary Molars. *Journal of Endodontics* 39: 901–905.

**Dummer PM, Alodeh MH, AL-OMARI MA (1991):** A method for the construction of simulated root canals in clear resin blocks. *International Endodontic Journal* 24: 63–66.

**Eberhardt A:** WaveOne Gold. Sicher und souverän durch den Kanal.

**EIAyouti A, Hülber-J M, Judenhofer MS, Connert T, Mannheim JG, Löst C, Pichler BJ, Ohle C von (2014):** Apical Constriction: Location and Dimensions in Molars—A Micro-Computed Tomography Study. *Journal of Endodontics* 40: 1095–1099.

**Elsaka SE, Elnaghy AM, Badr AE (2016):** Torsional and bending resistance of WaveOne Gold, Reciproc and Twisted File Adaptive instruments. *International Endodontic Journal* 49.

**Estrela C, Bueno MR, Sousa-Neto MD, PÃ©cora JD (2008):** Method for determination of root curvature radius using cone-beam computed tomography images. *Brazilian Dental Journal* 19: 114–118.

**Fidler A (2014):** Kinematics of 2 Reciprocating Endodontic Motors: The Difference between Actual and Set Values. *Journal of Endodontics* 40: 990–994.

**Gambarini G:** TF Adaptive: simplicity meets performance.

**Gambarini G (2000):** Rationale for the use of low-torque endodontic motors in root canal instrumentation. *Dental Traumatology* 16: 95–100.

- Gambill JM, Alder M, del Rio CE (1996):** Comparison of nickel-titanium and stainless steel hand-file instrumentation using computed tomography. *Journal of Endodontics* 22: 369–375.
- Gergi R, Arbab-Chirani R, Osta N, Naaman A:** Micro–Computed Tomographic Evaluation of Canal Transportation Instrumented by Different Kinematics Rotary Nickel-Titanium Instruments. *Journal of Endodontics*.
- Gergi R, Osta N, Bourbouze G, Zgheib C, Arbab-Chirani R, Naaman A (2014):** Effects of three nickel titanium instrument systems on root canal geometry assessed by micro-computed tomography. *Int Endod J*: n/a.
- Glickman GN, Pettiette MT (2006):** Preparation for Treatment. In: Cohen S, Hargreaves KM (Hrsg.), *Pathways of the pulp*. Mosby Elsevier 9th ed, St. Louis, Mo, 91–135.
- Goodis HE, Marshall GW, White JM (1991):** The effects of storage after extraction of the teeth on human dentine permeability in vitro. *Archives of Oral Biology* 36: 561–566.
- Grande NM, Ahmed, Hany Mohamed Aly, Cohen S, Bukiet F, Plotino G (2015a):** Current Assessment of Reciprocation in Endodontic Preparation: A Comprehensive Review—Part I: Historic Perspectives and Current Applications. *Journal of Endodontics* 41: 1778–1783.
- Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Testarelli L, Dmbrosio F, Pecci R, Bedini R (2012):** Present and future in the use of micro-CT scanner 3D analysis for the study of dental and root canal morphology. *Annali dell’Istituto Superiore di Sanità* 48: 26–34.
- Grande NM, Plotino G, Sinibaldi R, Gambarini G, Somma F (2015b):** The impact of endodontic anatomy on clinical practice: a micro-CT study and tribute to Prof. Francesco Riitano. *Giornale Italiano di Endodonzia* 29: 30–36.
- Gündoğar M, Özyürek T (2017):** Cyclic Fatigue Resistance of OneShape, HyFlex EDM, WaveOne Gold, and Reciproc Blue Nickel-titanium Instruments. *Journal of Endodontics* 43: 1192–1196.
- Hahn C-L, Liewehr FR (2007):** Innate Immune Responses of the Dental Pulp to Caries. *Journal of Endodontics* 33: 643–651.

