

Aus der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie  
(Prof. Dr. med. dent. A. Wiegand)  
im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Vergleichende *In-vitro*-Studie zur Entfernung der medikamentösen Einlage  
Kalziumhydroxid aus runden und ovalen Wurzelkanälen.**

**Vergleich von passiver Ultraschallspülung und SAF:**

**Eine Micro-Computertomographie-Studie**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades für Zahnheilkunde  
der Medizinischen Fakultät der  
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Carolin Adler

aus

Essen

Göttingen 2014

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. H. K. Kroemer

I. Berichterstatter: Prof. Dr. med. dent. Michael Hülsmann

II. Berichterstatterin: PD Dr. med. dent. Sabine Sennhenn-Kirchner (Korreferentin)

III. Berichterstatter: Prof. Dr. med. dent. Rainer Mausberg (Promotor)

Tag der mündlichen Prüfung: 28.07.2014

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Literaturübersicht.....	8
2.1	Die Desinfektion des Endodonts.....	8
2.2	Die Wurzelkanalspülung.....	9
2.2.1	Spüllösungen.....	10
2.2.1.1	Natriumhypochlorit (NaOCl).....	10
2.2.2	Spültechniken.....	11
2.2.2.1	Die manuelle Spülung.....	11
2.2.2.2	Die Ultraschallspülung.....	12
2.3	Bewertung der Ultraschallspülung in der Literatur.....	14
2.4	Medikamentöse Einlagen.....	16
2.4.1	Kalziumhydroxid.....	17
2.4.1.1	Anwendung.....	17
2.4.1.2	Chemie.....	17
2.4.1.3	Wirkung.....	18
2.4.1.4	Entfernung.....	20
2.5	Die Wurzelkanalpräparation.....	22
2.5.1	Die Präparation ovaler Wurzelkanäle.....	23
2.5.2	Nickel-Titan-Feilen.....	24
2.5.2.1	FlexMaster-Instrumente.....	26
2.5.2.2	Bewertung der NiTi-Feilen zur Präparation von Wurzelkanälen.....	26
2.5.2.3	Die Self-Adjusting File (=SAF).....	27
2.5.2.3.1	Bewertung des SAF-Systems.....	28

2.6	Das Micro-CT.....	31
2.6.1	Die Micro-Computertomographie in der Endodontologie.....	32
2.6.1.1	Die Bewertung der SAF anhand des Micro-CTs.....	33
3	Ziele der Studie.....	35
4	Material und Methode .....	36
4.1	Auswahl der Zähne und vorbereitende Maßnahmen.....	36
4.2	Präparation der Zähne .....	36
4.3	Insertion der medizinischen Einlage.....	37
4.4	Micro-CT.....	37
4.5	Einteilung der Proben anhand der Wurzelkanalanatomie.....	39
4.6	Versuchsgruppen.....	41
4.7	Auswertung.....	44
4.7.1	Statistische Auswertung.....	44
5	Ergebnisse.....	45
5.1	Reinigungswirkung der Methoden.....	45
5.2	Reinigungsergebnis in Abhängigkeit von der Form der Wurzelkanäle.....	48
5.3	Reinigungsergebnis beider Methoden in Abhängigkeit von der Form des Wurzelkanals.....	50
6	Diskussion .....	52
6.1	Diskussion der Methode .....	52
6.1.1	Gruppeneinteilung .....	52
6.1.2	Methode der Entfernung von Kalziumhydroxid.....	53
6.1.3	Berechnung des verbliebenen Volumens des Wurzelkanalmedikaments.....	54
6.2	Diskussion der Ergebnisse.....	56
6.2.1	Reinigungswirkung der PUI .....	56
6.2.2	Reinigungswirkung der SAF.....	58

7	Schlussfolgerungen .....	61
8	Zusammenfassung .....	62
9	Anhang .....	63
9.1	Abbildungsverzeichnis .....	63
9.2	Tabellenverzeichnis .....	63
	Materialliste .....	64
10	Literaturverzeichnis .....	65

## 1 Einleitung

Eine Wurzelkanalbehandlung verfolgt das Ziel, einen Zahn mit entzündlich veränderter oder nekrotischer Pulpa als funktionsfähige Kaueinheit zu erhalten. Bakterien und deren Abbauprodukte spielen die entscheidende Rolle in der Entstehung pulpaler und in deren Folge entstehender periapikaler Erkrankungen (Ferraz et al. 2001).

Die Ziele der endodontischen Therapie sind deshalb auf die Eliminierung aller lebensfähigen Bakterien und deren Toxine sowie des gesamten nekrotischen und vitalen Pulpagewebe ausgerichtet (Bergenholtz und Spångberg 2004; Nair 2004).

Durch eine gründliche Reinigung des Wurzelkanalsystems wird versucht, die Entstehung periradikulärer Erkrankungen zu verhindern bzw. in den Fällen, in denen die Erkrankung schon besteht, Heilung zu fördern (Hülsmann et al. 2005).

Aufgrund der Komplexität der anatomischen Strukturen bleiben aber große Anteile der Wurzelkanaloberflächen von der mechanischen Instrumentierung unberührt (Peters et al. 2001) und es gelingt nicht, die Infektion des Wurzelkanals vollständig zu eliminieren (Byström und Sundqvist 1981; Peters 2004).

Der Einsatz antimikrobieller Substanzen in Form von Spüllösungen soll vor allem die Reinigung schwer instrumentierbarer Bereiche verbessern (Svec und Harrison 1977; Paqué et al. 2009). Studien belegen eine signifikante Keimzahlreduktion durch manuelle Instrumentierung und Spülung. Eine vollständige Elimination aller Bakterien aus dem Wurzelkanal ist allerdings nicht möglich (Byström und Sundqvist 1981).

Unterstützend eingebrachte medikamentöse Einlagen können zu einer weiteren Reduktion der Keimzahl beitragen (Rôças und Siqueira 2011) und den Zeitraum zwischen zwei Behandlungen überbrücken, wenn aus zeitlichen Gründen eine vollständige Präparation und Füllung in der ersten Sitzung nicht möglich ist. Mittel der Wahl ist hier Kalziumhydroxid, dessen Applikation in der Regel keine Probleme bereitet, dessen vollständige Entfernung jedoch eine größere Herausforderung darstellt (Kenee et al. 2006; Rödiger et al. 2011). Reste von Kalziumhydroxid an den Kanalwänden beeinträchtigen die Dichtigkeit der späteren Wurzelkanalfüllung (Çalt und Serper 1999a) und können ein Bakterienreservoir darstellen, von dem eine Reinfektion des Wurzelkanals ausgehen kann.

Es muss deshalb Aufgabe und Ziel der Forschung sein, neue und effektivere Methoden zu finden, die nach weitestmöglicher Keimreduktion durch chemomechanische Aufbereitung und medikamentöser Einlage auch deren vollständige Entfernung ermöglichen.

Bislang liegen nur einige wenige Studien vor, die sich mit der Bewertung der Effektivität von Methoden zur Entfernung von Kalziumhydroxid beschäftigen.

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, die Effektivität zweier Methoden zur Entfernung der medikamentösen Einlage Kalziumhydroxid aus geraden und ovalen Wurzelkanälen zu untersuchen.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Die Desinfektion des Endodonts

Bei der apikalen Parodontitis handelt es sich in den meisten Fällen um eine infektiöse Erkrankung, die durch im Wurzelkanal kolonisierende Mikroorganismen induziert wird (Siqueira und Rôças 2008). Die Keimzahl beträgt zwischen  $10^3$  und  $10^8$  koloniebildende Einheiten pro Milliliter Kanalinhalt (Colony Forming Units = CFU) und korreliert nachweislich mit dem Ausmaß der apikalen Knochendestruktion (Byström et al. 1987). Wie mikrobiologische Studien zeigten, dringen Bakterien und deren Abbauprodukte bis zu 40  $\mu\text{m}$  tief in die Dentintubuli ein (Mader et al. 1984) und sind zur Organisation in sogenannten Biofilmen fähig, welche ihnen eine höhere Resistenz gegenüber den Abwehrmechanismen des Wirts verschaffen und Schutz vor den durchgeführten Desinfektionsmaßnahmen bieten.

Die in Folge der Präparation zurückbleibende Schmierschicht (Torabinejad et al. 2002), bestehend aus organischen und anorganischen Bestandteilen, stellt eine Quelle für mögliche Reinfektionen des Endodonts dar (Hülsmann 2004). Außerdem kann diese *smear layer* aus Geweberesten, Dentinspänen, Bakterien und deren Abbauprodukten die Penetration der intrakanalären Medikation in die Tubuli verhindern, als auch die Dichtigkeit der späteren Wurzelkanalfüllung herabsetzen (Torabinejad et al. 2002).

Da die Persistenz von Mikroorganismen aufgrund einer ungenügenden Desinfektion im Rahmen der Primärbehandlung und in Revisionsfällen eng mit dem Scheitern einer Wurzelkanalbehandlung verknüpft ist (Nair et al. 1990), wird der Einsatz antibakterieller Agenzien in Form von Spüllösungen und Medikamenten, deren Wirkung möglichst auch innerhalb des Biofilms zum Tragen kommt und ein möglichst umfangreiches Spektrum an Mikroben umfasst, essentiell für den späteren Behandlungserfolg.

Zahlreiche Studien beschäftigten sich in den letzten Jahren mit der Effizienz der verschiedenen Desinfektionsverfahren. Es zeigte sich, dass mechanische Präparation und Spülung mit Kochsalz mehr als 90% der Bakterien mechanisch aus dem Wurzelkanal entfernen können (Siqueira et al. 1999). Die Präparation bis zu höheren Aufbereitungsgrößen reduziert die Anzahl verbleibender Mikroorganismen zusätzlich (Dalton et al. 1998). Dennoch ist die mechanische Präparation ohne effektive Spülung nicht in der Lage, ein ausreichendes Maß an Bakterienarmut zu realisieren (Ørstavik et al. 1991). Der Einsatz intrakanalär applizierter Medikamente kann zur zusätzlichen Desinfektion hilfreich sein (Byström et al. 1985) und Präparation, Spülung und medikamentöse Einlage können als ein Gesamtkonzept betrachtet werden (Hülsmann 2008). In einer molekularbiologischen *In-vivo*-Studie untersuchten Rôças und Siqueira (2011) den antibakteriellen Einfluss der

chemomechanischen Präparation und medikamentösen Einlage auf die Bakterienzahlen. Nach Präparation mit Nickel-Titan-Feilen und Spülung mit 2,5%igem NaOCl konnten in 46% der Proben keine Bakterien mehr nachgewiesen werden. Nach anschließender medikamentöser Einlage mit Kalziumhydroxid stieg der Wert auf 62,5%. Doch obwohl chemomechanische Präparation und intrakanaläre Medikation zu einer signifikanten Keimzahlreduktion beitrugen, konnte keine vollständige Elimination erreicht werden. Es wird deutlich, dass die Suche nach noch effektiveren Behandlungsstrategien vorangetrieben werden muss (Rôças und Siqueira 2011).

## 2.2 Die Wurzelkanalspülung

Der Einsatz antibakterieller und gewebeauflösender Substanzen ist von integraler Bedeutung für eine umfangreiche Desinfektion des Endodonts (Barthel et al. 2006). Unter Wurzelkanalspülungen versteht man die intrakanaläre Anwendung von Flüssigkeiten, die bei der chemomechanischen Aufbereitung verwendet werden, um vor allem die Reinigung schwer zugänglicher Bereiche zu unterstützen (Paqué et al. 2009). Die verwendeten Spüllösungen sollten die folgenden Ziele verfolgen und Charakteristika aufweisen (Hülsmann 1997, 2006; Zehnder 2006):

- Desinfektion des Endodonts durch Elimination von Mikroorganismen eines möglichst breiten Spektrums
- hohe Effektivität gegen Mikroorganismen in Biofilmen
- Auflösung vitalen und nekrotischen Pulpagewebes, insbesondere über die der mechanischen Instrumentation zugänglichen Bereiche hinaus
- Entfernung der Schmierschicht bzw. Verhinderung von deren Bildung
- Wirkung als Schmier- und Gleitmittel für die verwendeten Instrumente
- Dekontamination von Endotoxinen
- Mechanisches Ausspülen von Gewebetrümmern und Dentinspänen und damit Unterstützung der mechanischen Instrumentation
- Gute Gewebeverträglichkeit bei möglichst geringer Zytotoxizität (Spångberg und Langeland 1973).

Die Wurzelkanalspülung hat somit sowohl physikalische und chemische als auch biologische Funktionen (Hülsmann 2004). Keines der derzeit erhältlichen Spülmedien vermag es, allen genannten Anforderungen zu entsprechen. Um synergistische Effekte zu nutzen, erscheint eine Kombination verschiedener Agenzien nach heutigem Wissensstand sinnvoll (Hülsmann 2006). Hierbei muss eine gegenseitige nachteilige Beeinflussung ausgeschlossen werden.

## **2.2.1 Spüllösungen**

### **2.2.1.1 Natriumhypochlorit (NaOCl)**

Natriumhypochlorit ist eine farblose bis grünlich-gelbe Flüssigkeit mit leichtem Chlorgeruch und einem alkalischen pH-Wert im Bereich zwischen 10,7 und 12,2 (Hülsmann 1997, Zehnder 2006). Die Lösung ist instabil bei Licht- und Wärmezutritt und sollte deshalb kühl und in verschlossenen Behältern aufbewahrt werden.

In wässriger Lösung dissoziiert NaOCl in Natrium- ( $\text{Na}^+$ ) und Hypochloritionen ( $\text{ClO}^-$ ) und hypochlorige Säure ( $\text{HOCl}$ ), die mit Proteinen unter Bildung von Chloraminen reagieren. Die antibakterielle Wirkung des NaOCl resultiert aus dem folgenden Proteinerfall.

Natriumhypochlorit wird in der internationalen endodontischen Literatur als das Standardmedium zur Wurzelkanal desinfektion bezeichnet (Hülsmann 2008b).

Für den dentalen Gebrauch steht es in unterschiedlichen Konzentrationen zur Verfügung (0,5 bis 5,25%). Seine guten antibakteriellen Eigenschaften wurden in zahlreichen Studien belegt (Siqueira et al. 1997b; Berber et al. 2006; Siqueira et al. 2007; Nakamura et al. 2013, u.v.a.m.). Die Wirkung des NaOCl ist weniger von der verwendeten Konzentration abhängig (Berber et al. 2006), entscheidender ist die Menge des applizierten Spülvolumens (Hülsmann 2006). Außerdem muss bei der Verwendung zu hoher Konzentrationen beachtet werden, dass die Toxizität der Lösung mit steigender Konzentration zunimmt und die Mikrohärtigkeit (Sitzky-Goldberg et al. 2004) und elastischen Eigenschaften (Sim et al. 2001) des Dentins gleichzeitig abnehmen. Zudem kann es bei Kontakt zum periapikalen Gewebe im Falle von Überpressen der Spülflüssigkeit zu starken unerwünschten Nebenwirkungen kommen (Hülsmann und Hahn 2006). Die Verwendung von Natriumhypochlorit in gewebeschonenden, niedrigen Konzentrationen (bis 1%) wird daher empfohlen (Zehnder 2006).

Natriumhypochlorit ist die einzige Spülflüssigkeit, die in der Lage ist, sowohl nekrotisches als auch, in hohen Konzentrationen, vitales Pulpagewebe aufzulösen (Baumgartner und Cuenin 1992; Hülsmann 2006; Zehnder 2006). Diese Eigenschaft kann durch Vorbehandlung mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  noch verstärkt werden (Hasselgren et al. 1988), was eine kombinierte Anwendung

sinnvoll erscheinen lässt. Eine vollständige Entfernung der Schmierschicht ist mit einer NaOCl-Spülung nicht möglich. Unabhängig von der Konzentration bleiben Reste zurück (Baumgartner und Cuenin 1992), da nur die organischen, nicht aber die anorganischen Bestandteile durch die Spülflüssigkeit gelöst werden. Eine Erwärmung von Natriumhypochlorit führt zu einer verstärkten gewebeauflösenden Wirkung, die antibakterielle Wirkung nimmt nur geringfügig zu (Hülsmann 2006). Die Effektivität der Spülflüssigkeit zur Entfernung der medikamentösen Einlage Kalziumhydroxid wird in der Literatur als unzureichend beschrieben (Kenee et al. 2006; Salgado et al. 2009, s. auch 2.4.1.4.).

## **2.2.2 Spültechniken**

Die Applikation der Spülflüssigkeiten kann entweder konventionell, per Hand mittels Einmalspritze und unterschiedlichen Kanülen erfolgen (Peters 2004) oder unter Verwendung adjuvanter Hilfsmittel zur Aktivierung der Spülflüssigkeiten mittels Schall und Ultraschall (Cunningham et al. 1982; Hülsmann 1997). Weitere neuartige Entwicklungen stellen Modifikationen mit Bürsten, die Anwendung von Laser und Ozon und Saug-Druck-Systeme wie RinsEndo® (Hülsmann 2006) dar, welche aber nicht Gegenstand dieser Arbeit sein sollen.

Generell wird eine umso intensivere Spülung nötig, je stärker der Wurzelkanal bakteriell kontaminiert ist; das Volumen ist hier wichtiger als die Konzentration der verwendeten Spülflüssigkeit (Hülsmann 1997). Empfohlen werden die Anwendung von 2-5 ml Spülflüssigkeit nach jedem verwendeten Instrument sowie eine Abschlusspülung von 10-20 ml pro Wurzelkanal (Hülsmann 2001). Allgemein steigt die antimikrobielle Wirkung der Spüllösung mit der Applikationsmenge und -dauer, der Konzentration und Temperatur (Barthel et al. 2006).

### **2.2.2.1 Die manuelle Spülung**

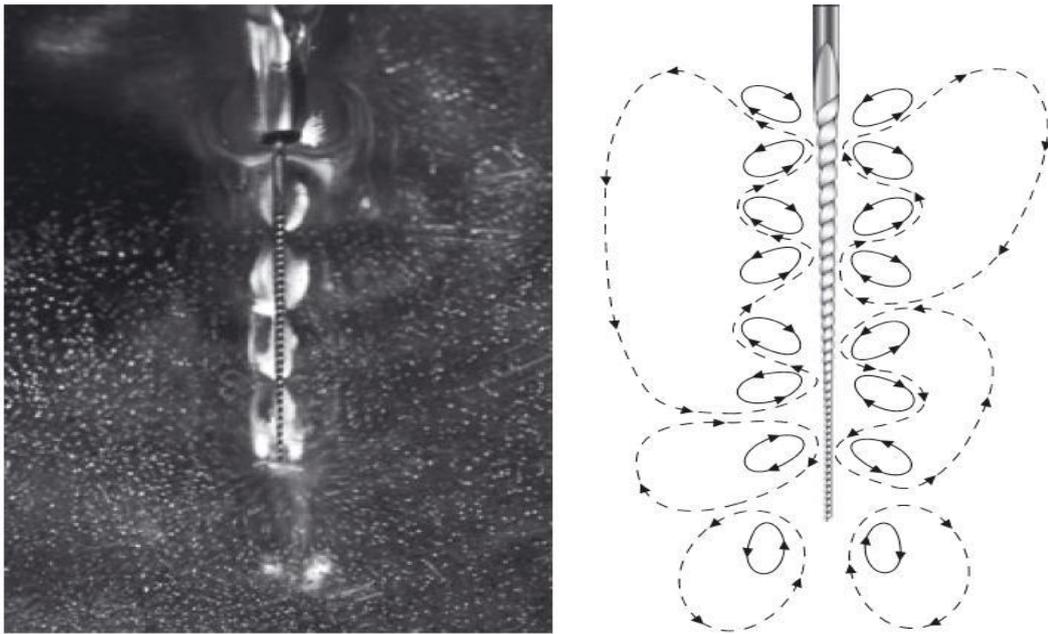
Bei der konventionellen Handspülung handelt es sich um die einfachste und älteste Methode, den Wurzelkanal zu spülen. Durch die Verwendung von Einmalspritzen und -kanülen ist sie zudem sehr kostengünstig. Es gibt zahlreiche Variationen bezüglich der Nadelgröße und Form. Der Nadeldurchmesser nimmt Einfluss auf Volumen und Fließrate der transportierten Spülflüssigkeit, sowie auf den induzierten Druck (Boutsioukis et al. 2007). Empfohlen wird die Anwendung einer konventionellen Injektionsnadel von dünnem Durchmesser (0,3 – 0,4 mm) (Hülsmann 2001). Da die Wirkung der Spülflüssigkeit nur wenige Millimeter über die Nadelspitze hinausreicht, sollte vorher genügend weit präpariert werden (ISO-Größen 35-40), um eine ausreichende Endringtiefe der Nadelspitze bis kurz vor die Arbeitslänge zu ermöglichen (Barthel et al. 2006; Hülsmann 2001). Studien konnten zeigen, dass auch die Konizität der Präparation Einfluss nimmt und die Reinigungswirkung bei konischerer Aufbereitung erhöht ist (Lee et al. 2004; van der Sluis et al. 2005). Bei

Verwendung einer Spülnadel mit größerem Durchmesser muss folglich eine weitere Präparation erfolgen als bei Verwendung einer dünnen Spülnadel. Nur so kann ein ausreichender Austausch von Spülflüssigkeit bis in die Apikalregion des Wurzelkanals gewährleistet und die Effektivität der Desinfektion erhöht werden. Eine Klemmwirkung sollte unbedingt vermieden werden, da sonst die Gefahr der apikalen Extrusion der Spüllösung besteht (Hülsmann 2001). Aus anatomischen Gründen kann es unmöglich sein, ein korrektes, friktionsfreies Einführen der Spülnadel bis kurz vor die festgelegte Arbeitslänge zu erreichen. Diese Situationen stellen sich zum Beispiel in stark gekrümmten oder stark flach-ovalen Kanälen dar. Die Spülung sollte langsam und drucklos erfolgen, ein Parameter, der nicht unwesentlich von der Erfahrung des Zahnarztes abhängt (Boutsioukis et al. 2007). Die Handspülung erscheint schwierig zu kontrollieren und zu standardisieren (Boutsioukis et al. 2007) und ist hinsichtlich der Reinigungswirkung anderen Verfahren unterlegen (Cunningham et al. 1982; Huque et al. 1998; Rödiger et al. 2010b).

### **2.2.2.2 Die Ultraschallspülung**

Durch Anwendung von Ultraschallsystemen wird versucht, die Effektivität und Wirkung der Wurzelkanalspülung zu erhöhen (Hülsmann 1997). Die verwendeten Apparaturen wandeln elektrische Energie durch Magnetostriktion oder Piezoelektrizität in Ultraschallwellen einer Frequenz von 20-40 Kilohertz um (van der Sluis et al. 2007b; Jiang et al. 2010). Die dadurch in Schwingung versetzte Feile überträgt die Energie auf Flüssigkeitspartikel in ihrer Umgebung.

Diese Strömungsphänomene konnten von Ahmad et al. (1987a, b) beobachtet und in eine anschauliche Darstellung übertragen werden.