- Hayashi M, Kinomoto Y, Takeshige F, Ebisu S (2004):** Prognosis of Intentional Replantation of Vertically Fractured Roots Reconstructed with Dentin-Bonded Resin. *Journal of Endodontics* 30: 145–148.
- Hellwig E, Klimek J, Attin T (2009):** Einführung in die Zahnerhaltung. Deutscher Ärzte-Verlag, 5. Aufl., Köln.
- Hess W (1917):** Zur Anatomie der Wurzelkanäle des menschlichen Gebisses mit Berücksichtigung der feineren Verzweigungen am Foramen apicale. Buchdruckerei Berichthaus.
- Higuera O, Plotino G, Tocci L, Carrillo G, Gambarini G, Jaramillo DE (2015):** Cyclic Fatigue Resistance of 3 Different Nickel-Titanium Reciprocating Instruments in Artificial Canals. *Journal of Endodontics* 41: 913–915.
- Hill D, Batchelor P, Holden M, Hawkes D (2001):** Medical image registration. *Physics in Medicine and Biology* 46: R1-R46.
- Himel VT, McSpadden JT, Goodis HE (2006):** Instruments, Materials, and Devices. In: Cohen S, Hargreaves KM (Hrsg.), Pathways of the pulp. Mosby Elsevier 9th ed, St. Louis, Mo, 233–289.
- Hoppe CB, Böttcher DE, Justo AM, Só MVR, Grecca FS (2016):** Comparison of curved root canals preparation using reciprocating, continuous and an association of motions. *Scanning*: n/a-n/a.
- Huang TT, Jones AS, He LH, Darendeliler MA, Swain MV (2007):** Characterisation of enamel white spot lesions using X-ray micro-tomography. *Special Section: Microbiology of dental unit water lines; setting standards for the future* 35: 737–743.
- Hübscher W, Barbakow F, Peters, O. A. (2003):** Root-canal preparation with FlexMaster: canal shapes analysed by micro-computed tomography. *International Endodontic Journal* 36: 740–747.
- Hülsmann M (2013):** Effects of mechanical instrumentation and chemical irrigation on the root canal dentin and surrounding tissues. *Endodontic Topics* 29: 55–86.
- Hülsmann M, Herbst U, Schäfers F (2003):** Comparative study of root-canal preparation using Lightspeed and Quantec SC rotary NiTi instruments. *International Endodontic Journal* 36: 748–756.

**Ingle JI (1961):** A standardized endodontic technique utilizing newly designed instruments and filling materials. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 14: 83–91.

**International Organization for Standardization:** Dentistry — Root-canal instruments — Part 1: General requirements and test methods.  
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:3630:-1:ed-2:v1:en>.

**ITK.org:** Insight Segmentation and Registration Toolkit ITK.

**Jarek S (2009):** Seeded Region Growing (ImageJ Plugin). <http://ij-plugins.sourceforge.net/plugins/segmentation/Howto-Seeded-Region-Growing-Segmentation.pdf>.

**Johnson BR, Witherspoon DE (2006):** Periradicular Surgery. In: Cohen S, Hargreaves KM (Hrsg.), *Pathways of the pulp*. Mosby Elsevier 9th ed, St. Louis, Mo, 724–785.

**Junaid A, Freire LG, da Silveira Bueno, Carlos Eduardo, Mello I, Cunha RS (2014):** Influence of Single-file Endodontics on Apical Transportation in Curved Root Canals: An Ex Vivo Micro-Computed Tomographic Study. *Journal of Endodontics* 40: 717–720.

**Kaack M (2002):** Elastische Eigenschaften von NiTi-Formgedächtnis-Legierungen. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Physik und Astronomie, Dissertation.

**Kaisarly D (2014):** The Effect of Boundary Conditions on the Polymerization Shrinkage Vectors of Light-Cured Dental Resin Composites. München, Ludwig-Maximilians-Universität, Dissertation.

**Kansal R, Rajput A, Talwar S, Roongta R, Verma M (2014):** Assessment of Dentinal Damage during Canal Preparation Using Reciprocating and Rotary Files. *Journal of Endodontics*.

**Karataş E, Gündüz HA, Kırıcı Dö, Arslan H (2015):** Incidence of dentinal cracks after root canal preparation with ProTaper Gold, Profile Vortex, F360, Reciproc and ProTaper Universal instruments. *Int Endod J*: n/a-n/a.

**Kaval ME, Capar ID, Ertas H (2016):** Evaluation of the Cyclic Fatigue and Torsional Resistance of Novel Nickel-Titanium Rotary Files with Various Alloy Properties. *Journal of Endodontics* 42: 1840–1843.

**Kawai K, Masaka N (2002):** Vertical root fracture treated by bonding fragments and rotational replantation. *Dental Traumatology* 18: 42–45.

**Kerr Endodontics (2015):** Product catalog.

**Kiefner P, Ban M, De-Deus G (2014):** Is the reciprocating movement per se able to improve the cyclic fatigue resistance of instruments? *Int Endod J* 47: 430–436.

**Kim H-C, Kwak S-W, Cheung GS-P, Ko D-H, Chung S-M, Lee W (2012):** Cyclic Fatigue and Torsional Resistance of Two New Nickel-Titanium Instruments Used in Reciprocation Motion: Reciproc Versus WaveOne. *Journal of Endodontics* 38: 541–544.

**Klimm W (2010):** Endodontologie. Lehrbuch für Studium und Praxis. Deutscher Ärzte-Verlag, 2. überarb. Aufl, Köln.

**Klyn SL, Kirkpatrick TC, Rutledge RE (2010):** In Vitro Comparisons of Debris Removal of the EndoActivator™ System, the F File™, Ultrasonic Irrigation, and NaOCl Irrigation Alone after Hand-rotary Instrumentation in Human Mandibular Molars. *Journal of Endodontics* 36: 1367–1371.

**Kulzer GmbH (2015):** Gebrauchsinformation Technovit.

**Kunzelmann K-H:** Tutorial Seeded Region Growing. ImageJ Plugin.  
<http://www.dent.med.uni-muenchen.de/~kkunzelm/htdocs/index.html>.

**Lai G, Kaisarly D, Xu X, Kunzelmann K-H (2014):** MicroCT-based comparison between fluorescence-aided caries excavation and conventional excavation. *Am J Dent* 27: 12–16.

**Levin LG, Law AS, Holland GR, Abbott PV, Roda RS (2009):** Identify and Define All Diagnostic Terms for Pulpal Health and Disease States. *Journal of Endodontics* 35: 1645–1657.

**Lim Y-J, Park S-J, Kim H-C, Min K-S (2013):** Comparison of the centering ability of Wave-One and Reciproc nickel-titanium instruments in simulated curved canals. *Restor Dent Endod* 38: 21–25.

**LIM, S. S., STOCK, C. J. R. (1987):** The risk of perforation in the curved canal: anticurvature filing compared with the stepback technique. *International Endodontic Journal* 20: 33–39.

**Marceliano-Alves, M. F. V., Sousa-Neto, M. D., Fidel, S. R., Steier L, Robinson, J. P., Pécora, J. D., Versiani, M. A. (2014):** Shaping ability of single-file reciprocating and heat-treated multife rotary systems: a micro-CT study. *Int Endod J*: n/a.

**McSpadden JT (2001):** Endodontic instrument having regressive conicity. Google Patents.

**MediaWiki (2016):** ImageJ. <https://imagej.net/ImageJ>.

**Melo Ribeiro, Marcus Vinícius de, Silva-Sousa YT, Versiani MA, Lamira A, Steier L, Pécora JD, Sousa-Neto, Manoel Damião de (2013):** Comparison of the Cleaning Efficacy of Self-Adjusting File and Rotary Systems in the Apical Third of Oval-shaped Canals. *Journal of Endodontics* 39: 398–401.

**Metzger Z, Solomonov M, Kfir A (2013):** The role of mechanical instrumentation in the cleaning of root canals. *Endod Topics* 29: 87–109.

**Moran A:** Twisted-Files Adaptive: A Novel Approach to Endodontic NiTi Instrumentation. Clinical case report.

**Muñoz E, Forner L, Llana C (2014):** Influence of Operator's Experience on Root Canal Shaping Ability with a Rotary Nickel-Titanium Single-File Reciprocating Motion System. *Journal of Endodontics* 40: 547–550.