**Abbildung 1: Acoustic streaming entlang der Feile als schematische (rechts) und bildliche Darstellung (links)**

(aus: van der Sluis et al. 2007b, S.418)

Der Terminus passive Ultraschallspülung (*passive ultrasonic irrigation* = PUI) bezeichnet eine Feilenführung ohne Bearbeitung der Kanalwände (van der Sluis et al. 2007b). Die Ultraschallspülung, kombiniert mit gleichzeitiger Instrumentierung der Kanalwand, wird heute aufgrund von Mängeln in der Arbeitssicherheit und der problematischen Formgebung speziell in gekrümmten Kanälen nicht mehr angewandt (Hülsmann und Hahn 2000). Die PUI wird mit einer dünnen Nadel durchgeführt, die frei im Wurzelkanal oszillierend (Walmsley 1987) ein energiereiches *acoustic microstreaming* induziert, welches ein charakteristisches Muster von Schwingungsknoten und -bäuchen der Spülflüssigkeit darstellt (van der Sluis et al. 2007). Die Bewegungsrichtung orientiert sich hierbei an den Schwingungsknoten und -tälern der Feile und verläuft vom apikalen Feilenende nach koronal (Hülsmann 1997). Auch der Flüssigkeitsaustausch verläuft in dieser Richtung (Ahmad et al. 1987b). Um eine freie Oszillation der Feile zu ermöglichen, sind auch das Maß und die Konizität der Kanalerweiterung von Bedeutung. Eine größere Konizität und ein größerer Aufbereitungsdurchmesser beeinflussen die Effektivität der Ultraschallspülung positiv (Lee et al. 2004a). Die größte transversale Schwingungsamplitude entsteht im Bereich der Instrumentenspitze (Hülsmann 1997), was in einer effizienten Reinigung der Apikalregion resultiert (Ahmad et al. 1987b). Durch das Strömungsprofil der Ultraschallspülung entsteht ein besserer und schnellerer Flüssigkeitsaustausch (Hülsmann 1997), der auch die

Apikalregion und schwer zugängliche Bereiche wie Isthmi, laterale Seitenkanäle und Extensionen ovaler Kanäle erreicht und somit die Reinigungs- und Desinfektionswirkung erhöhen kann (Hülsmann 2004). Studien konnten zeigen, dass Feilen mit geringerem Querschnitt (ISO-Größe 15) ein besseres Reinigungspotential besitzen als Feilen mit großem Querschnitt (ISO-Größe 25) (Ahmad et al. 1987b). Eine Erhöhung der Intensität korreliert linear mit der Schwingungsamplitude (Ahmad et al. 1988), aber nicht mit einer Effektivitätssteigerung der Reinigungswirkung (Ahmad et al. 1987b). Die Effektivität der Ultraschallspülung ist letztlich auch von der verwendeten Spüllösung abhängig (Huque et al. 1998). Natriumhypochlorit erwies sich als besonders geeignet in Kombination mit Ultraschallgeräten (Siqueira et al. 1997b). Durch die hochfrequenten Schwingungen werden ein Temperaturanstieg der Spülflüssigkeit und damit auch eine erhöhte antibakterielle Wirksamkeit erreicht (Hülsmann 1997, 2001, 2004). Dieses Ergebnis konnte Ahmad (1990) nicht bestätigen. Er stellte nur einen geringen Temperaturanstieg der Spülflüssigkeit fest, der keinen signifikanten Einfluss auf die Effektivität der Ultraschallspülung nahm.

### **2.3 Bewertung der Ultraschallspülung in der Literatur**

Hinsichtlich der Reinigungswirkung erreicht die PUI in kombinierter Anwendung mit NaOCl gute Resultate (van der Sluis et al. 2007b). Bakterienzahlen werden signifikant reduziert und die Ultraschallspülung erreicht hier signifikant bessere Ergebnisse im Vergleich zur konventionellen Handspülung (Sjögren und Sundqvist 1987; Spoleti et al. 2003). Auch Cunningham et al. (1982) fanden in einer mikroskopischen Betrachtung signifikant sauberere Kanäle nach Ultraschallanwendung im Vergleich zum konventionellen Handspülen. Dieses Ergebnis konnten Siqueira et al. (1997b) allerdings nicht bestätigen. In einer vergleichenden Untersuchung von Rödiger et al. (2010b) erwies sich Ultraschall auch im Vergleich zum Spülsystem Rins Endo® überlegen in der Entfernung von Debris aus künstlich simulierten Unebenheiten in der Kanalwand. Damit erscheint die passive Ultraschallspülung in der Lage, auch die der manuellen Instrumentation schwer zugänglichen Bereiche zu reinigen, wie z.B. Isthmi oder die Apikalregion (Svec und Harrison JW 1977; Gutarts et al. 2005) und als eine sinnvolle Ergänzung zur mechanischen Präparation (Paiva et al. 2012).

Die Schmierschicht konnte mit Ultraschall und NaOCl nicht vollständig entfernt werden, unabhängig von der Konzentration blieben Anteile auf allen instrumentierten Flächen zurück (Baumgartner und Cuenin 1992). Dennoch werden bessere Resultate als nach der Handspülung erzielt und eine geeignete Kombination von Spülflüssigkeiten, z.B. der zusätzliche Gebrauch von EDTA, kann das Ergebnis verbessern (Huque et al. 1998).

Die PUI ist ab einer NaOCl-Konzentration von 1% effektiv in der Entfernung von pulpaalem Restgewebe (Svec und Harrison JW 1977; Baumgartner und Cuenin 1992). Im Vergleich von

Schall- und Ultraschallspülung konnte auch ein Einfluss der Spülmethode festgestellt werden (Sabins et al. 2003), wobei sich die Ultraschallspülung als signifikant effektiver erwies. Dieses Ergebnis konnten Lumley et al. (1993) allerdings nicht bestätigen, sie stellten keinen signifikanten Unterschied zwischen den Methoden fest.

In der Entfernung von Kalziumhydroxid (siehe 2.4.1.4) werden mit Ultraschallanwendung signifikant bessere Ergebnisse erzielt im Vergleich zur Schallspülung (Wiseman et al. 2011) oder Handspülung (Kenee et al. 2006). Hier ist die Effektivität der Ultraschallspülung auch auf die Wirkung der verwendeten Spülflüssigkeit angewiesen und Natriumhypochlorit scheint den Effekt der PUI positiv zu unterstützen (van der Sluis et al. 2007a). Insgesamt ist es mit den derzeitigen Methoden schwierig, eine vollständige Entfernung der medikamentösen Einlage zu erreichen (Lambrianidis et al. 1999), eine Aktivierung der Spülflüssigkeit erscheint von Vorteil (Rödig et al. 2011).

## 2.4 Medikamentöse Einlagen

Das Ziel der endodontischen Behandlung ist die möglichst vollständige Entfernung aller lebensfähigen Mikroorganismen aus dem Wurzelkanalsystem.

Durch die Kombination aus Asepsis, chemomechanischer Präparation, antimikrobiellen Spülungen und intrakanalärer Medikation wird versucht, vorhandene Mikroorganismen und deren Abbauprodukte zu entfernen und eine Umgebung zu schaffen, in die keine neuen Mikroorganismen eindringen und überleben können. Je effektiver vorhandene Infektionen beseitigt und je besser das Auftreten neuer verhindert werden kann, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, die Behandlung erfolgreich abschließen zu können (Siqueira 2001; Siqueira und Lopes 2002). Durch den gezielten Einsatz der chemomechanischen Präparation in Kombination mit antibakteriellen Spüllösungen kann ein hohes Maß an Keimarmut erreicht werden (Siqueira et al. 2007). Allerdings ist es bislang mit keiner Aufbereitungsmethode und keinem Spülprotokoll möglich, eine vollständige Desinfektion zu erreichen (Sjögren und Sundqvist 1987; Hülsmann et al. 2005). Um zu einer weitergehenden Bakterienreduktion beizutragen, sind antibakterielle Substanzen in Form von medikamentösen Einlagen in den Wurzelkanal notwendig (Law und Messer 2004; Siqueira et al. 2007). Hierdurch können die Reinigungswirkung und die Desinfektionswirkung nochmals deutlich verbessert werden (Metzler und Montgomery 1989).

Athanassiadis et al. (2007) formulierten die Ziele der Medikamentenanwendung in Rahmen der endodontischen Behandlung wie folgt:

- Keimreduktion und Gewebeauflösung im Wurzelkanal
- Reduktion der periapikalen Entzündung und dadurch Reduktion von Schmerzen
- Stoppen apikaler Exsudation, wenn vorhanden
- Verhindern oder Aufhalten entzündlicher Wurzelresorptionen
- Verhindern der Reinfektion des Wurzelkanalsystems durch die Wirkung als sowohl chemische wie auch physikalische Barriere.

## 2.4.1 Kalziumhydroxid

### 2.4.1.1 Anwendung

Nach einer Umfrage von Itoh et al. (1999) ist Kalziumhydroxid das am häufigsten verwendete intrakanaläre Medikament, wesentlicher Teil der aseptischen und antiseptischen Behandlungsstrategie (Hülsmann 2006) und gilt als effektivste antimikrobielle Einlage (Siqueira und Lopes 1999; Law und Messer 2004).

Weitere Einsatzpunkte des Kalziumhydroxids in der Zahnerhaltung sind:

- zur direkten Überkappung oder Amputation der exponierten Pulpa (Attin und Hellweg 1993)
- zur Abdeckung nach Perforation des Wurzelkanals (Fuss und Trope 1996)
- Apexifikation nach Trauma, bei Zähnen mit nicht abgeschlossenem Wurzelwachstums (Frank 1966)
- Hartschichtbildung bei devitalen Zähnen (Heithersay 1970, 1975).

### 2.4.1.2 Chemie

Beim Erhitzen von Kalkstein auf 900-1200°C, bilden sich „ungelöschter Kalk“, Kalziumoxid und Wasser. Bei Zugabe von Wasser wird dieser „gelöscht“ und Kalziumhydroxid gebildet.

Kalziumhydroxid ist ein weißes, geruchloses Pulver mit der Summenformel  $\text{Ca(OH)}_2$  (Fava und Saunders 1999). Durch seinen pH-Wert zwischen 12,5 und 12,8 wirkt es als starke Base (Fava und Saunders 1999; Mohammadi und Dummer 2011). Im wässrigen Milieu ist Kalziumhydroxid zur Dissoziation fähig und setzt Kalzium- und Hydroxylionen an seine Umgebung frei (Estrela et al.1995a,b). Daraus resultiert seine stark antibakterielle und Hartgewebeinduzierende Wirkung. Die Ionenabgabe vollzieht sich nur langsam,  $\text{Ca(OH)}_2$  wird damit zum langsam wirkenden Antiseptikum (Siqueira und Lopes 1999) mit Depotwirkung. Durch die Unlöslichkeit in Säuren und die schlechte Löslichkeit in Wasser ist die Wahrscheinlichkeit der vorschnellen Löslichkeit durch den Kontakt zu Gewebeflüssigkeiten gering (Fava und Saunders 1999) und die zytotoxischen Effekte des Medikaments werden reduziert (Siqueira und Lopes 1999).

Die einfachste Methode, eine  $\text{Ca(OH)}_2$ -Paste herzustellen, besteht darin, das  $\text{Ca(OH)}_2$ -Pulver mit einer Flüssigkeit zu vermischen. Man erhält eine Paste, die anhand des verwendeten Trägerstoffes unterteilt werden kann in eine wässrige, visköse oder ölige Paste (Fava und Saunders 1999).

Die Art des Trägerstoffes bestimmt die Geschwindigkeit der Ionendissoziation und spielt somit eine wichtige Rolle im gesamten Desinfektionsprozess des periapikalen Gewebes und innerhalb des Wurzelkanals (Athanassiadis et al. 2007). So sollte in klinischen Situationen, die eine rasche Ionenfreisetzung bei Behandlungsbeginn erfordern, eine Kalziumhydroxidpaste mit einem wässrigen Trägerstoff verwendet werden (Fava und Saunders 1999). Eine graduelle und konstante Ionenfreisetzung wird durch den Gebrauch visköser Träger erreicht, ölige Pasten haben nur begrenzt klinische Bedeutung aufgrund ihrer sehr langsamen Ionenfreigabe (Fava und Saunders 1999). Allgemein gilt, dass mit abnehmender Viskosität, die Ionendissoziation zunimmt (Athanassiadis et al. 2007). Zusatzstoffe verbessern physikalische und chemische Eigenschaften wie Konsistenz, Röntgensichtbarkeit, die antibakterielle Wirkung und die Fließeigenschaften (Fava und Saunders 1999).

Als positive biologische Eigenschaften des Kalziumhydroxids heben Athanassiadis et al. (2007) hervor:

- Gute Biokompatibilität (durch die geringe Löslichkeit in Wasser und das begrenzte Diffusionsvermögen)
- Unterstützung der periapikalen Hartgewebsbildung
- Verhinderung von Wurzelresorptionen und Stimulierung der periapikalen Heilung nach Trauma.

#### **2.4.1.3 Wirkung**

Die Wirkungsweise des Kalziumhydroxids als Antiseptikum beruht auf der Abgabe von Hydroxyl- und Kalziumionen (Mohammadi und Dummer 2011), in deren Folge der Umgebungs-pH ansteigt und nach einer Woche Liegezeit ungefähr einen Wert von 9 erreicht (Siqueira und Lopes 2002). In einem solch alkalischen Milieu können viele Mikroorganismen nicht überleben (Athanassiadis 2007).

Allerdings wirkt dem pH-Anstieg durch Ionendissoziation die dem Dentin eigene Pufferwirkung entgegen (Calt und Serper 1999). Protonendonatoren ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) in der wässrigen Hülle des Hydroxylapatits lassen den pH -Wert in gewissen Umfang unverändert (Çalt et al. 1999). Die Hydroxylionen des Kalziumhydroxids müssen folglich in ausreichend hohen Konzentrationen in die Dentintubuli penetrieren, um dort effektiv gegen die vorhandenen Mikroorganismen wirken zu können und die Diffusionsrate muss die der Pufferwirkung des Dentins übertreffen (Siqueira und Lopes 1999).

Dennoch ist die antibakterielle Wirksamkeit des Kalziumhydroxids durch In-vitro- (Byström et al. 1985, Athanassiadis et al. 2010) und In-vivo-Studien (Siqueira et al. 2007) gut belegt.

Nach Siqueira und Lopes (1999) resultiert die tödliche Wirkung auf Bakterienzellen aus chemischen und physikalischen Mechanismen:

Chemisch:

- Zerstörung der bakteriellen Zellmembran
- Protein- und Enzymdenaturierung und damit Zerstörung des zellulären Stoffwechsels
- Verhinderung der Replikation durch Zerschneiden der DNA

Physikalisch:

- physikalische Barriere, die den Raum innerhalb des Wurzelkanals ausfüllt und den Eintritt von Bakterien in das Wurzelkanalsystems verhindert
- Abtöten der verbliebenen Mikroorganismen durch Fernhalten der Substrate für Wachstum und Eingrenzen des Raumes für ihre Vermehrung.

Allerdings sind Bakterien, die in den Dentintubuli sitzen, besser geschützt vor den Abwehrmechanismen des Wirts, den Antibiotika und der chemomechanischen Präparation und schaffen sich ein Reservoir, von dem aus der Wurzelkanal und umgebende Gewebe infiziert und reinfiziert werden können (Athanasiadis 2007). Solche verbliebenen Mikroorganismen sind meist mit dem Scheitern einer Wurzelkanalbehandlung assoziiert (Siqueira 2001) und machen Behandlungsstrategien notwendig, die auf die Eliminierung der Infektion der Tubuli abzielen. Dies erfordert die Anwendung von Medikamenten, die in die Tubuli penetrieren und dort Bakterien abtöten können (Siqueira und Lopes 1999).

Nach Athanasiadis ist die besondere Effektivität des Kalziumhydroxids durch seine Struktur bedingt, welche es ermöglicht, in Ionenform in Biofilme zu penetrieren. Dadurch unterscheidet es sich von anderen Antibiotika komplexerer Molekülstruktur (Athanasiadis 2010). Kalziumhydroxid ist in der Lage, Gewebe aufzulösen (Andersen et al. 1992, Yang et al. 1995). Außerdem zeigten Türkün und Cengiz (1997) in einer In-vitro-Studie, dass nach Vorbehandlung mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nekrotisches Gewebe besser löslich in NaOCl wird. Somit ist die kombinierte Anwendung von medikamentöser  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Einlage und anschließender Entfernung mit NaOCl in Bezug auf die gewebeauflösende Wirkung sinnvoll (Hasselgren et al. 1988).

#### 2.4.1.4 Entfernung

Vor der definitiven Füllung des Wurzelkanalsystems sollte eine möglichst vollständige Entfernung der medikamentösen Einlage angestrebt werden.

Trotz der Entwicklung immer neuer Spülprotokolle und Entfernungsmethoden (Lambrianidis et al. 1999; Kenee et al. 2006; Nandini et al. 2006; Rödiger et al. 2010) ist die Reinigung meist nur unvollständig möglich (Margelos et al. 1997; Lambrianidis et al. 1999, 2006). Besonders in den Kanalwandbezirken, die nur schwer von Spülmedien und Instrumenten erreicht werden (Wu et al. 2003), verbleiben Reste von Kalziumhydroxid, die bis zu 45% der Kanaloberflächen bedecken können (Lambrianidis et al. 1999). Verbleiben Reste der medikamentösen Einlage am Kanalwanddentin, kann dies das Füllmaterial und die Adhärenz des Sealers negativ beeinflussen (Rödiger und Hülsmann 2010). Als Folge für die Qualität der anschließenden Wurzelkanalfüllung wird die unzureichende Penetration des Sealers in die Dentintubuli beschrieben (Çalt et al. 1999). Reste von Kalziumhydroxid im Wurzelkanal verlängern die Verarbeitungszeiten von Zinkoxid basierten Wurzelkanalzementen (Athanasias et al. 2007), die Konsistenz und Qualität des Sealers wird verschlechtert (Margelos et al. 1997) und kann so die Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllung kompromittieren (Rödiger und Hülsmann 2006).

Eine geläufige Methode zur Entfernung der medikamentösen Einlage ist die Bearbeitung des Wurzelkanals mit einem auf Arbeitslänge eingebrachten Wurzelkanalinstrument, das eine Größe stärker ist als das zuletzt verwendete Instrument, in Kombination mit ausreichender Anwendung verschiedener Spüllösungen (Ricucci und Langeland 1997; Lambrianidis et al. 2006; Rödiger et al. 2010c). Nach Goldberg et al. (2004) könne diese Methode, die in der Erweiterung des Wurzelkanals um eine ISO-Größe resultiert, in geraden Kanälen akzeptiert werden, erhöhe aber in gekrümmten Kanälen die Wahrscheinlichkeit von Kanalbegradigungen signifikant.

Unterschiedliche Spülflüssigkeiten, darunter Kochsalz, Natriumhypochlorit und Chelatverbindungen wie EDTA und Zitronensäure wurden in ihrer Wirkung untersucht und miteinander verglichen. Die alleinige Anwendung von Natriumhypochlorit als Spüllösung wurde allgemein als unzureichend bewertet (Kenee et al 2006; Salgado et al. 2009). In einer Studie von Rödiger et al. (2010c) wurden bei Anwendung der Chelatoren EDTA und Zitronensäure signifikant bessere Ergebnisse erreicht als bei der Spülung mit NaOCl. NaOCl zeigte hier auch in Kombination mit den Chelatoren keine verbesserten Ergebnisse.

Diese Ergebnisse decken sich mit denen von Melo da Silva et al. (2011), die zusätzlich zu den oben genannten Chelatverbindungen auch Phosphorsäure in ihrer Reinigungswirkung

untersuchten und auch hier bessere Ergebnisse erhielten als bei NaOCl-Anwendung. Reste von Kalziumhydroxid blieben jedoch in allen Studien zurück.

EDTA soll Komplexe mit den Resten von Kalziumhydroxid bilden und zu dessen Neutralisation führen, sodass eine Entfernung mit NaOCl besser möglich wird (Margelos et al. 1997) bzw. mit EDTA vollständig erreicht wird (Çalt et al. 1999). In anderen Studien konnte der synergistische Effekt von EDTA und NaOCl aber nicht bestätigt werden (Lambrianidis et al. 1999; Kenee et al. 2006). Kaja et al. (Kaja et al. 2011) untersuchten, ob Volumen und Applikationszeit des verwendeten EDTAs Einfluss nehmen, konnten dies allerdings nicht bestätigen.

Auch die Zusammensetzung der Einlage nimmt Einfluss auf die Entfernbarkeit (Lambrianidis et al. 1999, 2006). Hier sind visköse und ölige Medien schwieriger zu entfernen als wässrige Trägerstoffe (Fava und Saunders 1999; Nandini et al. 2006). Dies konnten Rödiger et al. (2010c) allerdings nicht bestätigen.

Insgesamt ist der alleinige Einsatz von Spüllösungen als unzureichend effektiv in der Entfernung von Kalziumhydroxid zu bewerten und zusätzliche Maßnahmen zur Entfernung sind notwendig.

Durch wiederholte Aktivierung und Durchmischung der Spülflüssigkeit wird versucht, die medikamentöse Einlage besser zu entfernen. Eine Aktivierung der Spülflüssigkeit kann durch manuelle Bewegung einer hand- oder maschinell betriebenen Feile erreicht werden, oder durch Spülgeräte, die Schall- oder Ultraschall auf das Spülmedium übertragen.

Der Einfluss der durch Schall aktivierten Spülung wurde von Claessens et al. (2011) untersucht. Sie konnten allerdings keine Unterschiede in der Reinigungswirkung zwischen aktivierter und nicht aktivierter Spülung feststellen und vermuten, dass die Frequenz von 150 Hz zu niedrig sein könnte, um den gewünschten Effekt zu erzielen. Kenee et al. (2006) verglichen in einer *In-vitro*-Studie an 40 extrahierten Molaren vier verschiedene Methoden zur Entfernung eines  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Präparates: Spülung mit NaOCl (5,25%ig) + apikale Masterfeile (AMF), NaOCl + EDTA, NaOCl + rotierende AMF, NaOCl + passive Ultraschallspülung. Mit keiner der verwendeten Techniken konnte eine vollständige Entfernung des Medikaments erreicht werden. Allerdings wurden unter Verwendung eines rotierend eingesetzten Instruments oder der passiven Ultraschallspülung signifikant bessere Ergebnisse erreicht. Wiseman et al. (2011) untersuchten an 46 Unterkiefermolaren die Entfernung von Kalziumhydroxid und verglichen die PUI mit der Schallspülung. Bei Anwendung der passiven Ultraschallspülung erreichten sie keine vollständige Entfernung, kamen aber mit Ultraschall und rotierender Bearbeitung zu besseren Ergebnissen als mit Schallspülung.

Im Vergleich der Ultraschallanwendung mit NaOCl oder Wasser als Spülmedium schneidet NaOCl als Spülmedium besser ab, die Ultraschallspülung mit Wasser ist nur so effektiv wie die Handspülung mit NaOCl (van der Sluis et al. 2007a). Zu diesem Ergebnis kommen van der Sluis et al. (2007a), die die Entfernung von Kalziumhydroxid aus künstlichen Gruben im Kanalwanddentin untersuchten.

Keine signifikant überlegene Wirkung der passiven Ultraschallspülung beschreiben Balvedi et al. (2010) in ihrer vergleichenden Studie von passiver Ultraschallspülung und manueller Spültechnik.

Lambrianidis et al. (1999) konnten in ihrer Studie nach Anwendung verschiedener Spüllösungen und deren Aktivierung mit einer AMF feststellen, dass noch bis zu 45% der Kanalwand mit Kalziumhydroxid bedeckt sind. Die Medikamentenrückstände fanden sich vornehmlich in der Apikalregion und die Autoren empfehlen deshalb die Verwendung einer Patency-Feile zur gesonderten Reinigung des apikalen Kanaldrittels (Lambrianidis et al. 2006).

Insgesamt lässt sich der positive Effekt aktivierter Spülflüssigkeiten in der Literatur belegen. Allerdings war die komplette Entfernung des  $\text{Ca(OH)}_2$ -Präparates in der Regel nicht möglich.

Eine abschließende Bewertung des Einflusses von Spüllösungen und der rein mechanischen Wirkung ist anhand der derzeitigen Datenlage schwierig, da diese meist in Kombination angewendet werden.