**Nair MK, Nair UP (2007):** Digital and Advanced Imaging in Endodontics: A Review. *Journal of Endodontics* 33: 1–6.

**Natali AN, Pavan PG, Scarpa C (2004):** Numerical analysis of tooth mobility: formulation of a non-linear constitutive law for the periodontal ligament. *Dental Materials* 20: 623–629.

**Neelakantan P, Subbarao C, Subbarao CV (2010):** Comparative Evaluation of Modified Canal Staining and Clearing Technique, Cone-Beam Computed Tomography, Peripheral Quantitative Computed Tomography, Spiral Computed Tomography, and Plain and Contrast Medium–enhanced Digital Radiography in Studying Root Canal Morphology. *Journal of Endodontics* 36: 1547–1551.

**Neves AA, Silva EJ, Roter JM, Belladonna FG, Alves HD, Lopes RT, Paciornik S, De-Deus GA (2015):** Exploiting the potential of free software to evaluate root canal biomechanical preparation outcomes through micro-CT images. *Int Endod J* 48: 1033–1042.

- Özyürek T (2016):** Cyclic Fatigue Resistance of Reciproc, WaveOne, and WaveOne Gold Nickel-Titanium Instruments. *Journal of Endodontics* 42: 1536–1539.
- Özyürek T, Yılmaz K, Uslu G (2017):** Shaping Ability of Reciproc, WaveOne GOLD, and HyFlex EDM Single-file Systems in Simulated S-shaped Canals. *Journal of Endodontics* 43: 805–809.
- Paqué F, Laib A, Gautschi H, Zehnder M (2009):** Hard-Tissue Debris Accumulation Analysis by High-Resolution Computed Tomography Scans. *Journal of Endodontics* 35: 1044–1047.
- Paqué F, Peters OA (2011):** Micro-computed tomography evaluation of the preparation of long oval root canals in mandibular molars with the self-adjusting file. *Journal of Endodontics* 37: 517–521.
- Pashley DH, Liewehr FR (2006):** Structure and Functions of the Dentin-Pulp Complex. In: Cohen S, Hargreaves KM (Hrsg.), *Pathways of the pulp*. Mosby Elsevier 9th ed, St. Louis, Mo, 460–513.
- Pedullà E, Lo Savio F, Boninelli S, Plotino G, Grande NM, La Rosa G, Rapisarda E (2016a):** Torsional and Cyclic Fatigue Resistance of a New Nickel-Titanium Instrument Manufactured by Electrical Discharge Machining. *Journal of Endodontics* 42: 156–159.
- Pedullà E, Plotino G, Grande, N. M., Avarotti G, Gambarini G, Rapisarda E, Mannocci F (2016b):** Shaping ability of two nickel-titanium instruments activated by continuous rotation or adaptive motion: a micro-computed tomography study. *Clinical oral investigations* 20: 2227–2233.
- Peters LB, Wesselink PR, Buijs JF, van Winkelhoff, A. J. (2001):** Viable Bacteria in Root Dentinal Tubules of Teeth with Apical Periodontitis. *Journal of Endodontics* 27: 76–81.
- Peters OA (2004):** Current Challenges and Concepts in the Preparation of Root Canal Systems: A Review. *Journal of Endodontics* 30: 559–567.
- Peters OA, Peters CI (2006):** Cleaning and Shaping of the Root Canal System. In: Cohen S, Hargreaves KM (Hrsg.), *Pathways of the pulp*. Mosby Elsevier 9th ed, St. Louis, Mo, 290–357.

**Peters, O. A., Laib A, Rügsegger P, Barbakow F (2000):** Three-dimensional Analysis of Root Canal Geometry by High-resolution Computed Tomography. *Journal of Dental Research* 79: 1405–1409.

**Peters, O. A., Peters, C. I., Schönenberger K, Barbakow F (2003):** ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT. *International Endodontic Journal* 36: 86–92.

**Pettiette MT, Olutayo Delano E, Trope M (2001):** Evaluation of Success Rate of Endodontic Treatment Performed by Students with Stainless-Steel K-Files and Nickel-Titanium Hand Files. *Journal of Endodontics* 27: 124–127.

**Pinheiro, SR, Alcalde MP, Vivacqua-Gomes N, Bramante CM, Vivan RR, Duarte M, Vasconcelos BC (2017):** Evaluation of apical transportation and centring ability of five thermally treated NiTi rotary systems. *International Endodontic Journal*.

**Pirani C, Iacono F, Generali L, Sassatelli P, Nucci C, Lusvarghi L, Gandolfi MG, Prati C (2016):** HyFlex EDM: superficial features, metallurgical analysis and fatigue resistance of innovative electro discharge machined NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 49: 483–493.

**Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G (2009):** A Review of Cyclic Fatigue Testing of Nickel-Titanium Rotary Instruments. *Journal of Endodontics* 35: 1469–1476.

**Pruett JP, Clement DJ, Carnes Jr. , David L. (1997):** Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *Journal of Endodontics* 23: 77–85.

**Rapisarda E, Bonaccorso A, Tripi TR, Condorelli GG, Torrisi L (2001):** Wear of Nickel-Titanium Endodontic Instruments Evaluated by Scanning Electron Microscopy: Effect of Ion Implantation. *Journal of Endodontics* 27: 588–592.

**Reis, AG de Araújo Rebouças, Grazziotin-Soares R, Barletta FB, Fontanella, VR Camargo, Mahl, CR Winck (2013):** Second Canal in Mesio Buccal Root of Maxillary Molars Is Correlated with Root Third and Patient Age: A Cone-beam Computed Tomographic Study. *Journal of Endodontics* 39: 588–592.

**Rhodes JS, Ford TRP, Lynch JA, Liepins PJ, Curtis RV (1999):** Micro-computed tomography: a new tool for experimental endodontology. *International Endodontic Journal* 32: 165–170.

- Ricucci D, Siqueira Jr., José F. (2010a):** Biofilms and Apical Periodontitis: Study of Prevalence and Association with Clinical and Histopathologic Findings. *Journal of Endodontics* 36: 1277–1288.
- Ricucci D, Siqueira Jr., José F. (2010b):** Fate of the Tissue in Lateral Canals and Apical Ramifications in Response to Pathologic Conditions and Treatment Procedures. *Journal of Endodontics* 36: 1–15.
- Roane JB, Sabala CL, Duncanson Jr., Manville G. (1985):** The “balanced force” concept for instrumentation of curved canals. *Journal of Endodontics* 11: 203–211.
- Robinson JP, Lumley PJ, Claridge E, Cooper PR, Grover LM, Williams RL, Walmsley, A. Damien (2012):** An analytical Micro CT methodology for quantifying inorganic dentine debris following internal tooth preparation. *Journal of Dentistry* 40: 999–1005.
- Roda RS, Gettleman BH (2006):** Nonsurgical Retreatment. In: Cohen S, Hargreaves KM (Hrsg.), *Pathways of the pulp*. Mosby Elsevier 9th ed, St. Louis, Mo, 944–1010.
- Rödiger T, Hülsmann M, Mühge M, Schäfers F (2002):** Quality of preparation of oval distal root canals in mandibular molars using nickel-titanium instruments. *International Endodontic Journal* 35: 919–928.
- Roentgen WC (1895):** Ueber eine neue Art von Strahlung., Aus den Sitzungsberichten der Wuerzburger Physik. *Medic. Gesellschaft, Wuerzburg*.
- Rösch P (2011):** Quantitative evaluation of Root canal instrumentation based on ITK and VTK. Version 2.
- Saber, S. E. D. M., Nagy, M. M., Schäfer E (2015a):** Comparative evaluation of the shaping ability of ProTaper Next, iRaCe and Hyflex CM rotary NiTi files in severely curved root canals. *Int Endod J* 48: 131–136.
- Saber, S. E. D. M., Nagy, M. M., Schäfer E (2015b):** Comparative evaluation of the shaping ability of WaveOne, Reciproc and OneShape single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 48: 109–114.
- Saberi N, Patel S, Mannocci F (2017):** Comparison of centring ability and transportation between four nickel titanium instrumentation techniques by micro-computed tomography. *International Endodontic Journal* 50: 595–603.