## 2.5 Die Wurzelkanalpräparation

Die Reinigung und Formgebung des Wurzelkanals gehören zu den entscheidenden Schritten in der endodontischen Behandlung (Hülsmann et al. 2005).

Bei diesem, auch chemomechanische Präparation genannten Arbeitsschritt gilt es, den Wurzelkanal so gründlich wie möglich von vitalem und nekrotischem Pulpagewebe und Mikroorganismen zu befreien.

Dies gelingt durch chemomechanische Aufbereitungsmethoden, kombiniert mit geeigneten Spüllösungen und gegebenenfalls unter Anwendung antibakteriell wirksamer intrakanalärer Medikamente.

Für die Wurzelkanalpräparation werden folgende Ziele formuliert (Heidemann et al. 2005):

- Entfernung des vitalen und nekrotischen Pulpagewebes
- Weitestgehende Eliminierung von Mikroorganismen und, im Falle einer Pulpanekrose, auch des infizierten Kanalwanddentins

- Beibehaltung des ursprünglichen Kanalverlaufs durch gleichmäßigen zirkulären Materialabtrag ohne unnötige Schwächung der Wurzel
- konische Gestaltung des aufbereiteten Wurzelkanals, wobei der apikale Endpunkt die engste Stelle bilden und diese apikale Konstriktion erhalten werden soll
- Übereinstimmung der vorher festgelegten mit der endgültigen Arbeitslänge; sowohl Über- als auch Unterinstrumentierung sind zu vermeiden.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, mit Handfeilen, rotierend eingesetzten Feilensystemen, Ultraschall, Laser und weiteren Techniken die Wurzelkanalwand zu instrumentieren (Hülsmann et al. 2005). Jedoch erreicht kein Instrument und keine Instrumententechnik eine vollständige Säuberung des Wurzelkanalsystems (Hülsmann et al. 1997; Zmener et al. 2005). Der Anteil mechanisch bearbeiteter Kanalfläche ist gering, oftmals kleiner als 60% (Peters et al. 2001a). Dies gilt sowohl für die Instrumentation per Hand (Wu et al. 2003) als auch für die gewöhnlich verwendeten, rotierenden Aufbereitungssysteme (Barbizam et al. 2002; Peters et al. 2003; Paqué et al. 2009).

Unzureichend bearbeitete Flächen finden sich vor allem in der Apikalregion (Foschi et al. 2004) und in den bukkalen und lingualen Extensionen ovaler Wurzelkanäle (Rödig et al. 2002; Paqué et al. 2010). Nur in adäquat präparierten Wurzelkanälen mit sauberer, schmierschichtfreier Dentinoberfläche (s. 2.1) kann eine dichte Obturation und damit ein Schutz vor bakterieller (Re-)Kontamination erreicht werden (Nair 2004).

### **2.5.1 Die Präparation ovaler Wurzelkanäle**

Den Wurzelkanal kann man sich in seiner Gesamtheit keinesfalls als ein gerades Rohr vorstellen. Vielmehr zeigt sich ein komplexes anatomisches System mit zahlreichen Seitenkanälen, Verjüngungen, Divertikeln, Nischen und Verzweigungen (Davis et al. 1972). Der Querschnitt ist meist nicht rund, sondern eher oval oder flach und die Kanalwand nicht eben, sondern häufig rau und uneben aufgrund von Überhängen und Buchten im Dentin.

Wu et al. (2000) definieren die Form des Wurzelkanals anhand des Querschnitts:

Ein Wurzelkanal gilt nach ihren Definitionen

- als gering oval oder rund, wenn das Verhältnis von Länge zu Breite  $\leq 2$  beträgt
- als oval oder lang oval, wenn dieses Verhältnis  $> 2$ , aber  $\leq 4$  beträgt
- als flach bei einem Verhältnis von Länge zu Breite von  $> 4$ .

Ovale Wurzelkanäle liegen nach dieser Einteilung in etwa 25% aller Zähne vor (Wu et al. 2000) und machen eine vollständige Präparation und anschließende Füllung schwierig oder unmöglich (Wu und Wesselink 2001; Wu et al. 2003). Besonders in diesen gekrümmten, engen, flach-ovalen Wurzelkanälen ist eine vollständige Bearbeitung aller Kanalfächen erschwert (Siqueira et al. 1997a) und die Komplexität und Varianz des Kanalsystems müssen als die großen Hauptherausforderungen einer Wurzelkanalbehandlung betrachtet werden (Hülsmann et al. 2005).

Die gesamte innere Dentinschicht zu entfernen ist in ovalen Kanälen schwieriger als in runden (Wu und Wesselink 2001). Der Gebrauch von runden, rotierenden Instrumenten hinterlässt zu 65% eine Präparation, die der Form der verwendeten Instrumente entspricht und mesiale und distale Recessi uninstrumentiert hinterlässt (Wu und Wesselink 2001).

Durch den Gebrauch stärkerer Aufbereitungsgrößen wird versucht, einen höheren Anteil der Kanalwand mit den Instrumenten zu bearbeiten. Allerdings werden schmale Kanäle hierdurch oftmals zu stark geschwächt und die Gefahr der Kanalverlagerung (Wu et al. 2003) sowie von lateralen Perforationen ist erhöht (Wu et al. 2000).

Studien untersuchten den Einfluss verschiedener Handpräparationstechniken. Doch sowohl die zirkumferente Feilentechnik als auch die *Balanced-force*-Technik hinterließen große Anteile der Kanalwand uninstrumentiert (Wu und Wesselink 2001; Wu et al. 2003).

Der Gebrauch flexibler Nickel-Titan-Instrumente kann das Maß der Kanalverlagerung zwar reduzieren, diese aber nicht verhindern (Hülsmann et al. 2005). Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Nickel-Titan-Systemen ließen sich nicht feststellen (Rödig et al. 2002).

Paqué et al. (2010) schlagen vor, den ovalen Wurzelkanal als zwei getrennte bukkale und linguale Einheiten anzusehen und zu präparieren und so die gesamte instrumentierte Fläche zu erhöhen.

Einige Studien beschäftigten sich speziell mit der Effizienz der SAF (siehe 2.5.3.2) in ovalen Wurzelkanälen. Die Menge des durch die Instrumentation entfernten Pulpagewebes ist nach SAF-Präparation signifikant größer als nach Verwendung eines gewöhnlichen Nickel-Titan-Systems (De-Deus et al. 2011). In einer Studie von de Melo Ribeiro (2013) erlangte die SAF signifikant mehr Kontakt zu den Dentinwänden und entfernte mehr Debris als die Vergleichsgruppe mit herkömmlichen Nickel-Titan-Feilen.

## **2.5.2 Nickel-Titan-Feilen**

Nach Vorstellung der Nickel-Titan-Legierung und der Entwicklung erster Instrumente am Ende des letzten Jahrhunderts (Walia et al. 1988) spielen Nickel-Titan-Feilen heute eine wichtige Rolle im Praxisalltag. Das Material besitzt ein sehr geringes Elastizitätsmodul und

eine dadurch drei- bis viermal höhere elastische Flexibilität ('Superelastizität') im Vergleich zu Stahlfeilen (Walia et al. 1988). Hierdurch eignen sich aus dieser Legierung hergestellte Instrumente besonders zur Formgebung gekrümmter Wurzelkanäle (Walia et al. 1988; Gressmann und Hülsmann 2001).

Ein weiteres Merkmal ist ihr Formgedächtnis (Memory-Effekt), ein pseudoelastisches Verhalten, das dazu führt, dass die Feile nach Verformung ohne sichtbare Deformation wieder in ihre Ausgangsposition zurückkehrt. Diese Eigenschaft ermöglicht es dem Zahnarzt, auch gekrümmte Wurzelkanäle über die Krümmung hinaus zu instrumentieren, wobei von weniger Begradigungen des originären Kanalverlaufs, apikalen Zipps, Kanalverlagerungen und Perforationen berichtet wird (Esposito und Cunningham 1995; Himel et al. 1995). Zudem bedingt die hohe Flexibilität eine größere Resistenz gegenüber torsionsbedingten Frakturen, was die Bearbeitung gekrümmter und enger Kanäle weiter begünstigt (Walia et al. 1988). Studien sprechen von einer Zeitersparnis durch die Präparation mit Nickel-Titan-Feilen (Rangel et al. 2005), die auch dem ungeübten Anwender eine erfolgreiche Behandlung ermöglicht (Himel et al. 1995). Die Instrumente sind in unterschiedlichen Konizitäten zwischen 4-20% erhältlich und entsprechen damit meist nicht der ISO-Norm herkömmlicher Stahlinstrumente.

Nickel-Titan-Feilen werden überwiegend in der *Crown-down*-Technik benutzt. Das Anwendungsprotokoll der *Crown-down*-Technik sieht vor, zunächst große Konizitäten für die frühzeitige Bearbeitung des koronalen und mittleren Kanalabschnitts zu verwenden. Anschließend wird versucht, mit Instrumenten von kleinerem Querschnitt die vorher festgelegte Arbeitslänge zu erreichen. Abschließend werden wieder größere Konizitäten zur Erweiterung der Apikalregion verwendet.

Unter den verschiedenen Nickel-Titan-Feilen kommen Instrumente mit unterschiedlicher Querschnitts- und Schneidengeometrie vor. So weisen Feilen vom Typ FlexMaster (VDW, München) und ProTaper (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) einen Dreikantquerschnitt mit konvexen Außenflächen auf, wohingegen Instrumente des Light Speed-Systems (Max-Dental, Augsburg), GT-Rotary und ProFile (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) einen U-förmigen Querschnitt besitzen (Hülsmann 2008a).

Bei der Anwendung ist den Herstellerangaben bezüglich der Umdrehungsgeschwindigkeit, dem Drehmoment und der Benutzerhäufigkeit Folge zu leisten. Die Anwendung eines drehmomentbegrenzten Motors wird empfohlen.

Der Großteil der NiTi-Feilen besitzt nicht-schneidende, abgerundete Spitzen (Batt-Spitze) (Walia et al. 1988), wodurch eine bessere Zentrierung im Wurzelkanal erreicht werden soll und das Auftreten von Begradigungen im ursprünglichen Kanalverlauf reduziert wird.

### 2.5.2.1 FlexMaster-Instrumente

Bei den FlexMaster-Instrumenten (VDW) handelt es sich um ein rotierend arbeitendes Nickel-Titan-System.

Diese Feilen weisen eine nicht-schneidende Instrumentenspitze (Batt-Spitze) und einen dreiseitig konvexen Querschnitt auf (Hülsmann et al. 2005). Sie verfügen nicht über *radial lands*, seitliche Führungsflächen, wie zum Beispiel die LightSpeed-Instrumente (MaxDental, Augsburg), sondern Schneiden mit aktivem Schneidewinkel. Dadurch ist die Schneideleistung der Feile erhöht, die Arbeitssicherheit jedoch reduziert. Der dickere und stabilere Instrumentenkern, verglichen mit anderen NiTi Systemen, senkt das Frakturrisiko durch einen erhöhten Torsionswiderstand. Empfohlen wird die Anwendung unter Verwendung eines Drehmoment-begrenzten Motors (z.B EndoIT, VDW, München), Anwendung der *Crown-down*-Technik und konstanten Umdrehungszahlen von 150-300 Umin<sup>-1</sup>.

### 2.5.2.2 Bewertung der NiTi-Feilen zur Präparation von Wurzelkanälen

Durch kontinuierliche Weiterentwicklung in Design und Metallurgie bietet der Dentalmarkt heute ein großes Repertoire unterschiedlicher Feilensysteme (Hülsmann et al. 2005). In zahlreichen *In-vitro*-Versuchen wurden unterschiedliche NiTi-Instrumente bezüglich ihrer Reinigungswirkung und Formgebung, des nötigen Zeitaufwands und Auftretens prozeduraler Fehler untersucht und miteinander verglichen (Rödig et al. 2002; Versümer et al. 2002; Foschi et al. 2004; Rangel et al. 2005, u.v.a.m.). In einigen Studien wurde eine Überlegenheit der maschinellen gegenüber der manuellen Präparation hinsichtlich der Reinigungswirkung festgestellt (Hülsmann et al. 1997; Zmener et al. 2011). Andere Studien belegen die bessere Reinigungsfähigkeit der manuellen Instrumentation gegenüber der Motor-betriebenen Präparation (Mizrahi et al. 1975; Ahlquist et al. 2001; Barbizam et al. 2002).

Alle untersuchten Nickel-Titan-Systeme arbeiten effektiv in der Entfernung von Debris und *smear layer* (Siqueira et al. 1997a, Foschi et al. 2004). Eine vollständige Reinigung war allerdings mit keiner Methode möglich (Hülsmann et al. 1997; Barbizam et al. 2002; Torabinejad et al. 2002; Zmener et al. 2005). Vergleichende Untersuchungen verschiedener Nickel-Titan-Systeme ergaben keine signifikanten Unterschiede (Siqueira et al. 1997a; Peters et al. 2001a; Foschi et al. 2004).

Als problematisch zeigt sich auch bei Anwendung von Nickel-Titan-Feilen die vollständige Bearbeitung des apikalen Kanaldrittels (Foschi et al. 2004) sowie der bukkalen und lingualen Extensionen ovaler Wurzelkanäle (Rödig et al. 2002).

Bei der Präparation gekrümmter Wurzelkanäle zeigen sich die Nickel-Titan-Systeme den Handsystemen überlegen (Esposito und Cunningham 1995; Himel et al. 1995; Portenier et al. 1998; Pettiette et al. 2001). Bei ihrer Anwendung kommt es zu weniger und geringeren Kanalbegradigungen. Hierbei lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen NiTi-Feilen feststellen (Hülsmann et al. 2001; Ponti et al. 2002; Bürklein et al. 2012).

Insgesamt erwiesen sich NiTi-Feilensysteme als sicher in der Anwendung und konnten für den klinischen Gebrauch empfohlen werden (Versümer et al. 2002).

### 2.5.2.3 Die Self-Adjusting File (=SAF)

Um die Limitierungen der derzeitigen Präparationssysteme zu überwinden, wurde von Metzger und Mitarbeitern ein neues Konzept der Nickel-Titan-Feile vorgestellt (Metzger et al. 2010a): die Self Adjusting File (SAF).



**Abbildung 2: Fotografische Abbildung der SAF-Feile**

Die SAF (Abb. 2) ist eine hohle, kompressible Feile in der Form eines spitzen Zylinders. Sie ist aufgebaut aus einem dünnen, zylinderförmigen Nickel-Titan Netz, das sich dem Kanal dreidimensional anpassen kann und so den Querschnitt nur zirkulär vergrößert, aber in seiner Form unverändert lässt.

In einen durch eine Handfeile vorpräparierten Gleitpfad wird das Instrument durch kleine, 3 bis 5 mm große auf- und abwärts gerichtete Hubbewegungen in den Wurzelkanal eingeführt und es wird versucht, die vorher festgelegte Arbeitslänge zu erreichen. Die SAF wird mit einem speziellen Handstückkopf (RDT3, ReDent-Nova) betrieben, welcher eine Kombination aus Rotation und auf- und abwärts gerichteter Hubbewegung durchführt. Die Feile arbeitet mit 5000 Vibrationen pro Minute bei einer Amplitude von 0,4 mm. Durch die Kompression der Lamellen der Feile im Wurzelkanal entsteht eine nach außen gerichtete Kraft, da die Feile versucht, ihre ursprüngliche Dimension wieder anzunehmen. Durch diese zirkumferente Kraft, verbunden mit der leicht abrasiven Oberfläche des Titannetzes und der Eigenvibration des Handstücks, wird die Feile gegen die Wurzelkanalwände gepresst und erreicht so eine schrittweise und gleichmäßige Entfernung dünner Dentinschichten (Hof et al. 2010). Das

Fehlen eines starren Metallkerns führt zu einer erhöhten Biegsamkeit der Feile, die die Begradigung gekrümmter Kanäle verringern soll. Durch eine kontinuierliche Bereitstellung und Erneuerung von Spülflüssigkeit wird die Reinigungsfähigkeit erhöht. Eine spezielle Spülvorrichtung (VATEA, ReDent-Nova) wird direkt am Instrumentenkopf platziert und lässt die Flüssigkeit in voller Länge durch das hohle Innere in den Wurzelkanal eintreten. Die Spüllösung erfährt durch die Eigenvibration der Feile zusätzlich eine Aktivierung.

Außerdem verspricht der Hersteller eine hohe mechanische Haltbarkeit (Hof et al. 2010).

Das Anwendungsprotokoll der SAF empfiehlt einen 4-minütigen Gebrauch unter kontinuierlicher Zufuhr von Spüllösung, aufgeteilt in zwei Zyklen (Metzger et al. 2010a).

### **2.5.2.3.1 Bewertung des SAF-Systems**

Zahlreiche *In-vitro*-Studien beschäftigten sich in den letzten Jahren mit der Anwendung der SAF und untersuchten deren Fähigkeiten hinsichtlich der Reinigung, Desinfektion und Formgebung im Wurzelkanal und deren Einflüsse auf das Hartgewebe und die Füllung des Kanalsystems.

Es werden Vergleiche zwischen der SAF und der Handinstrumentierung (Lin et al. 2013) als auch zu anderen Nickel-Titan-Systemen (De-Deus et al. 2011) gezogen. Um eine qualitative Bewertung der Wurzelkanalpräparation geben zu können, bestimmten Untersucher den prozentualen Anteil, der von der Instrumentierung betroffenen Kanalflächen sowie Auftreten und Ausmaß von Veränderungen des originären Kanalverlaufs. Metzger et al. (2010b) kamen in ihrer dreidimensionalen Micro-CT-Studie zu dem Ergebnis, dass durch die SAF-Instrumentation signifikant mehr Flächen erreicht wurden (83%) als nach Anwendung der Nickel-Titan-Feile ProTaper (40%). Zu diesem Ergebnis kommen auch de Melo Ribeiro et al. (2013), in deren Untersuchung der Anteil instrumentierter Flächen auch in der Apikalregion ovaler Wurzelkanäle signifikant größer war als in der Vergleichsgruppe mit NiTi-Instrumenten. Außerdem konnten nach SAF-Anwendung im Vergleich zu anderen NiTi-Feilen weniger Fälle von Kanalverlagerungen festgestellt werden (Burroughs et al. 2012).

Beschädigungen der Kanalwand in Form von Dentinrissen traten bei Präparation mit SAF seltener auf (Hin et al. 2013), bzw. traten nach SAF und Handinstrumentation, im Gegensatz zu anderen rotierenden Systemen nicht auf (Yoldas et al. 2012).

Studien, die die Reinigungswirkung der SAF untersuchten, beschäftigten sich mit der Entfernung von pulpaalem Gewebe, von Debris und smear layer und mit der Reduktion der bakteriellen Besiedlung des Wurzelkanalsystems. Es zeigte sich die gute Fähigkeit der Feile, pulpales Gewebe aus ovalen Wurzelkanälen zu entfernen. Die SAF schnitt im Vergleich zu anderen rotierenden Nickel-Titan-Feilen besser ab (De-Deus et al. 2011; de Melo Ribeiro et

al. 2013). Auch Metzger et al. (2010c) bewerteten die Reinigungswirkung des SAF-Systems in Bezug auf die Entfernung von Debris und smear layer. Nach SAF-Anwendung für vier Minuten unter kontinuierlicher Zufuhr von Spüllösung (NaOCl und EDTA) erfolgte anhand von SEM-Bildern eine fünf-Punkte-Bewertung hinsichtlich des verbliebenen Materials. Die Auswertung ergab, dass die SAF-Anwendung in sauberen (100% frei von Debris) und meist smear-layer-freien Dentinflächen (100% koronal, 80% im mittleren und 65% im apikalen Kanaldrittel) resultierte. Dieses Ergebnis konnten de Melo Ribeiro et al. (2013) und Paranjpe et al. (2012) in ihren Studien bestätigen. Die SAF ließ signifikant weniger Debris zurück als die Instrumentierung mit ProTaper-Feilen.

Alves et al. (2011) beschäftigten sich mit der Fähigkeit der SAF zur Desinfektion des Wurzelkanals und stellten eine signifikante Reduktion der Bakterienzahlen fest.

Unabhängig von der verwendeten NaOCl-Konzentration wurden die eindrucksvollsten Ergebnisse nach sechs minütiger Feilenanwendung festgestellt. Um die Möglichkeiten der SAF auch in den erwähnten, schwer instrumentierbaren Regionen zu testen, gestalteten Lin et al. (2013) eine Studie, in der eine künstliche angelegte Kerbe Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Kanalwand demonstrierte. Die SAF konnte signifikant mehr Bakterien aus dieser Kerbe entfernen als die Handinstrumentation oder die Bearbeitung mit gewöhnlichen Nickel-Titan-Feilen und zeigte eine Überlegenheit in der Instrumentierung schwer zu erreichender Bereiche. Die SAF demonstrierte überlegene chemomechanische Fähigkeiten in der Instrumentation der Apikalregion (Siqueira et al. 2010) und zeigte überlegene Fähigkeiten in der Präparation ovaler Wurzelkanäle (siehe 2.5.1.). Burroughs et al. (2012) stellte bei SAF-Anwendung in S-förmigen Kanälen weniger Kanalbegradigungen fest als nach Anwendung anderer Nickel-Titan-Systeme (Typhoon, DS Dental und Vortex, ProFile, Dentsply).

Auch C-förmige (Solomonov et al. 2012a) und gekrümmte Wurzelkanäle (Yigit Özer et al. 2011) konnten mit der SAF effektiv bearbeitet werden. Mögliche Erklärungen für die Versuchsergebnisse sehen die Autoren in der Fähigkeit der SAF, sich an den Wurzelkanal anzupassen, sich in ihm auszudehnen (Yoldas et al. 2012; Ruckmann et al. 2013), in dem kontinuierlichen Transport frischer antibakterieller Spüllösung oder in einer Kombination dieser Erklärungen (Siqueira et al. 2010).

Außerdem sei der Querschnitt im Wurzelkanal nach SAF-Instrumentation nicht rund, wie nach Präparation mit den meisten Instrumenten (Hülsmann et al. 2001), sondern eher tropfenförmig, ähnlich der ursprünglichen Kanalform (Yoldas et al. 2012).

Eine isolierte Bewertung der einzelnen Faktoren ist mit der derzeit vorliegenden Literatur nicht möglich, vermutlich wirkt das System auch durch das Zusammenspiel besonders effizient (De-Deus et al. 2013).

Allerdings liegen auch Studien vor, die eine reduzierte Effizienz in Instrumentation und Reinigung der Apikalregion zeigen (Metzger et al. 2010c) bzw. die Überlegenheit der SAF nicht bestätigen können (Versiani et al. 2011). In einer Studie von Paranjpe et al. (2012) war SAF der ProTaper-Gruppe in der Reduktion der bakteriellen Besiedlung und von Debris unterlegen.

Mehrere Studien untersuchen die Entfernung von Wurzelfüllmaterial aus dem Wurzelkanal. Die Entfernung von Guttapercha war mit der SAF möglich, wenn auch nicht vollständig und ohne signifikanten Unterschied zur Effizienz der Nickel-Titan-Feile ProTaper (Solomonov et al. 2012b). Die zusätzliche SAF-Anwendung führte allerdings nach rotierender Instrumentation mit ProTaper zu einer signifikanten Reduktion von Füllungsresten und könnte als Ergänzung hilfreich sein (Abramovitz et al. 2012). Die besseren Reinigungsergebnisse spiegeln sich auch in der Qualität der späteren Füllung wieder. Die mit SAF instrumentierten Wurzelkanäle zeigen, im Vergleich zu den mit rotierenden ProTaper-Feilen aufbereiteten, eine bessere Adaption des Füllmaterials (Metzger et al. 2010b). Die signifikant höheren Haftwerte der Wurzelfüllung (De-Deus et al. 2013) werden mit der besseren Reinigungsfähigkeit der SAF begründet. Nur an sauberen Kanalwänden könne eine gute Adaption des Füllmaterials erfolgen.

Die versprochene hohe mechanische Qualität (Hof et al. 2010) konnte in Studien bestätigt werden, SAF erweist sich als sicher für den klinischen Gebrauch (Fermakis et al. 2013). Frakturen oder Perforationen treten nicht auf (Peters und Paqué 2011) und, wenn sie auftreten, beschränken sie sich meist auf Risse in der rauhen Seite des Titannetzes ohne Verlust von Metallfragmenten im Wurzelkanal (Fermakis et al. 2013). Bezüglich der Arbeitseffizienz erweisen sie sich als effektiv und sicher (Paqué und Peters 2011).

Neben zahlreichen *In-vitro*-Studien gibt es bislang wenige Untersuchungsergebnisse *in-vivo*, die sich auf den klinischen Gebrauch beziehen. Solomonov (2011) zieht nach Vorstellung von 50 behandelten Fällen innerhalb von acht Monaten ein positives Resümee in der SAF-Anwendung für die Reinigung und Formgebung ovaler und flach-ovaler Wurzelkanäle.

Derzeit liegt nur eine einzige *In-vitro-Studie* vor, die sich mit der Entfernung eines Kontrastmittels beschäftigt (Ruckmann et al. 2013). In einer zweidimensionalen, röntgenologischen Analyse arbeitete die SAF signifikant besser als Handfeilen und besser als die rotierende Feile ProFile. Im apikalen Segment hingegen waren keine Unterschiede zwischen den Techniken festzustellen und es zeigte sich die Unfähigkeit der Feile, sich im kritischen apikalen Segment auszudehnen. Die Untersucher weisen in ihrer Bewertung auf die noch ausstehende dreidimensionale Auswertung mittels Micro CT hin.

## 2.6 Das Micro-CT

Bei der Micro-Computertomographie handelt es sich um eine radiographische, zerstörungsfreie Methode zur Darstellung von Objekten kleiner Größe in drei Dimensionen und hoher Auflösung. Sie stellt eine Weiterentwicklung der Computertomographie dar, welche im medizinischen Bereich zur Diagnostik eingesetzt wird. Im Gegensatz zum medizinischen CT, bei dem der Patient bewegungslos liegt und Röntgenquelle und Detektor miteinander gekoppelt um ihn herum fahren, können bei der Untersuchung unbelebter Objekte, Röntgenquelle und Detektor fest positioniert bleiben und die zu untersuchende Probe wird isoliert gedreht.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde der General Electric Medical Systems microCT scanner Locus SP (Ontario, Kanada) benutzt.

Ein Micro-Computertomograph besteht aus einem Gehäuse, einer Konsole und der Kontrollbox. Das Gehäuse enthält die Röntgenröhre, den Objektträger und Detektor. Die Konsole besteht aus einem Computer und dem angeschlossenen Bildschirm.

Die Röntgenröhre bildet die eigentliche Quelle der Röntgenstrahlen, welche sich über Veränderungen der Stromstärke in ihrer Intensität und über die angelegte Spannung in ihrem Energiespektrum kontrollieren lassen. Beide Parameter Stromstärke und Spannung lassen sich über die Kontrollbox verändern und regulieren. Außerdem wird das CT über die Kontrollbox ein- und ausgeschaltet und die Temperatur des Detektors reguliert. Ein in den Strahlengang eingebauter Metallfilter kontrolliert das Energiespektrum der emittierenden Strahlung. Durch Absorption niedrig energetischer Röntgenstrahlen einer bestimmten Wellenlänge wird ein gleichmäßiges Strahlenbündel erzeugt. Über die Blende (Shutter) kann die Belichtungszeit, also der Zeitraum, in dem der Detektor von Röntgenstrahlen getroffen wird, verändert werden. Die zu scannenden Proben werden im rotationsfähigen Objektträger platziert. Durch Drehungen in  $0,1^\circ$ -Schritten werden Bilder mit einer Belichtungszeit von maximal 2 Sekunden erzeugt. Das letzte Element im Gehäuse bildet der Detektor, welcher den Szintillator und eine CCD-Kamera enthält. Der Szintillator besteht aus Cäsiumiodid, das bei Auftreffen von Röntgenstrahlen in Lichtsignale umgewandelt wird. Die über Fiberglasleitungen verbundene Kamera erfasst die Lumineszenzsignale. Alle erzeugten Bilder werden von der Konsole als Datensatz empfangen und rekonstruiert. Genauere Einstellungsparameter, die den Scan-Prozess betreffen, können hier reguliert werden.

Die verwendete Software, GE Healthcare (Ontario, Kanada), beinhaltet u.a. das 'X-Ray warm up' und das 'X-plore Scan Control-Programm'. Über das 'X-Ray warm up' wird die für das Gerät erforderliche Betriebstemperatur reguliert, über das 'X-plore Scan Control-Programm'

wird die Energieleistung der Röntgenstrahlen kontrolliert und Einstellungen bezüglich der verwendeten Stromstärke und Spannung sowie der Bildauflösung reguliert.

Vor dem eigentlichen Scan wird anhand eines Röntgenbildes das zu untersuchende Objekt in die korrekte Position zum Strahlenbündel gebracht. Eine Rekonstruktionsprogramm (Reconstruction Utility) fügt die erzeugten zweidimensionalen Bilder zu einem 3D-Bild zusammen.

Eine ebenfalls enthaltende Ansichtssoftware (Micro View) ermöglicht die Betrachtung der Schnittbilder in drei Ebenen. Außerdem können hier Detaildarstellungen und Volumenberechnungen durchgeführt sowie Histogramme und farblich markierte Ansichten erstellt werden.

Das Mikro-CT erreicht durch eine höhere Ortsauflösung von 5 bis 50  $\mu\text{m}$  (Feldkamp et al. 1989) eine besonders detaillierte Darstellung der zu untersuchenden Objekte. Ein konventionelles CT erreicht im Vergleich eine Auflösung von maximal 1 mm (Engelke et al. 1999).

Für eine höhere Auflösung und zur Reduktion der Fokusgröße verwendet ein Micro-CT Synchrotronstrahlungsquellen bzw. Fein- und Mikrofokusröhren mit Transmissions- oder Reflektionsanoden (Engelke et al. 1999). Durch die verringerte Fokusgröße wird allerdings auch die Röhrenleistung reduziert, da diese voneinander abhängig sind. Und da die Röhrenleistung die Intensität der Röntgenstrahlung bestimmt, wird über eine Verringerung der Fokusgröße auch die Intensität eines Scanvorgangs limitiert. So können in einem Micro-CT nur Objekte von begrenzter Größe gescannt werden, welche zudem lange Messzeiten im Minuten- bis Stundenbereich benötigen (Engelke et al. 1999). Außerdem entstehen große Datensätze, zwischen 270 und 2150 MB, deren Speicherung technisch anspruchsvoll ist (Engelke et al. 1999).

### **2.6.1 Die Micro-Computertomographie in der Endodontologie**

Durch die Möglichkeit, mittels Micro-CT non-invasiv dreidimensionale Darstellungen von hoher Auflösung zu erstellen, etablierte sich das Verfahren in den letzten Jahren zu einer beliebten Analysemethoden für *In-Vitro*-Studien mit endodontischer Fragestellung.

In einer Studie von Peters et al. (2000), die sich mit der Darstellung der Kanalanatomie von Oberkiefermolaren befasste, konnte die hohe Genauigkeit der Methode bestätigt werden. Gu L et al. (2009) untersuchten die Anatomie der Kanalthemen in mesialen Wurzeln von Unterkiefermolaren. Ihre Ergebnisse ermöglichten eine Einteilung in drei verschiedene Isthmentypen; den flossenartigen (*fin-shaped*), netzartigen (*web-shaped*) und bandförmigen (*ribbon-shaped*) Isthmus. Gu Y et al. (2010) führten anhand der erzeugten

Bilder im Micro-CT Messungen der Wurzelkanalkrümmung dreiwurzeliger Unterkiefermolaren durch.

Einige Studien beschäftigten sich mit der Bewertung der Wurzelkanalpräparation. Durch Bestimmung des Kanalvolumens und der Querschnittsform vor und nach der Präparation konnten Aussagen getroffen werden bzgl. der Effizienz der unterschiedlicher Nickel-Titan-Systeme im Hinblick auf die von der Instrumentation betroffenen Flächen (Peters et al. 2001, 2003), des Auftretens von Kanalverlagerungen (Peters et al. 2003) und -begradigungen (Peters et al. 2003), sowie der Reinigungseffizienz (Peters et al. 2010). Weitere Studien beschäftigten sich speziell mit der Präparation ovaler Kanäle (Paqué et al. 2010; Paqué und Peters 2011) und zeigten die Limitierungen der mechanischen Präparation in dieser Kanalform auf.

Außerdem wurde die Qualität und Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen anhand des Micro-CTs betrachtet (Jung et al. 2005; Hammad et al. 2009), sowie die Eignung und Effizienz verschiedener Revisionstechniken (Hammad et al. 2008; Roggendorf et al. 2010) geprüft.

Derzeit liegen in der Literatur nur wenige Micro-CT-Studien vor, die sich mit der Entfernung von Kalziumhydroxid beschäftigen. Wiseman et al. (2011) nutzten das Micro-CT, um die Effizienz von Schall- und Ultraschallspülung miteinander zu vergleichen. Ihre Ergebnisse bestätigten, dass eine vollständige Entfernung der medikamentösen Einlage schwierig ist und zeigten die Überlegenheit der ultraschallaktivierten Spülung. Kuga et al. (2010) verglichen zwei Nickel-Titan-Systeme (K3 Endo und ProTaper) in Kombination mit Spülung mit NaOCl und EDTA. Auch in dieser Studie wurde keine vollständige Entfernung des Medikaments erreicht. Beide Instrumententypen hinterließen Reste an  $\text{Ca(OH)}_2$ , speziell im apikalen und zervikalen Kanaldrittel und unabhängig von der verwendeten Spüllösung. ProTaper zeigte bessere Ergebnisse als die K3-Feilen.

### **2.6.1.1 Die Bewertung der SAF anhand des Micro-CTs**

In der Literatur liegen derzeit einige Studien vor, die sich speziell mit den Fähigkeiten der SAF beschäftigen. Metzger et al. (2010c) bewerteten die Reinigungsfähigkeit des SAF-Systems in Bezug auf die Entfernung von Debris und *smear layer*. Die Micro-CT-Analyse vor und nach der Präparation unter 4-minütiger SAF-Anwendung und kontinuierlicher Spülung mit NaOCl und EDTA zeigte saubere und meistens *smear layer* freie Dentinflächen in allen Teilen des Wurzelkanals.

Paqué und Peters (2011) bewerteten das Feilenpotential in lang-ovalen Wurzelkanälen anhand des Kanalvolumens und der instrumentierten Oberfläche. Beide Parameter wurden vor und nach der Präparation anhand des Micro-CTs bestimmt. Ihre Ergebnisse zeigten, dass mit SAF-Anwendung eine effektive und sichere Präparation in lang-ovalen

Wurzelkanälen möglich ist. Durch den höheren Anteil präparierter Kanalfächen konnte auch eine bessere Adaption des Wurzelkanalfüllmaterials erreicht werden (Peters und Paqué 2011).

Zudem konnte die dreidimensionale Datenanalyse die SAF-Präparation als zirkumferent und homogen bewerten (Peters und Paqué 2011).

### 3 Ziele der Studie

Ziel der vorliegenden *In-vitro*-Studie war es, zwei Methoden zur Entfernung der medikamentösen Einlage Kalziumhydroxid aus runden und ovalen Wurzelkanälen zu untersuchen und mit Hilfe des Micro-CT miteinander zu vergleichen. Es sollte eine Methode gefunden werden, welche das Wurzelkanalmedikament effektiv und sicher entfernen kann und somit für den klinischen Gebrauch geeignet ist.

Untersucht wurden:

- die passive Ultraschallspülung (PUI)
- die Nickel-Titan-Feile SAF.

## 4 Material und Methode

In der vorliegenden Studie wurden an 80 extrahierten menschlichen Zähnen zwei Methoden zur Entfernung der medikamentösen Einlage Kalziumhydroxid miteinander verglichen:

die Entfernung mit der piezoelektrischen Ultraschallspülung (Piezon Master 400, EMS, München) und mithilfe der Nickel-Titan-Feile SAF (ReDent Nova, Ra'anana, Israel).

Um die Effizienz der beiden Methoden miteinander vergleichen zu können, wurden nach Applikation der medikamentösen Einlage und nach deren Entfernung je ein Scan mit dem MicroCT (General Electric Medical Systems, Ontario, Kanada) von jedem Zahn erstellt. Durch den erstellten 3D-Datensatz konnte eine Volumenberechnung der vorhandenen Menge an medikamentöser Einlage erfolgen und die Werte nach Applikation konnten mit denen nach der Entfernung verglichen werden.

### 4.1 Auswahl der Zähne und vorbereitende Maßnahmen

Für die vorliegende Studie wurden 80 humane extrahierte Zähne gesammelt und zunächst in Wasser aufbewahrt.

Als Auswahlkriterien für die stets einwurzeligen Zähne (Prämolaren und Inzisivi) galten:

- ein unbeschädigter Apex
- keine bereits durchgeführte endodontische Behandlung
- keine Frakturen, Wurzelkaries oder größere Füllungen
- eine Kanallänge von mindestens 17 mm, sowie die apikale Durchgängigkeit der Wurzelkanäle für einen Reamer der ISO-Größe 10.

Zunächst wurden alle Zähne von äußerlichem Schmutz und Geweberesten befreit.

Anschließend wurden alle Zähne von koronal gekürzt, um eine einheitliche Arbeitslänge gewährleisten zu können. Die Gesamtlänge von 18 mm ergab eine Arbeitslänge von 17 mm, welche in allen folgenden Schritten standardisiert eingehalten wurde. Außerdem wurden die Proben mit einem wasserfesten Filzstift mit Zahlen von 1-80 nummeriert, um Verwechslungen auszuschließen.

### 4.2 Präparation der Zähne

Zunächst wurden die Zugangskavitäten mit hochtourig rotierenden diamantierten Instrumenten (Zylinder, ISO 10) unter Wasserkühlung präpariert. Dentinüberhänge wurden gegebenenfalls mit Rosenbohrer entfernt. Die Wurzelkanäle wurden sondiert, um deren

apikale Gängigkeit zu überprüfen. Mit Gates-Glidden-Bohrern der Größen II und III wurden die Wurzelkanaleingänge koronal erweitert. Die Arbeitslänge für den Gates-Bohrer der Größe III wurde auf 10 mm, diejenige für Gates-Bohrer der Größe II auf 12 mm festgelegt. Die Zähne wurden maschinell mit Hilfe des FlexMaster-Systems (VDW, München) bis zur Größe 40/.04 in der *Crown-Down*-Technik präpariert. Die definierte Arbeitslänge von 17 mm wurde markiert und die Feilen wurden, den Herstellerangaben entsprechend, nach achtmaligem Gebrauch ausgewechselt. Die Abfolge der Instrumentengrößen wurde zu Beginn festgelegt und erfolgte wie folgt: 40/.06, 30/.04, 30/.02, 20/.02, 25/.02, 30/.02, 35/.02, 40/.02, 30/.04, 40/.04.

Während der Präparation erfolgte eine Spülung mit 3%igem NaOCl. Es wurden 2 ml Spülflüssigkeit nach jedem Instrumentenwechsel mit einer 2 ml-Spritze und einer Nadel der Größe 30 (NaviTip 30 Gauge, Ultradent, München) appliziert. Durch die manuelle Spülung sollte eine gleichmäßige Spülmenge garantiert werden. Anschließend wurden die Wurzelkanäle mit Papierspitzen der ISO-Größe 30 getrocknet und bei 37°C und 100% Luftfeuchtigkeit in Kulturschalen aufbewahrt und gelagert.

### 4.3 Insertion der medizinischen Einlage

Die Insertion der medizinischen Einlage in Form einer Kalziumhydroxid-Paste (UltraCal XS, Ultradent Products Inc., South Jordan, UT, USA) erfolgte per Hand durch eine Injektionsnadel (Endo-Eze Tips, Ultradent Products, South Jordan, UT, USA) der ISO-Größe 30. Die durch einen Silikonstopper auf Arbeitslänge markierte Injektionsnadel wurde im Wurzelkanal platziert und das Kalziumhydroxid unter langsamem Herausziehen injiziert, um eine gleichmäßige und möglichst blasenfreie Applikation zu erreichen. Dieses Procedere wurde gegebenenfalls wiederholt und die Füllung durch ein Wattepellett (ca. 2 mm Durchmesser) von koronal verdichtet, um möglichst kliniknahe Verhältnisse zu schaffen.

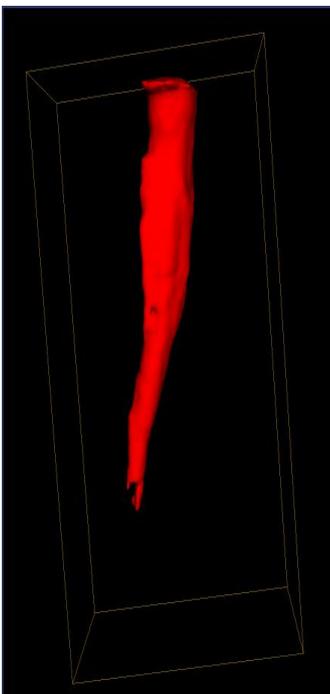
Anschließend wurden zwei exzentrische Röntgenaufnahmen (bukko-lingual und mesio-distal) aller Zähne angefertigt, um die Homogenität und Applikationstiefe des Röntgenkontrastes beurteilen zu können. Bei unzureichend homogener Füllung wurde die Einlage entfernt und der gesamte Applikationsvorgang wiederholt.

Die 80 zur Versuchsdurchführung vorbereiteten Zähne wurden für mindestens sieben Tage bei 37°C Lufttemperatur und 100% Luftfeuchtigkeit gelagert.

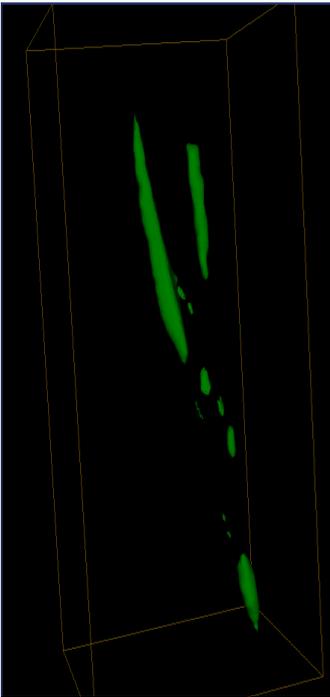
### 4.4 Micro-CT

In dieser *In-vitro*-Studie wurden Scans der Proben am Micro-CT (aXplore Locus SP Micro-CT, General Electric Medical Systems, Ontario, Kanada) am Max Planck Institut für Experimentelle Medizin in Göttingen erstellt.

In einem Durchlauf konnten vier Zähne gescannt werden. Hierzu wurden sie in einem speziellen Objektträger platziert und mittels Schaumstoffkügelchen in ihrer Position fixiert. Bei dem Objektträger handelt es sich um einen Tubus aus durchsichtigem Plastik, welcher in vier Kammern unterteilt ist. Somit kann jeder Zahn einer Kammer zugeordnet und später getrennt betrachtet werden. Die Einstellungen der Röhrenspannung von 90 kV und einem Röhrenstrom von 80  $\mu\text{A}$  wurden bei allen Durchläufen angewandt. Die nach Beendigung des Scanvorgangs erstellten Daten in Form eines Rohdatensatzes (MiniVol) konnten mit einer Software (MicoView, GE Healthcare) betrachtet werden. Durch Verschiebung der drei Achsen im Raum (x,y,z) wurde jeder Zahn einzeln in eine *region of interest* (ROI) platziert und so in eine dreidimensionale, hochauflösende Darstellung von 29  $\mu\text{m}$  rekonstruiert und gespeichert. Anschließend wurde von jeder Probe ein Grauwert histogramm erstellt, welches einen Kurvenverlauf zu den Graustufen von Luft, Zahnhartsubstanz und des eingebrachten Füllmaterials Kalziumhydroxid darstellt. Da die drei Medien alle eine unterschiedliche Dichte haben, ergibt sich für jedes ein anderer Kurvenverlauf. Durch Markierung der Graphenabschnitte, die dem zu betrachtenden Medium entsprechen, und durch die Option *highlight the selected region* wird das betrachtete Material farblich im Ansichtsbild dargestellt. Es erfolgte die isolierte Markierung, Anfärbung und schließlich Volumenberechnung des Graustufenwertes, der dem eingebrachten Kalziumhydroxid entspricht und eine quantitative Erfassung des Füllmaterials in  $\text{mm}^3$  für jeden Wurzelkanal (Abb. 3 und 4). Die Werte wurden berechnet und in Tabellen gespeichert.



**Abbildung 3: Dreidimensionale farbliche Darstellung der medikamentösen Einlage vor der Entfernung (rot)**



**Abbildung 4: Dreidimensionale farbliche Darstellung der zurückgebliebenen Anteile der medikamentösen Einlage nach der Entfernung (grün)**

#### **4.5 Einteilung der Proben anhand der Wurzelkanalanatomie**

Anhand der 3D-Datensätze wurde ein Schnittbild in achsialer Richtung auf Höhe von 5 mm vom Apex mit der GE-Healthcare Software erstellt. Diese eindimensionale fotografische Darstellung wurde mit Hilfe der Ansichtsoftware (Fiji) betrachtet. In diesen Schnittbildern wurden zwei aufeinander senkrecht stehende Diagonalen in das Kanallumen gezogen und deren Längen bestimmt. So konnten die Zähne anhand der von Wu et al. (2000) gegebenen Definition einer entweder runden oder ovalen Kanalform zugeteilt werden. Nach Wu et al. (2000) gilt ein Wurzelkanal als oval, wenn das Verhältnis von Länge zu Breite größer oder gleich 2, aber kleiner 4 ist. Bei einem Verhältnis größer oder gleich 4 gilt der Kanal als flach-oval, bei einem Verhältnis kleiner gleich 2 als rund.

Es ergab sich eine Aufteilung in zunächst zwei Gruppen, 20 Zähne mit ovaler Kanalmorphologie und 60 Zähne mit runder Kanalmorphologie. Weiter wurde innerhalb dieser zwei Gruppen eine Aufteilung vorgenommen, welche sich auf die anschließende Entfernung der medikamentösen Einlage bezog. Innerhalb der Gruppe mit ovalem Wurzelkanal (n=20) wurden zehn Zähne der Entfernung mit Ultraschall, die übrigen zehn Zähne der Anwendung der SAF zugeordnet. Innerhalb der Gruppe mit runder Kanalmorphologie (n=60) wurden je 30 Zähne der Ultraschallgruppe und 30 der SAF zugeteilt. So ergaben sich vier Gruppen:

1. ovaler Wurzelkanal, Anwendung der SAF(n=10)
2. ovaler Wurzelkanal, Anwendung von Ultraschall (n=10)
3. runder Wurzelkanal, Anwendung der SAF (n=30)
4. runder Wurzelkanal, Anwendung von Ultraschall (n=30)

## 4.6 Versuchsgruppen

Im Folgenden werden die vier Gruppen mit dem zugehörigen Versuchsprotokoll dargestellt.