- Sant'Anna Júnior A, Cavenago BC, Ordinola-Zapata R, De-Deus G, Bramante CM, Duarte, Marco Antonio Hungaro (2014):** The Effect of Larger Apical Preparations in the Danger Zone of Lower Molars Prepared Using the Mtwo and Reciproc Systems. *Journal of Endodontics* 40: 1855–1859.
- Sathorn C, Palamara, Joseph E. A., Palamara D, Messer HH (2005):** Effect of Root Canal Size and External Root Surface Morphology on Fracture Susceptibility and Pattern: A Finite Element Analysis. *Journal of Endodontics* 31: 288–292.
- Sattapan B, Nervo GJ, Palamara, Joseph E. A., Messer HH (2000a):** Defects in Rotary Nickel-Titanium Files After Clinical Use. *Journal of Endodontics* 26: 161–165.
- Sattapan B, Palamara, Joseph E. A., Messer HH (2000b):** Torque During Canal Instrumentation Using Rotary Nickel-Titanium Files. *Journal of Endodontics* 26: 156–160.
- Schäfer E, Dammaschke T (2009):** Development and sequelae of canal transportation. *Endodontic Topics* 15: 75–90.
- Schilder H (1974):** Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am* 18: 269–296.
- Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E, Kaynig V, Longair M, Pietzsch T, Preibisch S, Rueden C, Saalfeld S, Schmid B, Tinevez J-Y, White DJ, Hartenstein V, Eliceiri K, Tomancak P, Cardona A (2012):** Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Meth* 9: 676–682.
- Schindelin, J., Rueden, C.T., Hiner, M.C., Eliceiri, K.W. (2015):** The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis. *Molecular Reproduction and Development*: 518–529.
- Schmid B (2014):** Minimum/Maximum/Median (ImageJ).  
<http://imagej.net/Minimum/Maximum/Median>.
- Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW (2012):** NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Meth* 9: 671–675.
- Schroeder HE (2000):** Orale Strukturbiologie. Entwicklungsgeschichte, Struktur und Funktion normaler Hart- und Weichgewebe der Mundhöhle und des Kiefergelenks. Thieme, 5., unveränd. Aufl, Stuttgart [u.a.].

**Shemesh H, Bier, C. A. S., Wu M-K, Tanomaru-Filho M, Wesselink PR (2009):**

The effects of canal preparation and filling on the incidence of dentinal defects.

*International Endodontic Journal* 42: 208–213.

**Shen Y, Zhou H-m, Zheng Y-f, Peng B, Haapasalo M (2013):** Current challenges

and concepts of the thermomechanical treatment of Nickel-Titanium instruments.

*Journal of Endodontics* 39: 163–172.

**Siqueira Jr, José F., Rôças IN, Santos, Sandra R. L. D., Lima KC, Magalhães,**

**Fernando A. C., Uzeda M de (2002):** Efficacy of Instrumentation Techniques and

Irrigation Regimens in Reducing the Bacterial Population within Root Canals. *Journal*

*of Endodontics* 28: 181–184.

**Siqueira Jr. , José F., Alves, Flávio R. F., Versiani MA, Rôças IN, Almeida BM,**

**Neves, Mônica A. S., Sousa-Neto MD (2013):** Correlative Bacteriologic and Micro–

Computed Tomographic Analysis of Mandibular Molar Mesial Canals Prepared

by Self-Adjusting File, Reciproc, and Twisted File Systems. *Journal of Endodontics*

39: 1044–1050.

**Sjögren U, Figdor D, Persson S, Sundqvist G (1997):** Influence of infection at the

time of root filling on the outcome of endodontic treatment of teeth with apical

periodontitis. *International Endodontic Journal* 30: 297–306.