### 1. Gruppe: *Self-Adjusting File*

*10 Zähne (ovaler Wurzelkanal)*

#### Versuchsprotokoll

##### 1. Vorbereitung des Gerätes

Aufbau des Motors (Micro Nx) und Anschluss des Netzwerksteckers

Einstellen des Motors auf  $5000 \text{ Umin}^{-1}$  und eine Amplitude von 0,4 mm

##### 2. Anschluss der separaten Spülvorrichtung (Vatea, ReDentNova)

und Befüllen des Spülflüssigkeitsbehälters mit 3%igem NaOCl

Einstellen einer Durchflussrate von 5 ml/min

##### 3. Aufsetzen des Winkelstückkopfes (ReDent Nova) auf ein Winkelstück

(Kavo GENTLEpower, 1:1, KaVO, Biberach, Germany) kombiniert mit einem Kopf (3LDSY, KaVo, Biberach, Germany)

Einsetzen der SAF Feile (2,0 mm) in den Winkelstückkopf

##### 4. Einstellen der Feile auf eine Arbeitslänge von 17 mm

##### 5. Reinigung des Wurzelkanals über gleichmäßige Hub- und Senkbewegungen in vertikaler Richtung für 4 Minuten pro Kanal

##### 6. Auswechseln der Feilen nach Präparation eines Zahnes

Die Feilen wurden nach jedem Zyklus auf Beschädigungen untersucht. Im Falle von Rissen oder Frakturen des Nickel-Titan-Netzes, wurde zu einer neuen Feile gewechselt.

---

2. Gruppe: *Ultraschallgerät (EMS Piezon Master 400)*

*10 Zähne (ovaler Wurzelkanal)*

*Spülprotokoll*

1. Vorbereitung des Gerätes  
Einstellung ohne Befüllung des Spülflüssigkeitsbehälters
2. Einstellen auf eine Spültiefe von maximal 17mm
3. Vorbereitung von vier 5ml Spritzen mit NaOCl (3%)
4. Reinigung des Wurzelkanals über Hub- und Senkbewegungen von ca. 2-3 mm in vertikaler Richtung pro 30 sec-Zyklus
5. Spülung per Hand mit 2,5 ml NaOCl (3%) nach jedem 30 sec-Zyklus
6. Wiederholung von 8\*30sec-Zyklen

3. Gruppe: *Self-Adjusting File (SAF)*

*30 Zähne (runder Wurzelkanal)*

*Versuchsprotokoll*

1. Vorbereitung des Gerätes

Aufbau des Motors (Micro Nx) und Anschluss des Netzwerksteckers

Einstellen des Motors auf  $5000 \text{ Umin}^{-1}$  und einer Amplitude von 0,4 mm

2. Anschluss der separaten Spülvorrichtung (VATEA, ReDentNova)

und Befüllen des Spülflüssigkeitsbehälters mit 3%igem NaOCl

Einstellen einer Durchflussrate von 5 ml/min,

Anschluss des Silikonschlauches der Spülvorrichtung an die Feile

3. Aufsetzen des Winkelstückkopfes (ReDent Nova) auf ein Winkelstück

(Kavo GENTLEpower, 1:1, KaVO, Biberach, Germany) kombiniert mit einem Kopf (3LDSY, KaVo, Biberach, Germany)

Einsetzen der SAF Feile (2,0 mm) in den Winkelstückkopf

4. Einstellen der Feile auf eine Arbeitslänge von 17 mm

5. Reinigung des Wurzelkanals über gleichmäßige Hub- und Senkbewegungen in vertikaler Richtung für 4 Minuten pro Kanal

6. Auswechseln der Feile nach jedem Zahn

Die Feilen wurden nach jedem Zyklus auf Beschädigungen untersucht. Im Falle von Rissen oder Frakturen des Nickel-Titan-Netzes, wurde zu einer neuen Feile gewechselt.

4. Gruppe: *Ultraschallgerät (EMS Piezon Master 400)*

*30 Zähne (runder Wurzelkanal)*

*Spülprotokoll*

1. Vorbereitung des Gerätes
2. Einstellung ohne Befüllung des Spülflüssigkeitsbehälters
3. Einstellen auf eine Spültiefe von maximal 17 mm
4. Vorbereitung von vier 5 ml-Spritzen mit NaOCl (3%)
5. Reinigung des Wurzelkanals über Hub- und Senkbewegungen von ca. 2-3 mm in vertikaler Richtung pro 30 sec-Zyklus
6. Spülung per Hand mit 2,5 ml NaOCl (3%) nach jedem 30 sec-Zyklus
7. Wiederholung von 8\*30sec-Zyklen

## 4.7 Auswertung

Die Zähne wurden unter gleichen Bedingungen erneut gescannt. Das Volumen und der zurückbleibende Prozentsatz des zurückgebliebenen  $\text{Ca(OH)}^2$  im Wurzelkanal wurden bestimmt, um die Effektivität von US und SAF bewerten zu können.

### 4.7.1 Statistische Auswertung

Es erfolgte eine statistische Auswertung der Daten in der Abteilung für Medizinische Statistik der Universität Göttingen. Mit den Programmen Statistica 10.0 (StatSoft) und Microsoft Office Excel 2010 wurden Grafiken und Tabellen erstellt.

Für die deskriptive Auswertung wurden abhängig vom Outcome entweder Anzahl und Prozente oder Mittelwerte, Standardabweichungen bzw. Konfidenzintervalle angegeben. Mittelwertplots wurden zur graphischen Veranschaulichung angefertigt. Diese zeigen den Mittelwert und das zugehörige Konfidenzintervall. Die Whisker markieren das Minimum bzw. Maximum.

Um den Gebrauch parametrischer Verfahren zu rechtfertigen, wurden die Daten vorher mittels Q-Q Plots auf Normalverteilung geprüft. Im weiteren Verlauf kann so die Annahme der Normalverteilung vorausgesetzt werden.

Als primärer Endpunkt wurde der Quotient aus dem Volumen nach der Entfernung von Kalziumhydroxid zu dem Volumen vor der Entfernung gewählt. Dieser wird im Folgenden als Medikamentenrest in % bezeichnet. Um einen Mittelwertunterschied des Endpunktes in den Methoden, der Form und deren Wechselwirkung zu testen, wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. In dieser werden die Hypothesen „Es gibt keinen Unterschied der erwarteten Mittelwerte zwischen den Methoden“ (Haupteffekt Methode), „Es gibt keinen Unterschied der erwarteten Mittelwerte zwischen den Formen (Haupteffekt Form)“ und „Die erwarteten Mittelwerte der Methoden verhalten sich gleich in den Methoden“ (Wechselwirkung Methode\*Form) überprüft.

Für alle statistischen Tests wird ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  festgesetzt. Das bedeutet, ein p-Wert kleiner 0,05 deutet auf eine Ablehnung der Nullhypothese hin.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Reinigungswirkung der Methoden

Die Auswertung der microtomografischen Daten zeigt, dass die medikamentöse Einlage mit keiner der verwendeten Methoden vollständig entfernt werden konnte. Mit beiden Methoden blieben Reste zurück. Als primärer Endpunkt wurde der Quotient aus dem Volumen der Kalziumhydroxideinlage nach der Entfernung zu dem Volumen vor der Entfernung definiert. Im Folgenden wird dieser Quotient als Medikamentenrest benannt.

Die Tabelle 1 veranschaulicht die verbliebenen Reste an Wurzelkanalmedikament als Quotient des Volumens nach der Entfernung zu dem Volumen vor der Entfernung. Die Werte sind durch Mittelwerte mit den zugehörigen Standardabweichungen (SD) angegeben.

**Tabelle 1: Mittelwert und Standardabweichung der Medikamentenreste (in%), aufgetrennt nach den zwei Methoden. Der angegebene p-Wert resultiert aus der zweifaktoriellen ANOVA.**

Methoden	Anzahl	Mittelwert (SD)	p-Wert
SAF	40	0,15 (0,113)	0,002
US	40	0,27 (0,142)	

Die geringsten Medikamentenreste verblieben nach Anwendung der SAF, der Mittelwert beträgt in dieser Gruppe 0,15. Das bedeutet, dass die Präparation mit SAF ca. 85% der Kalziumhydroxideinlage entfernen konnte, ca. 15% verblieben im Kanal. Nach Gebrauch der Ultraschallspülung verblieben ca. 27 % der medikamentösen Einlage im Kanal, somit konnte auch die Ultraschallspülung ca. 73% der medikamentösen Einlage entfernen.

Beide Systeme erzielten gute Scorewerte und die Auswertung der Daten zeigt die Fähigkeit beider Systeme das Wurzelkanalmedikament zu entfernen.

Die Abbildungen 5 bis 8 zeigen dreidimensionale farbliche Darstellungen der Medikamentenreste jeweils vor (Abbildungen 5 und 7) und nach der Entfernung (Abbildungen 6 und 8). Bei den Abbildungen 5/6 und 7/8 handelt es sich jeweils um ein Probenpaar, wobei jeweils ein Probenpaar für die Ultraschallanwendung (Abb. 5/6) und eins für die Anwendung der SAF (Abb. 7/8) steht.

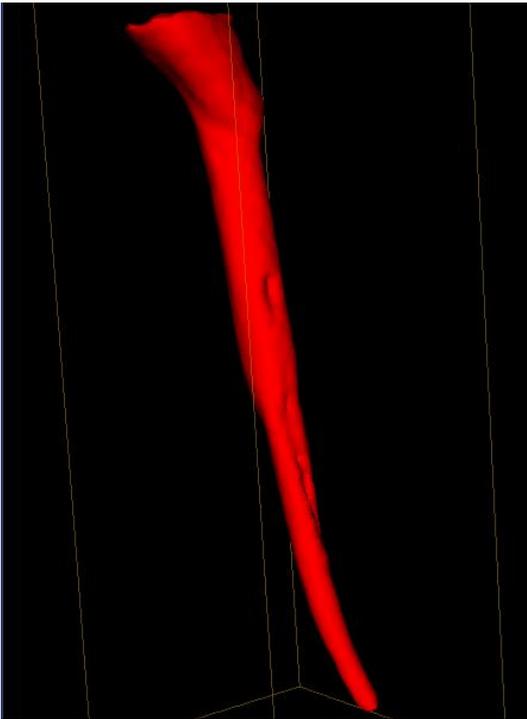


Abbildung 5: Farbliche Darstellung des Kalziumhydroxids vor der Entfernung (rot)

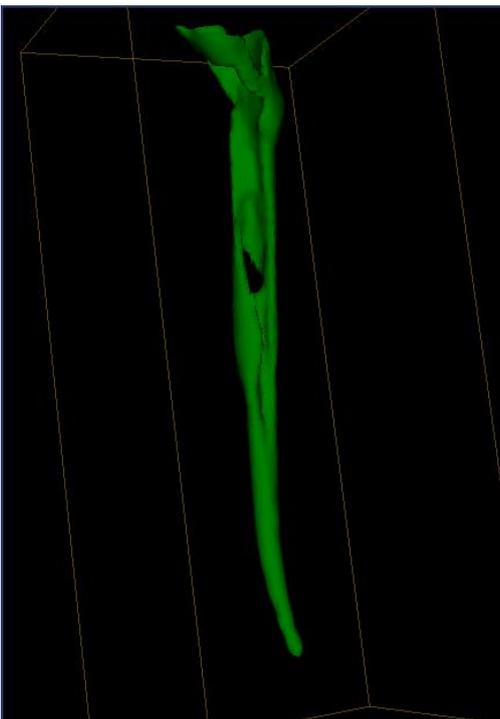


Abbildung 6: Farbliche Darstellung der Medikamentenreste nach der Entfernung (grün)

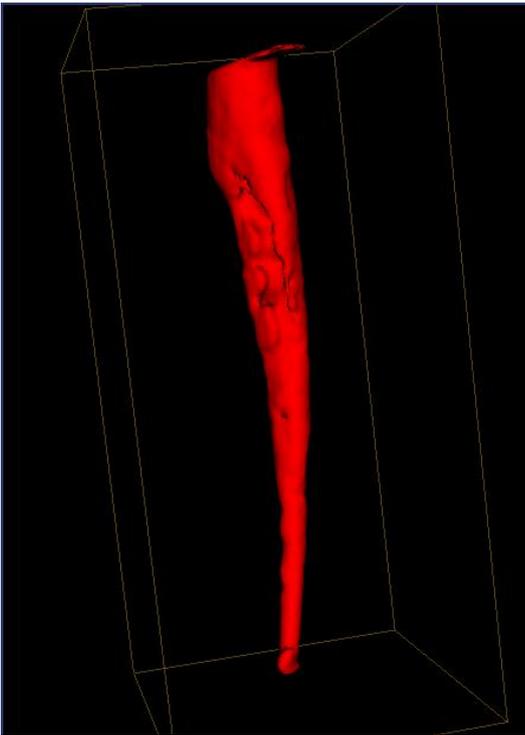


Abbildung 7: Farbliche Darstellung des Kalziumhydroxids vor der Entfernung (rot)

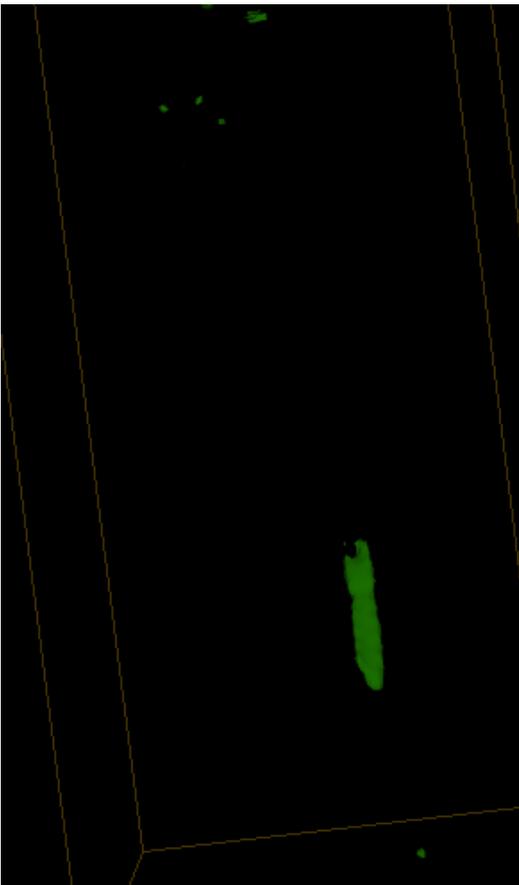
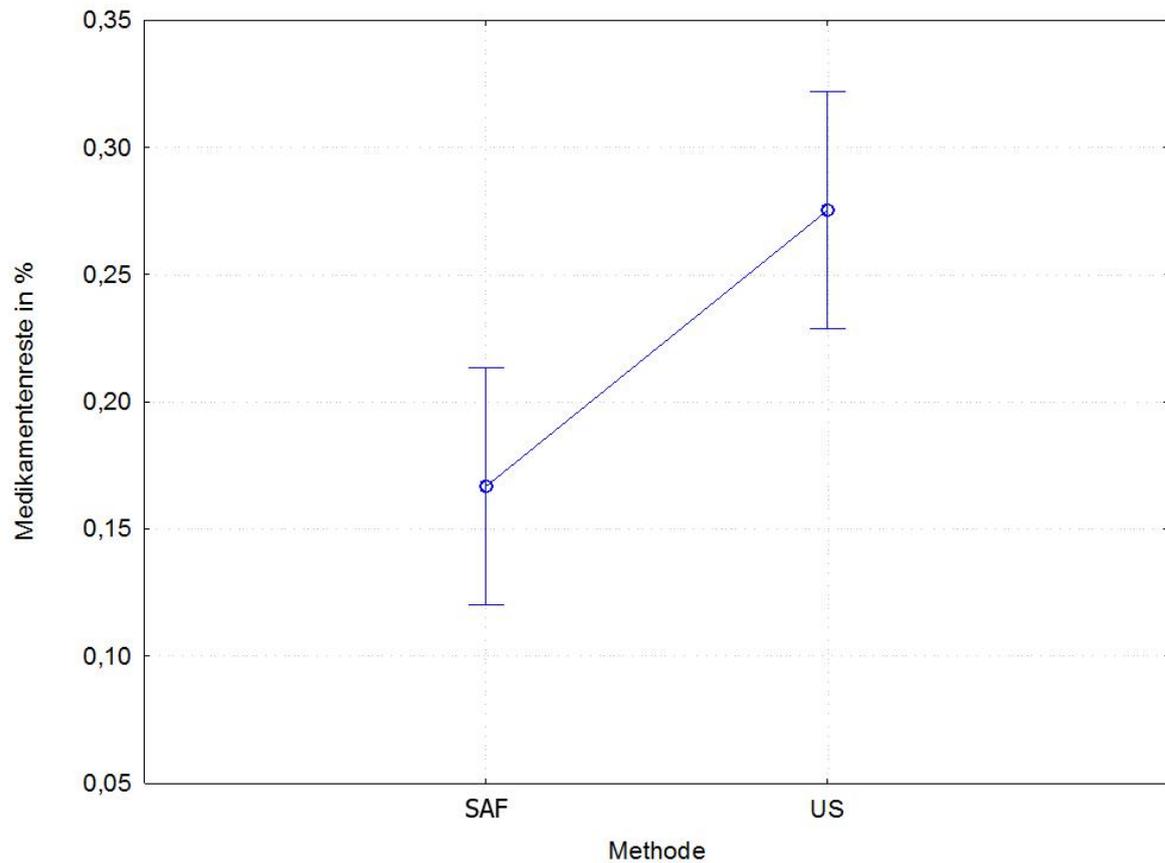


Abbildung 8: Farbliche Darstellung der Medikamentenreste nach der Entfernung (grün)

Im Vergleich der beiden Methoden untereinander zeigt sich jedoch eine signifikante Überlegenheit des SAF-Systems gegenüber der passiven Ultraschallspülung ( $p = 0,02$ , siehe Tabelle 1).

Die Abbildung 4 stellt die verbliebenen Medikamentenreste (in %) nach der Entfernung grafisch dar.



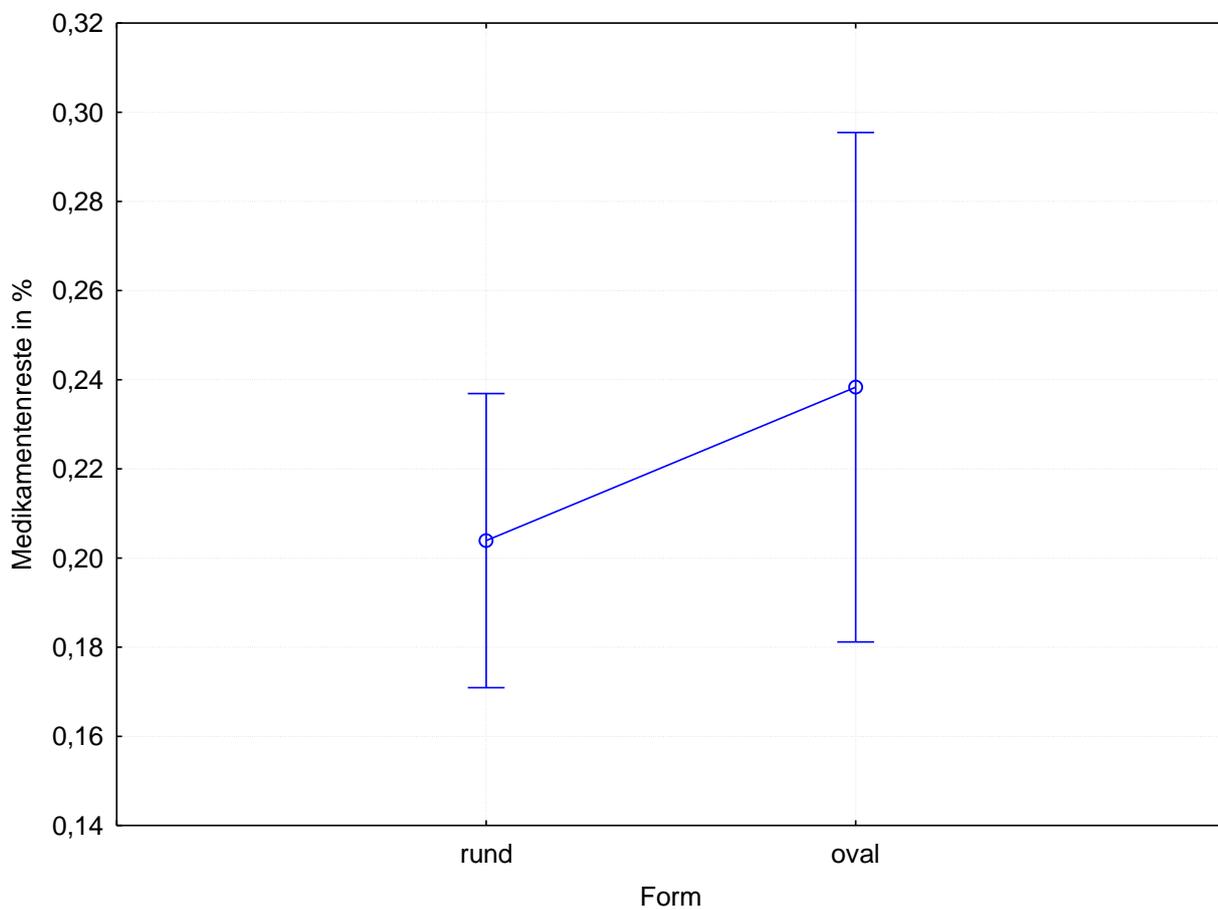
**Abbildung 9:** Abgebildet sind Mittelwerte und Konfidenzintervalle der Medikamentenreste (in%), aufgetrennt nach der Methode

## 5.2 Reinigungsergebnis in Abhängigkeit von der Form der Wurzelkanäle

Das Reinigungsergebnis in runden und ovalen Kanälen verhält sich in etwa gleich. Der Mittelwert für die Gruppe mit ovalem Wurzelkanal beträgt 0,24 und in der Gruppe mit runden Wurzelkanälen 0,2. Es lässt sich kein signifikanter Unterschied der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Querschnittsform der Wurzelkanäle feststellen ( $p = 0.302$ , siehe Tab. 2).

Form	Anzahl	Mittelwert (SD)	p-Wert
oval	20	0,24 (0,164)	0,302
rund	60	0,2 (0,13)	

**Tabelle 2: Übersicht der Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) bezüglich der Medikamentenreste in Abhängigkeit von der Querschnittsform des Wurzelkanals. Der angegebene p-Wert resultiert aus der zweifaktoriellen ANOVA.**



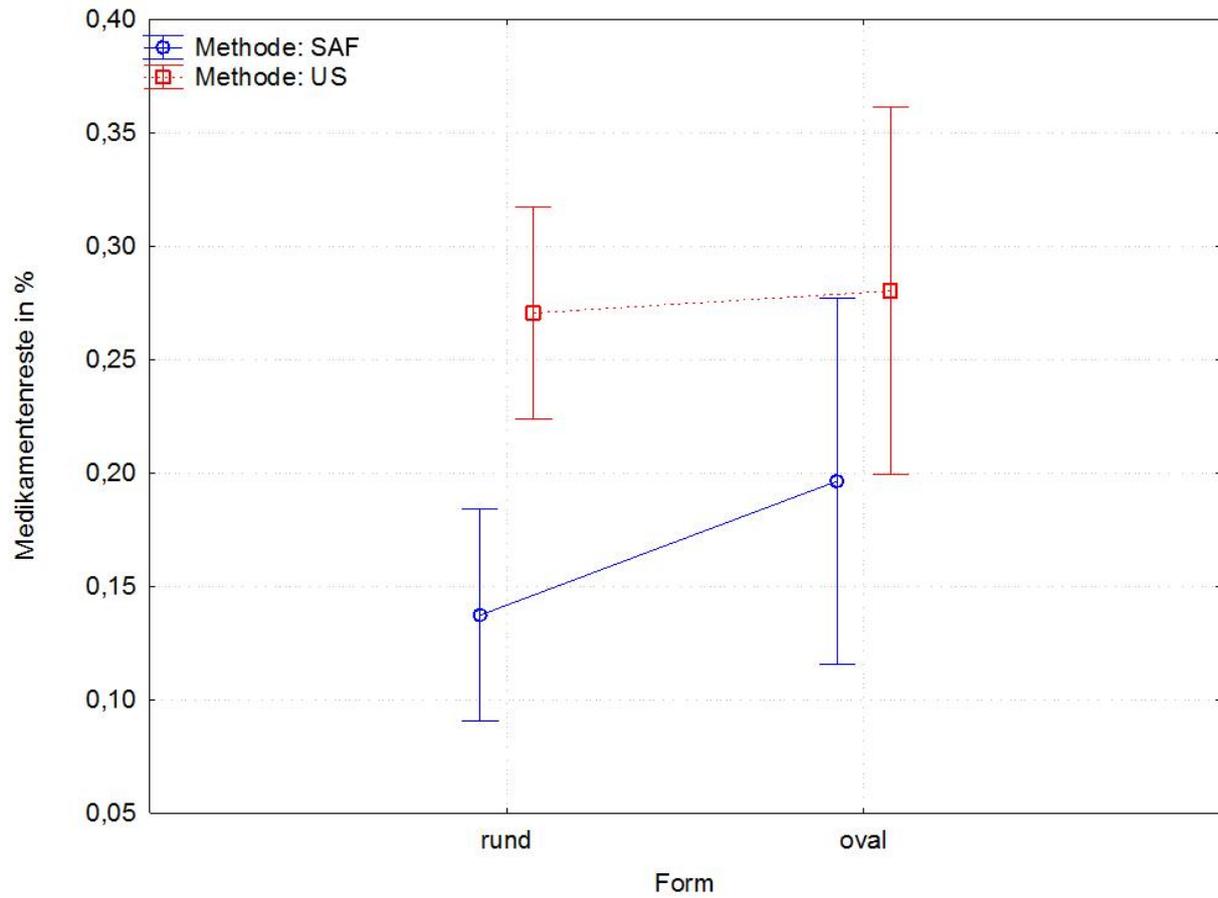
**Abbildung 10: Grafische Darstellung der Medikamentenreste (in %) in Abhängigkeit von der Querschnittsform des Wurzelkanals (rund, oval).**

### 5.3 Reinigungsergebnis beider Methoden in Abhängigkeit von der Form des Wurzelkanals

Betrachtet man das Reinigungsergebnis beider Methoden (SAF und Ultraschall) in Abhängigkeit von der Querschnittsform des Wurzelkanals (Wechselwirkung), lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Beide Methode verhalten sich in ähnlich, unabhängig von der Form des Wurzelkanals, wie der p-Wert von 0,459 in Tabelle 3 bestätigt.

Methode	Form	Anzahl	Mittelwert (SD)	p-Wert
SAF	rund	30	0,14 (0,095)	0,459
	oval	10	0,2 (0,153)	
US	rund	30	0,27 (0,133)	
	oval	10	0,28 (0,172 )	

**Tabelle 3: Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Medikamentenreste bezüglich der Wechselwirkung von Form (rund/oval) und der Methode (SAF/US)**



**Abbildung 11: Grafische Darstellung der Medikamentenreste (in%) nach Anwendung beider Methoden (SAF und Ultraschall) in Abhängigkeit von der Querschnittsform des Wurzelkanals (rund, oval)**

## 6 Diskussion

### 6.1 Diskussion der Methode

Ziel der vorliegenden Studie war der Vergleich zweier Methoden zur Entfernung der medikamentösen Einlage Kalziumhydroxid aus runden und ovalen Wurzelkanälen. Die piezoelektrische Ultraschallspülung wurde mit derjenigen der Nickel-Titan-Feile SAF verglichen. Zur Auswertung wurden dreidimensionale Micro-CT-Aufnahmen verwendet.

Der verwendete Versuchsaufbau orientierte sich an Untersuchungen von Wiseman et al. (2011). Die Bestimmung des verbliebenen Volumens an Wurzelkanalmedikament erfolgte anhand von dreidimensionalen Micro-CT-Aufnahmen (Metzger et al. 2010c).

Es liegen derzeit noch keine Studien in der Literatur vor, die sich hinsichtlich der zu testenden Methode (SAF versus Ultraschall) und der auswertenden Methode (Micro-CT) gleichen.

#### 6.1.1 Gruppeneinteilung

Bei der Studie handelt es sich um einen *In-vitro*-Versuch unter Verwendung von 80 extrahierten menschlichen Prämolaren und Inzisivi. Der Nachteil der Verwendung extrahierter menschlicher Zähne liegt in der nicht standardisierbaren Morphologie. Um dennoch möglichst einheitliche Versuchsbedingungen zu erhalten, wurden vor Versuchsbeginn bestimmte Ein- und Ausschlusskriterien formuliert und die Präparationsabläufe standardisiert festgelegt. So wurden nur einwurzelige Zähne verwendet, die einen unbeschädigten Apex, keine bereits durchgeführte endodontische Behandlung sowie keine Frakturen, Wurzelkaries oder größere Füllungen aufwiesen. Alle Zähne zeigten einen geraden Wurzelkanal, dessen Arbeitslänge auf 17 mm vereinheitlicht wurde. Alle Arbeitsschritte wurden vom selben Behandler durchgeführt. Eine Standardisierung in dem Maße, wie sie in Studien unter Verwendung von Plastikzähnen (Lee et al. 2004; van der Sluis et al. 2005a) möglich ist, konnte aufgrund der Verwendung menschlicher Zähne nicht erreicht werden. Allerdings kann man bei der Verwendung von Plastikzähnen aufgrund der strukturellen Unterschiede von Zahnhartsubstanz und Kunststoff nicht von einem vergleichbaren Adhäsions- und Abrasionsverhalten ausgehen. Nach Balvedi et al. (2010) besteht eine mechanische Interaktion zwischen Kalziumhydroxid und dem Dentin. Die Reinigung und Entfernung von Substanzen könnte aus dem künstlich geschaffenen Kanallumen erleichtert sein. So weisen Studien unter Verwendung extrahierter humaner Zähne eine höhere klinische Relevanz auf.

Die meisten der bisherigen Studien zur Kalziumhydroxid-Entfernung arbeiteten unter Verwendung menschlicher Zähne (Lambrianidis et al. 1999, 2006), einige benutzten bovine Zähne (Balvedi et al. 2010). Die meisten Autoren wählten ebenfalls die gerade Kanalförmigkeit einwurzeliger Zähne in der

Front- und Prämolarenregion (Lambrianidis et al. 1990, 2006; Nandini et al. 2006). Medikamentenrückstände aus gekrümmten Kanälen vollständig zu entfernen, ist möglicherweise schwieriger und häufig mit einer Begradigung des ursprünglichen Kanalverlaufs verbunden (Goldberg et al. 2004).

In der Studie wurden Zähne mit entweder runder oder ovaler Kanalform verwendet. Die Einteilung erfolgte anhand der Definition eines ovalen Wurzelkanals nach Wu et al. (2000). Hiernach gilt ein Wurzelkanal als oval, wenn das Verhältnis von Länge zu Breite  $> 2$ , aber  $\leq 4$  beträgt. Ovale Wurzelkanäle liegen nach dieser Einteilung zu etwa 25% (Wu et al. 2000) vor und machen eine vollständige Instrumentierung schwierig bis unmöglich (Wu und Wesselink 2001).

Anhand der eingescannten Bilddaten wurden Schnittbilder auf Höhe von 5 mm vom Apex erstellt. In diesen Schnittbildern wurden zwei aufeinander senkrecht stehende Diagonalen in das Kanallumen gezogen und deren Längen bestimmt. So konnten die Zähne anhand der von Wu et al. (2000) gegebenen Definition eingeteilt werden.

Durch die Verwendung einer speziellen Bildbearbeitungs- und Ansichtssoftware (Fiji) sollten Messfehler und Ungenauigkeiten durch den Auswerter ausgeschlossen werden.

In der Literatur finden sich unterschiedliche Methoden der Bestimmung und verschiedene Definitionen ovaler Wurzelkanäle. Häufig wurde die Kanalform radiografisch bestimmt. Wu und Wesselink (2001) fertigten zwei Röntgenbilder an: jeweils eins aus mesial- und distal-exzentrischer Projektion. Stellte sich der Wurzelkanal unterschiedlich breit dar, wurde ein ovaler Wurzelkanal angenommen. Bei dieser Methode werden keine Angaben bezüglich der koronalen Höhe der Messaufnahmen gemacht und keine Vorgaben bezüglich der Winkel der exzentrischen Projektionen gegeben. Die Reproduzierbarkeit ist demnach fraglich. Außerdem definieren die Autoren keine Obergrenze des Verhältnisses von Länge- zu Breite. Bei einem Verhältnis von Länge zu Breite von 2 gilt ein Wurzelkanal ebenso als oval wie bei einem Verhältnis von 6. Die Definition nach Wu et al. (2000) hingegen definiert eine Obergrenze und bezeichnet einen Wurzelkanal ab einem Verhältnis von Länge zu Breite von  $> 4$  als flach.

Die Probenanzahl je Gruppe von  $n=40$  entspricht derjenigen vorhergegangener Studien, bzw. übertrifft diese sogar (Lambrianidis et al. 1999; Kenee et al. 2006).

### **6.1.2 Methode der Entfernung von Kalziumhydroxid**

Das Ziel der Kalziumhydroxid-Entfernung ist eine möglichst vollständige und rückstandslose Befreiung von allen Medikamentenresten aus dem Wurzelkanalsystem.

In dieser Studie wurden zwei Entfernungsmethoden untersucht und miteinander verglichen. Die Effektivität der piezoelektrischen Ultraschallspülung wurde mit derjenigen der Nickel-Titan-Feile SAF verglichen. Derzeit liegen noch keine vergleichenden Studien in der Literatur vor. In zwei

Studien wird die Effektivität der Medikamentenentfernung mittels Ultraschall untersucht (Balvedi et al. 2010; Wiseman et al. 2011) und es findet sich bis heute nur eine einzige *In-vitro*-Studie, in der die Entfernung eines Kontrastmittels durch die SAF beschrieben wird. Ruckmann et al. (2013) führten eine zweidimensionale röntgenologische Analyse durch, um die Reinigungseffizienz der SAF mit derjenigen von Handfeilen zu vergleichen. Eine vergleichende Studie zwischen den beiden Entfernungsmethoden steht derzeit noch aus.

In der Vorbereitung des Hauptversuchs wurden alle Zähne bis zu einer Größe von 40/04 aufbereitet. Die Präparation erfolgte mithilfe des maschinellen Nickel-Titan Systems FlexMaster und wurde vom selben Behandler in standardisierter Weise durchgeführt.

Ein ausreichender Präparationsdurchmesser ist sowohl für eine effiziente Spülung nötig (Hülsmann 1993) als auch von der Feilenmechanik der SAF gefordert.

Die Durchführung erfolgte strikt nach den Herstellerangaben bezüglich der Häufigkeit der Benutzung. Die SAF Feile wurde mit einer speziellen Spülvorrichtung (Vatea, ReDent-Nova) und einem Drehmoment-begrenzten Motor betrieben.

Ziel der Studie war es, die beste Methode zur Entfernung der medikamentösen Einlage Kalziumhydroxid zu ermitteln. Um den Einfluss der verwendeten Spülflüssigkeit auszuschließen, wurde in allen Versuchsreihen des Hauptversuchs die Spülflüssigkeit in der gleichen Konzentration und den gleichen Volumina verwendet. Jeder Wurzelkanal wurde mit insgesamt 20 ml 3%igem Natriumhypochlorit für 4 Minuten gespült. Dies entspricht einer ungefähren Fließrate von 5 ml pro Minute. Die verwendeten Mengen an Spülflüssigkeit und alle übrigen Einstellungsparameter entsprechen denen vorhergegangener Studien (Metzger et al. 2010c; Rödiger et al. 2010a,b; Peters und Paqué 2011) und den Empfehlungen des Herstellers (Hof et al. 2010). In anderen Studien, die die Entfernung von Kalziumhydroxid untersuchen, wurden auch andere Spülflüssigkeiten wie EDTA (Lambrianidis et al. 2006) und Zitronensäure (Nandini et al. 2006) bzw. eine Kombination aus diesen verwendet (Rödiger et al. 2010c).

Um auch die Arbeitssicherheit der Methode und damit die Eignung für die Anwendung in der Praxis bewerten zu können, wurden eventuell auftretende Spülzwischenfälle protokolliert. Bei der Anwendung von Ultraschallgerät und SAF traten jedoch keine größeren Zwischenfälle auf.

### **6.1.3 Berechnung des verbliebenen Volumens des Wurzelkanalmedikaments**

Der Sinn von Studien zur Kalziumhydroxid-Entfernung ist die Bewertung der Effizienz einer Entfernungsmethode bzw. der Vergleich unterschiedlicher Systeme untereinander. Um die Methoden bewerten zu können, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Volumenbestimmung des vorhandenen Medikaments durchgeführt. Bisherige Studien (Balvedi et al. 2010, Kenee et al.

2006) führten demgegenüber überwiegend Flächenberechnungen (Ausmaß der von Medikament bedeckten Kanaloberfläche) durch.

Bisher wurde mittels Micro-CT neben der Entfernung von Dentin (Peters et al. 2010) und Wurzelfüllmaterial (Roggendorf et al. 2010) auch der Einfluss der Präparation auf die Kanalanatomie (Paqué und Peters 2011) untersucht. Die Entfernung von Kalziumhydroxid durch Ultraschallanwendung wurde von Wiseman et al. 2011 anhand von mikrotomographischen Daten bewertet.

Durch das Micro-CT wird eine dreidimensionale Darstellung der medikamentösen Einlage erstellt (Wiseman et al. 2011). Ein Vorteil der Methode liegt in ihrem nicht destruktiven Charakter. Die Proben werden durch den Versuchsablauf nicht zerstört oder verändert, eine erneute Auswertung wäre jederzeit möglich. Die hohe Auflösung von 5-50  $\mu\text{m}$  ermöglicht eine besonders genaue Objektdarstellung (Engelke et al. 1999).

Als Nachteil können die langen Scanzeiten sowie die kostenaufwändige Anschaffung und Wartung der Apparatur genannt werden. Außerdem können nur Objekte von kleiner Größe gescannt werden. *In-vivo*-Versuche sind so und aufgrund der Strahlenbelastung nicht durchführbar. Grundlage der Auswertung stellt die Berechnung des verbliebenen Medikaments als Volumenangabe dar. Durch die verwendete Software wird ein Grauerthistogramm erstellt, welches die Volumina von Schmelz, Dentin, Luft und Wurzelkanalmedikament als Graphen darstellt. Diese Grauwerte sind für jeden Probenzahn unterschiedlich und hängen unter anderem vom Mineralisierungsgrad und der Art der Lagerung ab. Die Grauwerte einheitlich festzulegen, ist somit nicht möglich. Für die Volumetrie muss der Untersucher denjenigen Grauwert bestimmen, der dem Füllmaterial entspricht. Die Festlegung der Umkehrpunkte der Graphenabschnitte im Grauerthistogramm, welche dem Wurzelfüllmaterial entsprechen, sind so nicht standardisierbar und die Werte und somit Ergebnisse somit auswerterabhängig.

In der Literatur finden sich auch Studien mit anderen Auswertungsmethoden. Eine geläufige Methode für die Bewertung der Kalziumhydroxid-Entfernung stellt das Grubenmodell (Lee et al. 2004; Rödiger et al. 2010a,b) dar. Das künstliche Anlegen von Gruben in die Kanalwand bietet eine einfache Möglichkeit, um in einem *In-vitro*-Versuch Unebenheiten im Dentin zu simulieren. Eine Standardisierung der Grubengröße und Lokalisation ist möglich. Dennoch können die demonstrierten Unebenheiten keinesfalls die große anatomische Varianz und Komplexität des gesamten Wurzelkanalsystems widerspiegeln. Der Wurzelkanal wird nur in Ausschnitten, nicht in seiner Gesamtheit betrachtet und bewertet. In anderen Studien wurde die Sauberkeit entlang der gesamten Kanalwand betrachtet (Lambrianidis et al. 1999, 2006). Hierzu wurden die Probenzähne längs in zwei Hälften gespalten und die Rückstände an Medikament protokolliert.

Zur Quantifizierung wird ein gesondertes Bewertungssystem (van der Sluis et al. 2007a) verwendet, das eine Bewertung des Reinigungsergebnisses durch einen oder mehrere Untersucher ermöglicht. Ein Nachteil dieser Studiengestaltung ist die subjektive Bewertung der Untersucher, wodurch eine Beeinträchtigung der Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden kann. Zudem wird das Reinigungsergebnis nur in einer beliebig gewählten zweidimensionalen Schicht bewertet. Ob sich diese Darstellung in einer anderen Ebene bestätigt oder in anderer Weise zeigt, kann nicht beurteilt werden.

## **6.2 Diskussion der Ergebnisse**

Das wichtigste Ziel bei der Entfernung medikamentöser Einlagen ist eine möglichst rückstandslose Reinigung aller vom Medikament bedeckten Bereiche des Wurzelkanalsystems. Die Auswertung der mikrotomographischen Daten zeigt, dass keine der beiden untersuchten Methoden eine vollständige Entfernung der medikamentösen Einlage Kalziumhydroxid erreicht. Im direkten Vergleich der beiden Systeme untereinander zeigt sich eine signifikante Überlegenheit des SAF-Systems gegenüber der passiven Ultraschallspülung ( $p=0,002$ ). Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den untersuchten Techniken in einer der beiden Wurzelkanalquerschnittsformen ( $p=0,459$ ) und somit kein Einfluss des Wurzelkanalquerschnitts auf das Reinigungsergebnis festgestellt werden.

### **6.2.1 Reinigungswirkung der PUI**

Das Ultraschallsystem Piezon Master ® erreichte gute Reinigungsergebnisse mit durchschnittlichen Score-Werten zwischen 0,27 (+- 0,13) in runden und 0,28 (+- 0,17) in ovalen Wurzelkanälen. Obwohl die Ultraschallspülung der SAF signifikant unterlegen war ( $p=0,002$ ), konnten mehr als 73 % der medikamentösen Einlage entfernt werden, und die Ergebnisse zeigen die gute Fähigkeit des Systems, Kalziumhydroxid aus Wurzelkanälen zu entfernen.

Ein Ultraschallgerät funktioniert auf dem Prinzip der Oszillation, also der Umwandlung von elektrischer Energie in Ultraschallwellen in einem Bereich von 25 - 40 kHz (van der Sluis et al. 2007). Die so in Schwingung versetzte Feile verursacht in der Spülflüssigkeit die von Ahmed et al. (1987 a, b) veranschaulichten Mikroströmungen (Näheres s. 2.2.2.2).

Die Effektivität der Ultraschallspülung wurde in der endodontischen Literatur vielfach untersucht und dokumentiert. Studien belegen die guten Reinigungsergebnisse bezüglich der Entfernung von Pulpagewebe (Türkün und Cengiz 1997), Dentindebris (Sabins et al. 2003; van der Sluis et al. 2005b) und der präparationsbedingten Schmierschicht (Cameron 1983, 1987). Auch die Bakterienzahlen im Wurzelkanal konnten nach Ultraschallanwendung deutlich reduziert werden (Sjögren und Sundqvist 1987; Spoleti et al. 2003). Die Ergebnisse der PUI übertreffen im Allgemeinen die der Handspülung (Cunningham et al. 1982; Huque et al. 1998) und der Schallspülung (Sabins et al. 2003).

Derzeit liegen nur wenige Studien vor, die sich mit der Effektivität der Ultraschallspülung zur Entfernung von Kalziumhydroxideinlagen beschäftigen. Taşdemir et al. (2010) führten eine Studie an 24 Prämolaren durch und verglichen die Effizienz der aktivierten Ultraschallspülung mit NaOCl mit derjenigen einer kombinierten Handspülung mit NaOCl und EDTA. Die Ultraschallspülung war signifikant effektiver und entfernte 75% der medikamentösen Einlage aus dem Wurzelkanal. Auch Kenee et al. (2006) wiesen die unterlegene Rolle der Handspülung nach. Sie stellten jedoch eine vergleichbare Effizienz der rotierenden Instrumentierung im Wurzelkanal mit derjenigen einer Ultraschallspülung fest. In einer Studie von Rödiger et al. (2011) zeigte die Ultraschallspülung in der Entfernung medikamentöser Einlagen vergleichbare Reinigungsergebnisse mit dem Spülsystem RinsEndo. Auch das von Wiseman et al. (2011) genutzte Untersuchungsdesign weist einige Parallelen mit der vorliegenden Studie auf. Sie bewerteten die Reinigungseffektivität der Ultraschallspülung und verglichen die Ergebnisse mit denjenigen der Schallspülung. Die Ultraschallspülung war nach 3 Mal 20-sekündiger Aktivierung, in der 69,5% der Kalziumhydroxideinlage entfernt wurden, signifikant effektiver als die ebenso lange verwendete Schallspülung, welche 48,6% entfernte.

Eine direkte Vergleichbarkeit der zitierten Studien ist allerdings nicht gegeben, da die Untersucher zusätzlich zu dem in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Natriumhypochlorit auch den Chelator EDTA als Spülflüssigkeit gebrauchten. Auch wenn dieses Agens in nur geringen Volumina verwendet wurde (5 ml bei Taşdemir et al. und 3 ml bei Wiseman et al.), ist von einem zusätzlichen Lösungseffekt des Chelators auf die medikamentöse Einlage auszugehen (Salgado et al. 2009).

Das Spülvolumen insgesamt (bei Taşdemir et al. (2010) 10 ml und 20 ml bei Wiseman et al. (2011)) und die Aktivierungszeit der Ultraschallspülung (bei Taşdemir et al. (2010) von 30 Sekunden und bei Wiseman et al. (2011) von 60 Sekunden) sind den in der vorliegenden Studie verwendeten 20 ml Spülflüssigkeit bei einer Aktivierungszeit von 4 Minuten weit unterlegen und machen einen Vergleich der Ergebnisse schwierig.

Gemeinsam ist den Ergebnissen all dieser Studien, dass die Kalziumhydroxideinlage mit den derzeit vorhandenen Methoden nur unvollständig aus dem Wurzelkanal entfernt werden kann. Es zeigte sich der positive Effekt einer Aktivierung der Spüllösung durch endodontische Instrumente. Somit stimmen die guten Reinigungsergebnisse dieser Studie mit denen in der Literatur zu findenden überein und entsprechen den gestellten Erwartungen.

Außerdem wird aus der Literatur ersichtlich, dass die Effektivität der Ultraschallspülung auch von der verwendeten Spüllösung abhängt (Huque et al. 1998). Natriumhypochlorit gilt als besonders geeignet in Kombination mit Ultraschallgeräten (Siqueira et al. 1997b). Die Ultraschallanwendung mit Wasser als Spüllösung erwies sich als nur so effektiv zur Entfernung des Medikamentes wie

eine Handspülung mit Natriumhypochlorit (van der Sluis et al. 2007a). Allerdings ist in der Literatur belegt, dass die Spülflüssigkeit NaOCl allein nicht in der Lage ist, das Medikament zu entfernen (Kenee et al. 2006; Salgado et al. 2009). Rödiger et al. (2010c) verglichen verschiedene Spülflüssigkeiten in ihrer Fähigkeit, Kalziumhydroxid aus dem Wurzelkanal zu entfernen und kamen zu dem Ergebnis, dass die Anwendung von Chelatoren wie EDTA oder Zitronensäure zu einer gesteigerten Löslichkeit der medikamentösen Einlage führt und der NaOCl-Spülung überlegen ist.