**Stern S, Patel S, Foschi F, Sherriff M, Mannocci F (2012):** Changes in centring

and shaping ability using three nickel–titanium instrumentation techniques analysed

by micro-computed tomography ( $\mu$ CT). *International Endodontic Journal* 45: 514–

523.

**Stöckel D (2000):** Nickel-Titan Formgedächtnislegierungen. Produktionstechnik für

Bauteile und Halbwerkzeuge aus Nickel-Titan Legierungen - Abschlussbericht des

Verbundprojekts PROBANT.

**Swain MV, Xue J (2009):** State of the Art of Micro-CT Applications in Dental

Research. *International Journal of Oral Science* 1: 177–188.

**Taschieri S, Tamse A, Del Fabbro M, Rosano G, Tsesis I (2010):** A new surgical

technique for preservation of endodontically treated teeth with coronally located

vertical root fractures: a prospective case series. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral*

*Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 110: e45-e52.

- Tepel J (2000):** Experimentelle Untersuchungen über die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung. Quintessenz Verlags GmbH, Berlin.
- Tepel J, Schäfer E, Hoppe W (1993):** Kunststoffe als Modellmaterial in der Endodontie. *Deutsche Zahnärztliche Zeitung* 48: 736–738.
- Tepel J, Schäfer E, Hoppe W (1997):** Properties of endodontic hand instruments used in rotary motion. Part 3. Resistance to bending and fracture. *Journal of Endodontics* 23: 141–145.
- Thompson M, Sidow SJ, Lindsey K, Chuang A, McPherson III, James C. (2014):** Evaluation of a New Filing System's Ability to Maintain Canal Morphology. *Journal of Endodontics* 40: 867–870.
- Thompson SA (2000):** An overview of nickel–titanium alloys used in dentistry. *International Endodontic Journal* 33: 297–310.
- Thompson SA, Dummer PM (1997):** Shaping ability of ProFile. 04 Taper Series 29 rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. Part 1. *International Endodontic Journal* 30: 1–7.
- Topçuoğlu HS, Düzgün S, Aktı A, Topçuoğlu G (2016):** Laboratory comparison of cyclic fatigue resistance of WaveOne Gold, Reciproc and WaveOne files in canals with a double curvature. *International Endodontic Journal* 49.
- Topçuoğlu, H. S., Düzgün S, Akpek F, Topçuoğlu G, Aktı A (2016):** Influence of a glide path on apical extrusion of debris during canal preparation using single-file systems in curved canals. *Int Endod J* 49: 599–603.
- Touré B, Faye B, Kane AW, Lo CM, Niang B, Boucher Y (2011):** Analysis of Reasons for Extraction of Endodontically Treated Teeth: A Prospective Study. *Journal of Endodontics* 37: 1512–1515.
- Ullmann CJ, Peters OA (2005):** Effect of Cyclic Fatigue on Static Fracture Loads in ProTaper Nickel-Titanium Rotary Instruments. *Journal of Endodontics* 31: 183–186.
- VDW Dental:** RECIPROC Anwenderbroschüre. Reciproc one file endo.
- Venino PM, Citterio CL, Pellegatta A, Ciccarelli M, Maddalone M (2017):** A Micro-computed Tomography Evaluation of the Shaping Ability of Two Nickel-titanium Instruments, HyFlex EDM and ProTaper Next. *Journal of Endodontics* 43: 628–632.

**Versiani MA, Leoni GB, Steier L, De-Deus G, Tassani S, Pécora JD, de Sousa-Neto, Manoel Damião (2013):** Micro-computed Tomography Study of Oval-shaped Canals Prepared with the Self-adjusting File, Reciproc, WaveOne, and ProTaper Universal Systems. *Journal of Endodontics* 39: 1060–1066.

**Versiani MA, Ordinola-Zapata R, Keleş A, Alcin H, Bramante CM, Pécora JD, Sousa-Neto MD (2016):** Middle mesial canals in mandibular first molars: A micro-CT study in different populations. *Archives of Oral Biology* 61: 130–137.