Weiter zeigten Untersuchungen, dass eine Verlängerung der Spülzeit und eine stetige Erneuerung der Spülflüssigkeit zu einer Steigerung der Reaktionsrate des NaOCl mit dem Dentin führen (van der Sluis et al. 2006; Macedo et al. 2013). Das in der vorliegenden Studie verwendete Spülprotokoll mit 4-minütiger Spülzeit in Form von 8 Zyklen à 30 Sekunden und unter ständiger Zufuhr neuer Spülflüssigkeit (3%iges Natriumhypochlorit) erfüllte beide Parameter.

Eine Studie zur Medikamentenentfernung mit Ultraschall, die jeweils nur einen der genannten Parameter (Art der Spüllösung, Volumen oder Aktivierungszeit) untersucht und die Ergebnisse miteinander vergleicht, liegt derzeit nicht vor. Aus den erhältlichen Daten können keine isolierten Schlüsse über den Effekt der jeweiligen Faktoren gezogen werden. Ebenso ist bei Verwendung einer chemisch aktiven Spüllösung eine objektive Betrachtung der rein mechanischen Spülwirkung des Ultraschallsystems nicht möglich.

Die Klärung, ob und in welchem Ausmaß die einzelnen Faktoren Einfluss auf das Reinigungsergebnis nehmen, bleibt Aufgabe weiterer Studien.

### **6.2.2 Reinigungswirkung der SAF**

Die Anwendung der SAF ergab die besten Ergebnisse mit durchschnittlichen Score-Werten zwischen 0,14 (+- 0,09) in runden und 0,2 (+- 0,15) in ovalen Wurzelkanälen. Die Entfernung der medikamentösen Einlage mit der SAF gelang damit signifikant besser als nach Anwendung der PUI ( $p = 0,02$ ). Der Unterschied des Reinigungsergebnisses zwischen runden und ovalen Wurzelkanälen war nicht signifikant ( $p = 0,302$ ) und die Methoden verhielten sich unabhängig von der Form gleich (Wechselwirkung Form/Methode,  $p = 0,459$ ).

Die guten Reinigungsergebnisse der SAF in der vorliegenden Studie decken sich mit denjenigen anderer Autoren vorausgegangener Studien. So wird in der Literatur sowohl über die guten mechanischen Fähigkeiten des Systems (Hof et al. 2010; Fermakis et al. 2013) als auch über gute Resultate bei der Wurzelkanalpräparation (Metzger et al. 2010b) bezüglich der Entfernung von Debris (Yigit Özer et al. 2011), des *smear-layers* (Metzger et al. 2010c) und pulpalen Gewebes (De-Deus et al. 2011), aber auch von Wurzelfüllmaterial (Abramovitz et al. 2012; Solomonov et al. 2012b) berichtet.

Die SAF erweist sich anderen Nickel-Titan-Feilen (De-Deus et al. 2011) und Handinstrumenten (Lin et al. 2013) überlegen. Ein Vergleich zur Ultraschallspülung liegt derzeit nicht vor. Studien, die die Desinfektionsleistung und Entfernung von Bakterien aus dem Wurzelkanalsystem mittels SAF untersuchten, berichten von guten Ergebnissen. Alves et al. (2011) schildern eine signifikante Reduktion der Bakterienpopulation, welche bereits nach zwei Minuten SAF-Anwendung und unabhängig von der verwendeten NaOCl-Konzentration eintritt. Die eindrucksvollsten Ergebnisse wurden nach 6-minütiger Anwendung mit nur noch 14% positiven Proben dokumentiert.

Das SAF-System wird mit einer speziellen Spülvorrichtung betrieben. Die guten Ergebnisse in der Desinfektion könnten in dem kontinuierlichen Transport und stetiger Aktivierung frischer Spüllösung oder aus einer Kombination der beiden Faktoren (Siqueira et al. 2010; De-Deus et al. 2011) begründet sein.

Derzeit liegt nur eine einzige Studie vor, die die Effektivität der SAF zur Entfernung eines Kontrastmittels nutzt. Ruckmann et al. (2013) gestalteten eine Studie zum Vergleich der Reinigungseffizienz von SAF und ProFile-Instrumenten mit derjenigen von Handfeilen. 30 Zähne, deren Wurzelkanal eine lang-ovale Querschnittsform aufwies, wurden mit dem Kontrastmedium Vitapex, einem kalziumhydroxidbasierten, nicht erhärtenden Füllmaterial befüllt und einem von drei Entfernungsprotokollen zugewiesen. Die SAF-Gruppe (n=10) wurde für 4 Minuten bearbeitet, 20 ml Kochsalzlösung dienten als Spülflüssigkeit. Bezüglich der Einstellungsparameter (5000 rpm und einer Amplitude von 0,4 mm), der Gesamtmenge transportierter Spülflüssigkeit (20 ml), der Fließrate (5 ml pro Minute) und der Dauer der Anwendung gleichen sich die Spülprotokolle der SAF-Gruppen beider Studien und entsprechen dem Anwendungsprotokoll des Herstellers (Metzger et al. 2010c). Ruckmann et al. (2013) benutzten jedoch eine Kochsalzlösung und kein Natriumhypochlorit. Die Autoren begründeten ihre Wahl mit der bewusst intendierten Ausgrenzung aller chemischen Einflüsse der Spülflüssigkeit.

Der größte Unterschied liegt jedoch in der verwendeten Auswertungsmethode. Ruckmann et al. (2013) verwendeten 2-dimensionale Röntgenaufnahmen. Wenn die Anfertigung von Röntgenbildern auch im Vergleich zu CT-Aufnahmen erleichtert und der Zeit- und Kostenaufwand wesentlich geringer sind, weisen doch die dreidimensionalen CT-Daten eine wesentlich größere Genauigkeit und Aussagekraft aus. Eine direkte Vergleichbarkeit der beiden Studien ist deshalb nicht gegeben.

Bezüglich der Anwendung in **ovalen Wurzelkanälen** zeigt die Datenlage in der Literatur gute Ergebnisse nach SAF-Anwendung. Die gesamte innere Dentinschicht des ovalen Wurzelkanals mit der Präparation zu erfassen, wird in der Literatur als schwierig beschrieben (Wu und Wesselink 2001). Dies gilt sowohl für die Handpräparation (Wu et al. 2003) als auch für die Präparation mit geläufigen rotierenden Nickel-Titan-Feilen (Paqué et al. 2010).

In einer Studie von Paqué und Peters (2011) war der Anteil von der Instrumentation betroffener Kanalflächen in der SAF-Gruppe signifikant höher (teilweise über 80%) im Vergleich zur Kanalpräparation mit Nickel-Titan-Feilen vorhergegangener Studien.

Eine mögliche Erklärung für den hohen Anteil von der Instrumentation betroffener Flächen und die guten Reinigungsergebnisse könnte die Fähigkeit der SAF sein, sich im Wurzelkanal auszudehnen, sich ihm anzupassen (Yoldas et al. 2012; Ruckmann et al. 2013). Yoldas et al. (2012) stellten in ihrer Studie fest, dass die Form des Wurzelkanals nach Anwendung der SAF nicht rund ist, wie nach Präparation mit den meisten Nickel-Titan-Feilen (Hülsmann et al. 2001), sondern eher tropfenförmig, ähnlich der tatsächlichen Kanalform.

## 7 Schlussfolgerungen

- Keine der untersuchten Methoden ist in der Lage, eine vollständige Entfernung der medikamentösen Einlage zu erreichen.
- Die besten Ergebnisse wurden nach Anwendung der SAF erzielt.
- Die SAF zeigte signifikant überlegene Reinigungsergebnisse gegenüber der PUI.
- Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Techniken in Bezug auf die Form des Wurzelkanals festgestellt werden.
- Es konnte kein Einfluss des Wurzelkanalquerschnitts auf das Reinigungsergebnis festgestellt werden.

## 8 Zusammenfassung

Ziel der Studie: Ziel der vorliegenden *In-vitro*-Studie war der Vergleich zweier Methoden zur Entfernung der medikamentösen Einlage Kalziumhydroxid aus runden und ovalen Wurzelkanälen mithilfe eines Micro-CTs.

Material und Methode: Es wurden 80 extrahierte menschliche Prämolaren und Inzisivi verwendet. Die Wurzelkanäle wurden von koronal auf eine einheitliche Länge von 18 mm gekürzt und mit dem FlexMaster-System (VDW, München) bis zu Größe 40/04 präpariert. Nach jeder Instrumentengröße wurden die Kanäle mit 2 ml 3%igem Natriumhypochlorit gespült. Die Spülung erfolgte mit einer 2 ml Spritze und einer Nadel der Größe 30 (NaviTip 30 Gauge, Ultradent, München). Die Applikation des Kalziumhydroxidpräparates (UltraCal XS, Ultradent Products Inc., Utah, USA) wurde mit einer Injektionsnadel der Größe 30 durchgeführt. Eine anschließende röntgenologische Kontrolle sicherte die vollständige und homogene Verteilung des Präparates im Wurzelkanal. Alle Probenzähne wurden für sieben Tage bei 37°C Lufttemperatur und 100% Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach Anfertigung präoperativer Micro-CT-Scans von jedem Wurzelkanal erfolgte eine Volumenbestimmung der applizierten Kalziumhydroxideinlage. Außerdem konnten die Proben anhand der Bilddaten einer runden oder ovalen Querschnittsform zugeteilt werden. Anschließend erfolgte die Einteilung der Probenzähne in vier Gruppen; Gruppe 1 (n = 10, ovale Querschnittsform), Gruppe 2 (n = 10, ovale Querschnittsform), Gruppe 3 (n = 30, runde Querschnittsform), Gruppe 4 (n = 30, runde Querschnittsform). Die Gruppen 1 und 3 wurden dem Spülprotokoll der Self-Adjusting File (SAF) zugeteilt, die Gruppen 2 und 4 dem der passiven Ultraschallspülung (PUI). Das Spülprotokoll beider Entfernungsmethoden sah eine 4-minütige Anwendung, aufgeteilt in 8 jeweils 30 Sekunden lange Zyklen und eine Gesamtpülmenge von 20 ml 3%igem Natriumhypochlorit vor. Die Auswertung erfolgte durch Anfertigung postoperativer Micro-CT-Scans und erneute Bestimmung des verbliebenen Volumens an medikamentöser Einlage. Zur statistischen Auswertung wurde der Quotient aus Volumen nach der Entfernung zu dem Volumen vor der Entfernung berechnet und eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt.

Ergebnisse: Keine der verwendeten Methoden konnte eine vollständige Entfernung der medikamentösen Einlage Kalziumhydroxid erreichen. Die SAF-Spülung erreichte signifikant bessere Ergebnisse als die PUI. Es konnte kein signifikanter Einfluss der Kanalform (rund/oval) auf die Reinigungswirkung beider Systeme festgestellt werden.

Schlussfolgerung: Das SAF-System entfernt Kalziumhydroxid effektiver aus runden und ovalen Wurzelkanälen als die passive Ultraschallspülung. Mit beiden Systemen konnten relativ saubere, aber keine vollständig von Kalziumhydroxid gereinigten Kanalwände erzielt werden.

## 9 Anhang

### 9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Acoustic streaming entlang der Feile als schematische (rechts) und bildliche Darstellung (links) .....	13
Abbildung 2: Fotografische Abbildung der SAF-Feile .....	27
Abbildung 3: Dreidimensionale farbliche Darstellung der medikamentösen Einlage vor der Entfernung (rot).....	38
Abbildung 4: Dreidimensionale farbliche Darstellung der zurückgebliebenen Anteile der medikamentösen Einlage nach der Entfernung (grün) .....	39
Abbildung 5: Farbliche Darstellung des Kalziumhydroxids vor der Entfernung (rot).....	46
Abbildung 6: Farbliche Darstellung der Medikamentenreste nach der Entfernung (grün) .....	46
Abbildung 7: Farbliche Darstellung des Kalziumhydroxids vor der Entfernung (rot).....	47
Abbildung 8: Farbliche Darstellung der Medikamentenreste nach der Entfernung (grün) .....	47
Abbildung 9: Abgebildet sind Mittelwerte und Konfidenzintervalle der Medikamentenreste (in%), aufgetrennt nach der Methode .....	48
Abbildung 10: Grafische Darstellung der Medikamentenreste (in %) in Abhängigkeit von der Querschnittsform des Wurzelkanals (rund, oval).....	49
Abbildung 11: Grafische Darstellung der Medikamentenreste (in%) nach Anwendung beider Methoden (SAF und Ultraschall) in Abhängigkeit von der Querschnittsform des Wurzelkanals (rund, oval).....	51

### 9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittelwert und Standardabweichung der Medikamentenreste (in%), aufgetrennt nach den zwei Methoden. Der angegebene p-Wert resultiert aus der zweifaktoriellen ANOVA. ....	45
Tabelle 2: Übersicht der Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) bezüglich der Medikamentenreste in Abhängigkeit von der Querschnittsform des Wurzelkanals. Der angegebene p-Wert resultiert aus der zweifaktoriellen ANOVA. ....	49

Tabelle 3: Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Medikamentenreste bezüglich der Wechselwirkung von Form (rund/oval) und der Methode (SAF/US) ..... 50

## Materialliste

1. Antriebseinheit für das SAF-System (Anyxing 303B, Micro-NX LTD., Samcheong-ri Waegwaneup, Chilgok-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea )
2. Diamantierte Trennscheibe (Horico, Berlin, Deutschland)
3. Diamantierter Zylinder (Komet, Lemgo, Deutschland)
4. FlexMaster-System (Vereinigte Dentalwerke, München, Deutschland)
5. Gates-Bohrer in den Größen II und III (Komet, Lemgo, Deutschland)
6. Micro-CT (Explore Locus SP, Gen. Electrical Medical Systems, Ontario, Kanada)
7. Natriumhypochlorit (NaOCl 3%, Apotheke des Klinikums Göttingen)
8. Papierspitzen (Henry Schein, Melville, NY, USA)
9. Reamer (Vereinigte Dentalwerke, München, Deutschland)
10. Röntgengerät (Heliodent DS, Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland)
11. SAF-System (ReDent-Nova, Ra'anana, Israel)
12. Spülnadel (NaviTip 30, Gauge, Ultradent, München)
13. Spülvorrichtung für das SAF-System (VATEA, ReDent-Nova, Ra'anana, Israel)
14. UltraCal XS® (Ultradent Products Inc., South Jordan, UT, USA)
15. Ultraschallgerät (Piezon Master 400, EMS, Nyon, Schweiz)
16. Winkelstück für SAF-System (GENTLEpower LUX 20 LP, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, Deutschland)
17. Winkelstückkopf (RDT3, ReDent-Nova, Ra'anana, Israel)

## 10 Literaturverzeichnis

Abramovitz I, Relles-Bonar S, Baransi B, Kfir A (2012):

The effectiveness of a self-adjusting file to remove residual gutta-percha after retreatment with rotary files.

Int Endod J 45, 386-392

Ahlquist M, Henningsson O, Hultenby K, Ohlin J (2001):

The effectiveness of manual and rotary techniques in the cleaning of root canals: a scanning electron microscopy study.

Int Endod J 34, 533-537

Ahmad M (1990):

Measurements of temperature generated by ultrasonic file in vitro.

Endod Dent Traumatol 6, 230–231

Ahmad M, Pitt Ford TJ, Crum LA (1987a):

Ultrasonic debridement of root canals: an insight into the mechanisms involved.

J Endod 13, 93-101

Ahmad M, Pitt Ford TJ, Crum LA (1987b):

Ultrasonic debridement of root canals: acoustic streaming and its possible role.

J Endod 13, 490–499

Ahmad M, Pitt Ford TJ, Crum LA, Walton AJ (1988):

Ultrasonic debridement of root canals: acoustic cavitation and its relevance.

J Endod 14, 486-493

Alves FRF, Almeida BM, Neves MAS, Rôcas IN, Zoffoli J, Siqueira JF (2011):

Time-dependent antibacterial effects of the self-adjusting file used with two sodium hypochlorite concentrations.

J Endod 37, 1451-1455

Andersen M, Lund A, Andreasen JO, Andreasen FM (1992):

In vitro solubility of human pulp tissue in calcium hydroxide and sodium hypochlorite.

Endod Dent Traumatol 8, 104–108

Athanassiadis B, Abbott PV, Walsh LJ (2007):

The use of calcium hydroxide, antibiotics and biocides as antimicrobial medicaments in endodontics.

Aust Dent J 52, 64-82

Athanassiadis B, Abbott PV, George N, Walsh LJ (2010):

An in vitro study of the antimicrobial activity of some endodontic medicaments against enterococcus faecalis biofilms.

Aust Dent J 55, 150-155

Attin T, Hellweg E (1993):

Erfolgsaussichten der direkten Pulpaüberkappung bei Zähnen mit Caries profunda.

Quintessenz 44, 1613-1622

Balvedi RPA, Versiani MA, Manna FF, Biffi JCG (2010):

A comparison of two techniques for the removal of calcium hydroxide from root canals.

Int Endod J 43, 763–768

Barbizam JVB, Fariniuk LF, Marchesan MA, Pecora JD, Sousa-Neto MD (2002):

Effectiveness of manual and rotary instrumentation techniques for cleaning flattened root canals.

J Endod 28, 365-366

Barthel CR, Georgi M, Schäfer E, Petschelt A, Flachsenberg S, Neuber T, Kockapan C,

Weiger R, Hülsmann M (2006):

Stellungnahme der DGZMK: Die Wurzelkanalspülung.

Zahnärztl Mitt 96, 50-51

Baumgartner JC, Cuenin PR (1992):

Efficacy of several concentrations of sodium hypochlorite for root canal irrigation.

J Endod 18, 605–612

Berber VB, Gomes BPFA, Sena NT, Vianna ME, Ferraz CCR, Zaia AA, Souza-Filho FJ (2006):

Efficacy of various concentrations of NaOCl and instrumentation techniques in reducing enterococcus faecalis within root canals and dentinal tubules.

Int Endod J 39, 10-17

Bergenholtz G, Spångberg L (2004):

Controversies in Endodontics.

Crit Rev Oral Biol Med 15, 99-114

Boutsioukis C, Lambrianidis T, Kastrinakis E, Bekiaroglou P (2007):

Measurement of pressure and flow rate during irrigation of a root canal ex vivo with three endodontic needles.

Int Endod J 40, 505-513

Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2012):

Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth.

Int Endod J 46, 590-597

Burroughs JR, Bergeron BE, Roberts MD, Hagan JL, Himel VT (2012):

Shaping ability of three nickel-titanium endodontic file systems.

J Endod 38, 1618-1621

Byström A, Sundqvist G (1981):

Bacteriologic evaluation of the efficacy of mechanical root canal instrumentation in endodontic therapy.

Scand J Dent Res 89, 321-328

Byström A, Claesson R, Sundqvist G (1985):

The antibacterial effect of camphorated paramonochlorophenol, camphorated phenol and calcium hydroxide in the treatment of infected root canals.

Endod Dent Traumatol 1, 170–175

Byström A, Happonen RP, Sjogren U, Sundqvist G (1987):

Healing of periapical lesions of pulpless teeth after endodontic treatment with controlled asepsis.

Endod Dent Traumatol 3, 58–63

Çalt S, Serper A (1999):

Dentinal tubule penetration of root canal sealers after root canal dressing with calcium hydroxide.

J Endod 25, 431–433

Çalt S, Serper A, Özçelik B, Dalat MD (1999):

Dentinal tubule penetration of root canal sealers after root canal dressing with calcium hydroxide.

J Endod 25, 329-331

Cameron JA (1983):

The use of ultrasonics in the removal of the smear layer: a scanning electron microscope study.

J Endod 9, 289–292

Cameron JA (1987):

The synergistic relationship between ultrasound and sodium hypochlorite: a scanning electron microscope evaluation.

J Endod 13, 541–545

Claessens L, Kosteljik H, de Hemptinne F, Slaus G, Bottenberg P (2011):

Vibringe ®, an ex vivo study of a sonic irrigation technique.

Int Endod J 44, 1191 R46

Cunningham WT, Martin H, Forrest WR (1982):

Evaluation of root canal débridement by the endosonic ultrasonic synergistic system.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 53, 401–404

Dalton BC, Ørstavik D, Phillips C, Pettiette M, Trope M (1998):

Bacterial reduction with nickel-titanium rotary instrumentation.

J Endod 24, 763–767

Davis SR, Brayton SM, Goldman M (1972):

The morphology of the prepared root canal: A study utilizing injectable silicone.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 34, 642-648

de Melo Ribeiro MV, Silva-Sousa YT, Versiani MA, Lamira A, Steier L, Pécora JD, de Sousa-Neto MD (2013):

Comparison of the cleaning efficacy of Self-Adjusting-File and rotary systems in the apical third of oval shaped canals.

J Endod 39, 889-892

De-Deus G, Souza EM, Barino B, Maia J, Zamolyi RQ, Reis C, Kfir A (2011):

The Self-Adjusting-File optimizes debridement quality in oval-shaped root canals.

J Endod 37, 701-705

De-Deus G, Accorsi-Mendonça T, de Carvalho e Silva L, de Souza Leite CA, da Silva D, Moreira EJM (2013):

Self-adjusting file cleaning-shaping-irrigation system improves root-filling bond strength.

J Endod 39, 254-257

Engelke K, Karolczak M, Lutz A, Siebert U, Schaller S, Kalende W (1999):

Micro-CT. Technology and application for assessing bone structure.

Radiologie 39, 203-212

---

Esposito PT, Cunningham CJ (1995):

A comparison of canal preparation with nickel-titanium and stainless steel instruments.

J Endod 21, 173-176

Estrela C, Sydney GB, Bammann LL, Felipe Júnior O (1995a):

Mechanism of action of calcium and hydroxyl ions of calcium hydroxide on tissue and bacteria.

Braz Dent J 6, 85–90

Estrela C, Sydney GB, Pesce HF, Felipe Júnior O (1995b):

Dentinal diffusion of hydroxyl ions of various calcium hydroxide pastes.

Braz Dent J 6, 5–9

Fava LR, Saunders WP (1999):

Calcium hydroxide pastes: classification and clinical indications.

Int Endod J 32, 257–282

Feldkamp LA, Goldstein SA, Parfit AM, Jesion G, Kleerekoper M (1989):

The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography.

J Bone Miner Res 4, 3-11

Fermakis ETR, Sotiropoulos GG, Pantazis N, Kozyrakis K (2013):

The permanent deformation of the self-adjusting files when used in canals of extracted teeth.

Int Endod J 46, 863-869

Ferraz CCR, de Almeida Gomes BPF, Zaia AA, Teixeira FB (2001):

In vitro assessment of the antimicrobial action and the mechanical ability of chlorhexidine gel as an endodontic irrigant.

J Endod 27, 452-455

Foschi F, Nucci C, Montebugnoli L, Marchionni S, Breschi L, Malagnino VA, Prati C (2004):

SEM evaluation of canal wall dentin following use of Mtwo and ProTaper Niti rotary instruments.

Int Endod J 37, 832-839

Frank AL (1966):

Therapy for the divergent pulpless tooth by continued apical formation.

J Am Dent Assoc 72, 87–93

Fuss Z, Trope M (1996):

Root perforations: classification and treatment choices based on prognostic factors.

Endod Dent Traumatol 12, 255-264

Goldberg F, Alfie D, Roitmann M (2004):

Evaluation of the incidence of transportation after placement and removal of calcium hydroxide.