**Webber J, Machtou P, Pertot W, Kuttler S, Ruddle C, West J (2011):** The WaveOne single-file reciprocating system. *Roots*: 28–33.

**Weine FS (1982):** Endodontic therapy. Mosby, 3. Aufl., St. Louis.

**Weller NR, Niemczyk SP, Kim S (1995):** Incidence and position of the canal isthmus. Part 1. Mesiobuccal root of the maxillary first molar. *Journal of Endodontics* 21: 380–383.

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

**Wu M-K, Fan B, Wesselink PR (2000):** Leakage Along Apical Root Fillings in Curved Root Canals. Part I: Effects of Apical Transportation on Seal of Root Fillings. *Journal of Endodontics* 26: 210–216.

**www.dentsplysirona.com (2017):** ProTaper Universal Rotary Files Asstd (SX-S2, F1-F3) 21mm. <https://www.dentsplysirona.com/en-us/products/endodontics/glide-path-shaping.dir.html/Endodontics/Glide-Path-&-Shaping/Rotary-&-Reciprocating-Files/Shaping/ProTaper-Universal-Rotary-Files/p/TUL-PTURAS21/c/1000671.html#.WZ0skMZpypp>.

**www.uni-wuerzburg.de (2017):** Wissenschaftsmeile Röntgenring: Wilhelm Conrad Röntgen. <http://www.uni-wuerzburg.de/uniarchiv/ausstellungen/wissenschaftsmeile-roentgenring/die-nobelpreistraeger/wilhelm-conrad-roentgen-1901/>.

**Yared G (2008):** Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *International Endodontic Journal* 41: 339–344.

**Yared G (2011):** Ein neues Konzept: Wurzelkanalaufbereitung mit nur einem reziprok arbeitenden Instrument ohne initiale Handaufbereitung. [http://www.vdw-dental.com/fileadmin/redaktion/downloads/presse/yared\\_reciproc\\_neueskonzept.pdf](http://www.vdw-dental.com/fileadmin/redaktion/downloads/presse/yared_reciproc_neueskonzept.pdf).

**Zelada G, Varela P, Martín B, Bahillo JG, Magán F, Ahn S (2002):** The Effect of Rotational Speed and the Curvature of Root Canals on the Breakage of Rotary Endodontic Instruments. *Journal of Endodontics* 28: 540–542.

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

**Zhou H-m, Peng B, Zheng Y-f (2013):** An overview of the mechanical properties of nickel–titanium endodontic instruments. *Endodontic Topics* 29: 42–54.

**Zupanc J, Schäfer E (2017):** Neue Nickel-Titan-Legierungen. Eine Übersicht. *Endodontie Quintessenz* 26: 269–281.

## 12 Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel danke ich für die Überlassung des Promotionsthemas und die Möglichkeit zur Promotion in der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Ludwig-Maximilians-Universität München.

An Herrn Prof. Dr. med. dent. Karl-Heinz Kunzelmann ergeht mein Dank für die Bereitstellung des Mikro-CT-Geräts und der Programme aus der Zusammenarbeit mit Herrn Professor Rösch sowie für seine wertvollen Tipps und Anleitungen für die Auswertung der Mikro-CT-Daten.

In Herrn Dr. med. dent. Christian Diegritz hatte ich einen Betreuer, der mich immer unterstützt und mit seiner Begeisterung für die Endodontie motiviert und angesteckt hat. Herzlichen Dank dafür!

Frau Dr. med. dent. Katrin Heck gilt mein Dank für die Hilfe bei der statistischen Auswertung.

Für ihre Hilfe im Labor und mit der Technik danke ich Frau Gisela Dachs, Frau Evi Köbele und Herrn Thomas Obermeier.

Darüber hinaus danke ich Frau Dr. med. dent. Dalia Kaisarly und meinem Vater, Herrn Dr. Ing. Klaus Richter, von Herzen für ihre Unterstützung.

## 13 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen und dem Internet) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und nicht physisch oder elektronisch veröffentlicht.

München, den 27.11.2018 (Tag der mündlichen Prüfung)

---

Johanna Richter