J Endod 30, 646-648

Gressmann G, Hülsmann M (2001):

Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit dem FlexMaster-NiTi-System.

Endodontie 10, 227-241

Gu L, Wei X, Ling J, Huang X (2009):

A microcomputed tomographic study of canal isthmuses in the mesial root of mandibular first molars in a Chinese population.

J Endod 35, 353-356

Gu Y, Lu Q, Wang P, Ni L (2010):

Root canal morphology of permanent three-rooted mandibular first molars: Part II – measurement of root canal curvatures.

J Endod 36, 1341-1346

Gutarts R, Nusstein J, Reader A, Beck M (2005):

In vivo debridement efficacy of ultrasonic irrigation following hand-rotary instrumentation in human mandibular molars.

J Endod 31, 166–170

Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2008):

Three-dimensional evaluation of effectiveness of hand and rotary instrumentation for retreatment of canals filled with different materials.

J Endod 34: 1370-1373

Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2009):

Evaluation of root canal obturation: A three-dimensional in vitro study.

J Endod 35, 541-544

Hasselgren G, Olsson B, Cvek M (1988):

Effects of calcium hydroxide and sodium hypochlorite on the dissolution of necrotic porcine muscle tissue.

J Endod 14, 125–127

Heidemann D, Hülsmann M, Petschelt A, Raab W, Schäfer E, Weiger R (2005):

Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung.

Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und DGZ.

Dtsch Zahnärztl Z 60, 8

Heithersay GS (1970):

Stimulation of root formation in incompletely developed pulpless teeth.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 29, 620-630

Heithersay GS (1975):

Calcium hydroxide in the treatment of pulpless teeth with associated pathology.

J Br Endod Soc 8, 74–93

Himel VT, Ahmed KM, Wood DM, Alhadainy HA (1995):

An evaluation of nitinol and stainless steel files used by dental students during a laboratory proficiency exam.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 79, 232-237

---

Hin ES, Wu MK, Wesselink PR, Shemesh H (2013):

Effects of Self-Adjusting File, Mtwo, and ProTaper on the Root Canal Wall.

J Endod 39, 262-264

Hof R, Perevalov V, Eltanani M, Zary R, Metzger Z (2010):

The self-adjusting file (SAF). Part 2: mechanical analysis.

J Endod 36, 691-696

Hülsmann M:

Die maschinelle Aufbereitung des Wurzelkanals.

In: Endodontie, hrsg. v. d. Akademie Praxis und Wissenschaft.

Hanser-Verlag, München 1993, S. 63-96

Hülsmann M (1997):

Die Wurzelkanalspülung - Ziele, Mittel und Techniken.

Endodontie 6, 47-62

Hülsmann M:

Die Aufbereitung des Wurzelkanals.

in: Endodontie; Hrsg. Heidemann D.

Urban & Fischer, München 2001. S. 80-116

Hülsmann M (2004):

Die Anwendung elektrophysikalisch-chemischer Methoden in der Endodontie.

Zahnärztliche Welt/Reform 3, 85-96

Hülsmann M (2006):

Die Desinfektion des endodontischen Systems.

Endodontie 15, 147-170

Hülsmann M:

Wurzelkanalpräparation

In: Checklisten der Zahnmedizin Endodontie

Thieme-Verlag, Stuttgart 2008a, S.122-146

Hülsmann M:

Desinfektion des endodontischen Systems

In: Checklisten der Zahnmedizin Endodontie

Thieme-Verlag, Stuttgart 2008b, S. 147-155

Hülsmann M, Hahn W (2000):

Complications during root canal irrigation - literature review and case reports.

Int Endod J 33, 186–193

Hülsmann M, Rümmelin C, Schäfers F (1997):

Root canal cleanliness after preparation with different endodontic handpieces and hand instruments: a comparative SEM investigation.

J Endod 23, 301-306

Hülsmann M, Schade M, Schäfers F (2001):

A comparative study of root canal preparation with HERO 642 and Quantec SC rotary NiTi-instruments.

Int Endod J 34, 538-546

Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH (2005):

Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means.

Endodontic Topics 10, 30-76

Huque J, Kota K, Yamaga M, Iwaku M, Hoshino E (1998):

Bacterial eradication from root dentine by ultrasonic irrigation with sodium hypochlorite.

Int Endod J 31, 242-250

---

Itoh A, Higuchi N, Minami G, Yasue T, Yoshida T, Maseki T, Nakamura H (1999):

A survey of filling methods, intracanal medications, and instrument breakage.

J Endod 25, 823–824

Jiang LM, Verhaagen B, Versluis M, van der Sluis LWM (2010):

Influence of the oscillation direction of an ultrasonic file on the cleaning efficacy of passive ultrasonic irrigation.

J Endod 36, 1372-1376

Jung M, Lommel D, Klimek J (2005):

The imaging of root canal obturation using micro-CT.

Int Endod J 38, 617-626

Kaja C, Altundasar E, Tuncel B, Serper A (2011):

Effects of volume and application time of EDTA for removing calcium hydroxide from root canals ex vivo.

Int End J 44, 1176-1221

Kenee DM, Allemang JD, Johnson JD, Hellstein J, Nichol BK (2006):

A quantitative assessment of efficacy of various calcium hydroxide removal techniques.

J Endod 32, 563–565

Kuga (2010):

Calcium hydroxide intracanal dressing removal with different rotary instruments and irrigating solutions: a scanning electron microscopy study.

Braz Dent J 21, 310-314

Lambrianidis T, Margelos J, Beltes P (1999):

Removal efficiency of calcium hydroxide dressing from the root canal.

J Endod 25, 85–88

---

Lambrianidis T, Kosti E, Boutsoukis C, Mazinis M (2006):

Removal efficacy of various calcium hydroxide/chlorhexidine medicaments from the root canal.

Int Endod J 39, 55–61

Law A, Messer H (2004):

An evidence-based analysis of the antibacterial effectiveness of intracanal medicaments.

J Endod 30, 689–694

Lee S, Wu M, Wesselink PR (2004):

The efficacy of ultrasonic irrigation to remove artificially placed dentine debris from different-sized simulated plastic root canals.

Int Endod J 37, 607–612

Lin J, Shen Y, Haapsalo M (2013):

A comparative study of biofilm removal with hand, rotary nickel-titanium, and self-adjusting file instrumentation using a novel in vitro biofilm model.

J Endod 39, 658-663

Lumley PJ, Walmsley AD, Walton RE, Rippin JW (1993):

Cleaning of oval canals using ultrasonic or sonic instrumentation.

J Endod 19, 453–457

Macedo RG, Verhaagen B, Wesselink PR, Versluis M, van der Sluis LWM (2013):

Influence of refreshment/activation cycles and temperature rise on the reaction rate of sodium hypochlorite with bovine dentine during ultrasonic activated irrigation.

Int Endod J 46, 1-8

Mader C, Baumgartner JC, Peters DD (1984):

Scanning electron microscopic investigation of the smeared layer on root canal walls.

J Endod 10, 477-483

---

Margelos J, Eliades G, Verdelis C, Palaghias G (1997):

Interaction of calcium hydroxide with zinc oxide-eugenol type sealers: a potential clinical problem.

J Endod 23, 43–48

Melo da Silva J, Silveira A, Santos E, Prado L, Pessoa OF (2011):

Efficacy of sodium hypochlorite, ethylenediaminetetraacetic acid, citric acid and phosphoric acid in calcium hydroxide removal from the root canal: a microscopic cleanliness evaluation.

Oral Surg Oral Med oral Pathol oral Radiol Endod 112, 820-824

Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R (2010a):

The self-adjusting file (SAF). Part 1: respecting the root canal anatomy-a new concept of endodontic files and its implementation.

J Endod 36, 679-690

Metzger Z, Zary R, Cohen R, Teperovich E, Paqué F (2010b):

The quality of root canal preparation and obturation in canals treated with rotary versus self-adjusting files: A three-dimensional micro-computed tomography study.

J Endod 36, 1569–1573

Metzger Z, Teperovich E, Cohen R, Zary R, Paqué F, Hülsmann M (2010c):

The self-adjusting file (SAF). Part 3: removal of „debris“ and „smear layer“ - A scanning electron microscope study.

J Endod 36, 697-702

Metzler RS, Montgomery S (1989):

The effectiveness of ultrasonics and calcium hydroxide for the debridement of human mandibular molars.

J Endod 15, 373-378

Mizrahi SJ, Tucker JW, Seltzer S (1975):

A scanning electron microscopic study of the efficacy of various endodontic instruments.

J Endod 1, 324-333

Mohammadi Z, Dummer PMH (2011):

Properties and applications of calcium hydroxide in endodontics and dental traumatology.

Int Endod J 44, 97-730

Nair PNR (2004):

Pathogenesis of apical periodontitis and the causes of endodontic failures.

Crit Rev Oral Biol Med 15, 348-381

Nair PNR, Sjögren U, Krey G, Kahnberg KE, Sundqvist G (1990):

Intraradicular bacteria and fungi in root-filled, asymptomatic human teeth with therapy-resistant periapical lesions: a long-term light and electron microscopic follow-up study.

J Endod 16, 580-588

Nakamura VC, Cai S, Candeiro GTM, Ferrari PH, Caldeira CL, Gavini G (2013):

Ex vivo evaluation of the effects of several root canal preparation techniques and irrigation regimens on a mixed microbial infection.

Int Endod J 46, 217-224

Nandini S, Velmurugan N, Kandaswamy D (2006):

Removal efficiency of calcium hydroxide intracanal medicament with two calcium chelators: volumetric analysis using spiral CT, an in vitro study.

J Endod 32, 1097–1101

Ørstavik D, Kerekes K, Molven O (1991):

Effects of extensive apical reaming and calcium hydroxide dressing on bacterial infection during treatment of apical periodontitis: a pilot study.

Int Endod J 24, 1–7

Paiva SSM, Siqueira JF, Rôças IN, Carmo FL, Ferreira DC, Curvelo JAR, Soares RMA, Rosado AS (2012):

Supplementing the antimicrobial effects of chemomechanical debridement with either passive ultrasonic irrigation or a final rinse with chlorhexidine: a clinical study.

J Endod 38, 1202-1206

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.

J Endod 37, 517-521

Paqué F, Ganabl D, Peters OA (2009):

Effects of root canal preparation on apical geometry assessed by micro-computed tomography.

J Endod 35, 1056-1059

Paqué F, Balmer M, Attin T, Peters OA (2010):

Preparation of oval shaped root canals in mandibular molars using nickel-titanium rotary instruments: a micro-computed tomography study.

J Endod 36, 703-707

Paranjpe A, de Gregorio C, Gonzalez AM, Gomez A, Herzog DS, Pina AA, Cohenca N (2012):

Efficacy of the self-adjusting file system on cleaning and shaping oval canals: a microbiological and microscopic evaluation.

J Endod 38, 226-231

Peters OA (2004):

Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems.

J Endod 30, 559-567

Peters OA, Paqué F (2011):

Root canal preparation of maxillary molars with the self-adjusting file: a micro-computed tomography study.

J Endod 37, 53-57

Peters OA, Laib A, Rügsegger P, Barbakow F (2000):

Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography.

J Dent Res 79, 1405-1409

Peters OA, Schöneberger K, Laib A (2001):

Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro-computed tomography.

Int Endod J 34, 221-230

Peters OA, Peters CL, Schöneberger K, Barbakow F (2003):

ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT.

Int Endod J 36, 86-92

Peters OA, Boessler C, Paqué F (2010):

Root canal preparation with a novel nickel-titanium instrument evaluated with micro-computed tomography: canal surface preparation over time.

J Endod 36, 1068-1072

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.

J Endod 21, 124-127

Ponti TM, McDonald NJ, Kuttler S, Strassler HE, Dumsha TC (2002):

Canal-centering ability of two rotary file systems.

J Endod 28, 283-286

Portenier I, Lutz F, Barbakow F (1998):

Preparation of the apical part of the root canal by the Lightspeed and step-back techniques.

Int Endod J 31, 103-111

Rangel S, Cremonese R, Bryant S, Dummer P (2005):

Shaping ability of RaCe rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals.

J Endod 31, 460-463

Ricucci D, Langeland K (1997):

Incomplete calcium hydroxide removal from the root canal: a case report.

Int Endod J 30, 418-421

Rôças IN, Siqueira JF (2011):

In vivo antimicrobial effects of endodontic treatment procedures as assessed by molecular microbiologic techniques.

J Endod 37, 304-310

Rödig T, Hülsmann M (2006):

Applikation und Entfernung der medikamentösen Einlage.

Endodontie 15, 379–385

Rödig T, Hülsmann M, Mühge M, Schäfers F (2002):

Quality of preparation of oval distal root canals in mandibular molars using nickel-titanium instruments.

Int Endod J 35, 919-928

Rödig T, Sedghi M, Konietschke F, Lange K, Ziebolz D, Hülsmann M (2010a):

Efficacy of syringe irrigation, RinsEndo and passive ultrasonic irrigation in removing debris from irregularities in root canals with different apical sizes.

Int Endod J 43, 581–589

Rödig T, Bozkurt M, Konietschke F, Hülsmann M (2010b):

Comparison of the vibringe system with syringe and passive ultrasonic irrigation in removing debris from simulated root canal irregularities.

J Endod 36, 1410-1413

Rödig T, Vogel S, Zapf A, Hülsmann M (2010c):

Efficacy of different irrigants in the removal of calcium hydroxide from root canals.

Int Endod J 43, 519–527

Rödig T, Hirschleb M, Zapf A, Hülsmann M (2011):

Comparison of ultrasonic irrigation and RinsEndo for the removal of calcium hydroxide and ledermix paste from root canals.

Int Endod J 44, 1155-1161

Roggendorf MJ, Legner M, Ebert J, Fillery E, Frankenberger R, Friedman S (2010):

Micro-CT evaluation of residual material in canals filled with Active GP or Guttaflow following removal with NiTi instruments.

Int Endod J 43, 200-209

Ruckmann JE, Whitten B, Sedgley CM, Svec T (2013):

Comparison of the self-adjusting file with rotary and hand instrumentation in long-oval-shaped root canals.

J Endod 39, 92-95

Sabins RA, Johnson JD, Hellstein JW (2003):

A comparison of the cleaning efficacy of short-term sonic and ultrasonic passive irrigation after hand instrumentation in molar root canals.

J Endod 29, 674–678

---

Salgado RJC, Moura-Netto C, Yamazaki AK, Cardoso LN, Moura AAM de, Prokopowitsch I (2009):

Comparison of different irrigants on calcium hydroxide medication removal: microscopic cleanliness evaluation.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 107, 580–584

Sim TPC, Knowles JC, Ng YL, Shelton J, Gulabivala K (2001):

Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain.

Int Endod J 34, 120-132

Siqueira JF (2001):

Aetiology of root canal treatment failure: why well-treated teeth can fail.

Int Endod J 34, 1-10

Siqueira JF, Lopes HP (1999):

Mechanisms of antimicrobial activity of calcium hydroxide: a critical review.

Int Endod J 32, 361–369

Siqueira JF, Lopes HP (2002):

Kalziumhydroxid als antimikrobielle Einlage in der Endodontie - Wirkungsmechanismen, Vorteile und Grenzen.

Endodontie 11, 222–347

Siqueira JF, Rôças IN (2008):

Clinical implications and microbiology of bacterial persistence after treatment procedures.

J Endod 34, 1291-1301.e3

Siqueira JF, Araújo MCP, Garcia PF, Fraga RC, Dantas CJS (1997a):

Histological evaluation of the effectiveness of five instrumentation techniques for cleaning the apical third of root canals.

J Endod 23, 499-502

Siqueira JF, Machado AG, Silveira RM, Lopes HP, Uzeda M de (1997b):

Evaluation of the effectiveness of sodium hypochlorite used with three irrigation methods in the elimination of *Enterococcus faecalis* from the root canal, in vitro.

Int Endod J 30, 279–282

Siqueira JF, Lima KC, Magalhães FA, Lopes HP, Uzeda M de (1999):

Mechanical reduction of the bacterial population in the root canal by three instrumentation techniques.

J Endod 25, 332–335

Siqueira JF, Guimarães-Pinto T, Rôças IN (2007):

Effects of chemomechanical preparation with 2.5% sodium hypochlorite and intracanal medication with calcium hydroxide on cultivable bacteria in infected root canals.

J Endod 33, 800-805

Siqueira JF Jr, Alves FR, Almeida BM, de Oliveira JC, Rôças IN (2010):

Ability of chemomechanical preparation with either rotary instruments or Self Adjusting File to disinfect oval-shaped root canals.

J Endod 36, 1860-1865

Sjögren U, Sundqvist G (1987):

Bacteriologic evaluation of ultrasonic root canal instrumentation.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 63, 366–370

Slutzky-Goldberg I, Maree M, Liberman R, Heling I (2004):

Effect of sodium hypochlorite on dentin microhardness.

J Endod 30, 880-882

Solomonov M (2011):

Eight months of clinical experience with the self-adjusting file system.

J Endod 37, 881-887

Solomonov M, Paqué F, Fan B, Eilat Y, Berman LH (2012a):

The challenge of c-shaped canal systems: a comparative study of the self-adjusting file and ProTaper.

J Endod 38, 209-214

Solomonov M, Paqué F, Kaya S, Adiguzel Ö, Kfir A, Yigit-Özer S (2012b):

Self-adjusting Files in retreatment: a high resolution micro-computed tomography study.

J Endod 38, 1283-1287

Spångberg L, Langeland K (1973):

Biologic effects of dental materials. 1. Toxicity of root canal filling materials on HeLa cells in vitro.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 35, 402–414

Spoleti P, Siragusa M, Spoleti MJ (2003):

Bacteriological evaluation of passive ultrasonic activation.

J Endod 29, 12-14

Svec TA, Harrison JW (1977):

Chemomechanical removal of pulpal and dentinal debris with sodium hypochlorite and hydrogen peroxide vs normal saline solution.

J Endod 3, 49-53

Taşdemir T, Celik D, Er K, Yildirim T, Ceyhanli KT, Yeşilyurt C (2011):

Efficacy of several techniques for the removal of calcium hydroxide medicament from root canals.

Int Endod J 44, 505–509

Torabinejad M, Handysides R, Khademi AA, Bakland LK, Linda L (2002):

Clinical implications of the smear layer in endodontics: A review

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 94, 658-666

Türkün M, Cengiz T (1997):

The effects of sodium hypochlorite and calcium hydroxide on tissue dissolution and root canal cleanliness.

Int Endod J 30, 335-342

van der Sluis LWM, Wu MK, Wesselink PR (2005a):

A comparison between a smooth wire and a K-file in removing artificially placed dentine debris from root canals in resin blocks during ultrasonic irrigation.

Int Endod J 38, 593-596

van der Sluis LWM, Wu MK, Wesselink PR (2005b):

The efficacy of ultrasonic irrigation to remove artificially placed dentine debris from human root canals prepared using instruments of varying taper.

Int Endod J 38, 764–768

van der Sluis LWM, Gambarini G, Wu MK, Wesselink PR (2006):

The influence of volume, type of irrigant and flushing method on removing artificially placed dentine debris from the apical root canal during passive ultrasonic irrigation.

Int Endod J 39, 472–476

van der Sluis LWM, Wu MK, Wesselink PR (2007a):

The evaluation of removal of calcium hydroxide paste from an artificial standardized groove in the apical root canal using different irrigation methodologies.

Int Endod J 40, 52–57

van der Sluis LWM, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR (2007b):

Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature.

Int Endod J 40, 415–426

Versiani MA, Pécora JD, de Sousa-Neto MD (2011):

Flat oval root canal preparation with self-adjusting file instrument: a micro-computed tomography study.

J Endod 37, 1002-1007

Versümer J, Hülsmann M, Schäfers F (2002):

A comparative study of root canal preparation using ProFile.04 and Lightspeed rotary instruments.

Int Endod J 35, 37-46

Walia H, Brantley WA, Gerstein H (1988):

An initial investigation of the bending and torsional properties of nitinol root canal files.

J Endod 14, 346-351

Walmsley AD (1987):

Ultrasound and root canal treatment: the need for scientific evaluation.

Int Endod J 20, 105–111

Wiseman A, Cox TC, Paranjpe A, Flake NM, Cohenca N, Johnson JD (2011):

Efficacy of sonic and ultrasonic activation for removal of calcium hydroxide from mesial canals of mandibular molars: a microtomographic study.

J Endod 37, 235–238

Wu MK, Wesselink PR (2001):

A primary observation on the preparation and obturation of oval canals.

Int Endod J 34, 137-141

Wu MK, R'oris A, Barkis D, Wesselink PR (2000):

Prevalence and extent of long oval canals in the apical third.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 89, 739-743

Wu MK, van der Sluis LWM, Wesselink PR (2003):

The capability of two hand instrumentation techniques to remove the inner layer of dentine in oval canals.

Int Endod J 36, 218–224

Yang SF, Rivera EM, Baumgartner KR, Walton RE, Stanford C (1995):

Anaerobic tissue-dissolving abilities of calcium hydroxide and sodium hypochlorite.

J Endod 21, 613-616

Yigit Özer S, Adiguzel Ö, Kaya S (2011):

Removal of debris and smear layer in curved root canals using self-adjusting file with different operation times - a scanning electron microscope study.

Int J Dent Res 1, 1-6

Yoldas O, Yilmaz S, Atakan G, Kuden C, Kasan Z (2012):

Dentinal microcrack formation during root canal preparations by different NiTi rotary instruments and the self-adjusting File.

J Endod 38, 232-235

Zehnder M (2006):

Root canal irrigants.

J Endod 32, 389–398

Zmener O, Pameijer CH, Banegas G (2005):

Effectiveness in cleaning oval-shaped root canals using anatomic endodontic technology, ProFile and manual instrumentation: a scanning electron microscopic study.

Int Endod J 38, 356-363

Zmener O, Pameijer CH, Alvarez Serrano S, Hernandez SR (2011):

Cleaning efficacy using two engine-driven systems versus manual instrumentation in curved root canals: a scanning electron microscopic study.

J Endod 37, 1279-1282

**Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. dent. Michael Hülsmann für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas. Die außerordentlich engagierte und zuverlässige Betreuung und Unterstützung sowie gründliche Korrekturen der Promotionsarbeit trugen maßgeblich zu deren erfolgreicher Beendigung bei.

Mein Dank gilt Herrn Dipl.-Phys. Christian Dullin aus der Abteilung Diagnostische Radiologie der Universitätsmedizin Göttingen für die freundliche Einweisung und Hilfestellung bei der Arbeit am Micro-CT.

Für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung danke ich Herrn Simon Schröder aus der Abteilung Medizinische Statistik der Universität Göttingen.

**Lebenslauf**

Am 14.10.1987 wurde ich als drittes Kind der Eheleute Bernd-Wolfgang und Gabriele Adler in Essen geboren.

Meine Schullaufbahn begann im August 1994 in der Schubert-Grundschule in Dortmund, im Sommer 1998 wechselte ich auf das Mallinckrodt-Gymnasium/Dortmund. Hier erhielt ich am 16.06.2007 mein Zeugnis der Allgemeinen Hochschulreife.

Im Oktober 2007 begann ich das Studium der Zahnmedizin an der Georg-August Universität in Göttingen. Nach erfolgreich abgelegten Prüfungen im Staatsexamen, beendete ich das Studium der Zahnmedizin am 26.11.2012 mit der Note sehr gut. Meine Approbation erhielt ich am 21. Januar 2013.

In den darauf folgenden zwei Promotionssemestern beendete ich die Arbeiten an meiner Dissertationsarbeit und begann am 1. Oktober 2013 mit meiner Tätigkeit als Vorbereitungsassistentin in der Praxis Zahnärzte Bergstraße in der Hansestadt Rostock, wo ich bis heute tätig bin.