

Aus der Abteilung Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie  
(Komm. Leiter: Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann)  
im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Eine vergleichende In-vitro-Studie zur maschinellen  
Wurzelkanalpräparation mit den Nickel-Titan-Systemen  
S5, Mtwo und ProTaper Universal**

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

vorgelegt von  
Friederike Linßen  
aus  
Mülheim an der Ruhr

Göttingen 2013

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

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

II. Berichterstatter/in: Priv.-Doz. Dr. med. dent. Gersdorff

III. Berichterstatter/in:

Tag der mündlichen Prüfung: 11.06.2013

1. Einleitung .....	5
2. Literaturübersicht.....	6
2.1 Definition und Indikation einer Wurzelkanalbehandlung.....	6
2.2 Anatomie und Morphologie des Wurzelkanals .....	6
2.3 Die Wurzelkanalpräparation .....	8
2.3.1 Ziele.....	8
2.3.2 Formgebung .....	8
2.3.3 Reinigung und Desinfektion .....	9
2.3.4 Manuelle und Maschinelle Wurzelkanalpräparation.....	10
2.3.4.1 Manuelle Wurzelkanalpräparation .....	10
2.3.4.2 Maschinelle Wurzelkanalpräparation .....	11
2.4 Der gekrümmte Wurzelkanal.....	11
2.4.1 Die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle .....	12
2.4.2 Präparationstechniken .....	12
2.5 Präparationsfehler .....	14
2.6 Maschinelle Präparationssysteme.....	16
2.6.1 Entwicklung von Präparationssystemen aus Nickel-Titan-Legierungen. 16	
2.6.2 Eigenschaften von Aufbereitungssystemen aus Nickel-Titan-Legierungen.....	17
2.6.3 Aktuelle Nickel-Titan-Systeme .....	18
2.7 Die untersuchten Präparationssysteme.....	21
2.7.1 S5 .....	21
2.7.2 S5 – Bisherige Untersuchungen .....	22
2.7.3 Mtwo .....	22
2.7.4 Mtwo – Bisherige Untersuchungen .....	24
2.7.5 ProTaper Universal.....	27
2.7.6 ProTaper Universal – Bisherige Untersuchungen.....	29
3. Ziele der Arbeit.....	31
4. Material & Methodik.....	32
4.1 Auswahl der Zähne .....	32
4.2 Vorläufige Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung.....	32
4.3 Das Küvettensystem .....	33
4.4 Einbetten der Zähne.....	34
4.5 Präoperative Röntgenaufnahmen.....	35
4.6 Bestimmung der Ausgangswinkel und Ausgangsradien.....	36
4.7 Einteilung der Versuchsgruppen .....	37
4.8 Versuchsdurchführung .....	37
4.8.1 Präparation mit dem S5-System .....	38
4.8.2 Präparation mit dem Mtwo-System.....	39
4.8.3 Präparation mit dem ProTaper Universal-System.....	40
4.8.4 Präparation des mesiobukkalen Wurzelkanals .....	41
4.8.5 Präparation des mesiolingualen Wurzelkanals .....	41
4.9 Postoperative Röntgenaufnahmen .....	43
4.10 Herstellung der Präparate für die elektronenmikroskopische Auswertung .	43
4.11 Auswertung .....	44
4.11.1 Veränderung des Krümmungswinkels .....	44
4.11.2 Beurteilung des Wurzelkanalquerschnitts .....	44

4.11.3 Rasterelektronenmikroskopische Auswertung .....	45
4.11.4 Messung der Arbeitszeit .....	50
4.11.5 Arbeitssicherheit .....	50
4.11.6 Statistische Auswertung .....	50
5. Ergebnisse .....	52
5.1 Wurzelkanalbegradigung.....	52
5.2 Beurteilung des Wurzelkanalquerschnitts .....	60
5.2.1 Qualitative Querschnittsbeurteilung .....	60
5.2.2 Quantitative Querschnittsbeurteilung.....	62
5.3 Rasterelektronenmikroskopische Auswertung .....	63
5.3.1 Smear Layer .....	64
5.3.2 Debris .....	66
5.4 Zeitaufwand.....	67
5.5 Arbeitssicherheit.....	70
6. Diskussion.....	72
6.1 Diskussion der Methode.....	72
6.1.1 Auswahl der Präparate .....	72
6.1.2 Wurzelkanalbegradigung und Veränderung des Krümmungsradius.....	73
6.1.3 Auswertung der Wurzelkanalquerschnitte .....	74
6.1.4 Rasterelektronenmikroskopische Auswertung .....	74
6.1.5 Zeitaufwand .....	75
6.2 Diskussion der Ergebnisse.....	76
6.2.1 Wurzelkanalbegradigung .....	76
6.2.2 Querschnittsveränderungen.....	77
6.2.3 Materialabtrag.....	79
6.2.4 Sauberkeit der Wurzelkanalwände .....	79
6.2.5 Zeitaufwand .....	80
6.2.6 Arbeitssicherheit .....	81
6.2.7 Abschließende Bewertung .....	83
7. Zusammenfassung.....	84
8. Literaturverzeichnis .....	86
9. Anhang.....	102
9.1 Verwendete Geräte und Materialien.....	102
9.2 Arbeitsbögen .....	104

## 1. Einleitung

Die Zahnerhaltung und die Prophylaxe stellen die Behandlungsschwerpunkte im klinischen Alltag der Zahnärzte dar. Das Ziel der Anstrengungen ist es, die eigenen Zähne so lange wie möglich zu erhalten und Extraktionen mit folgendem Zahnersatz zu vermeiden. Kommt es dennoch zu einer fortgeschrittenen Destruktion des Zahnes und einer irreversiblen Schädigung der Pulpa, gilt die Wurzelkanalbehandlung als letzte therapeutische Maßnahme, um einen Zahn zu erhalten.

Die Endodontie, welche sich mit der Anatomie, der Funktion sowie der Gesundheit der Pulpa, aber auch der Behandlung von Zähnen mit nicht mehr erhaltungswürdiger Pulpa befasst (*Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006*), gehört zu den ältesten Fachgebieten der Zahnmedizin.

Bei den Wurzelkanälen eines Zahnes handelt es sich um ein komplex-verzweigtes System aus den Hauptkanälen und zusätzlichen Seitenkanälen, Nischen und Buchten. Daher gestalten sich die Reinigung, Desinfektion und Präparation als eine anspruchsvolle Aufgabe für den behandelnden Zahnarzt. Über eine lange Zeit hinweg galt hierbei der Einsatz von Handinstrumenten aus Stahl als das Mittel der Wahl, bis im Jahre 1958 im Naval Ordnance Laboratory (Silver Spring, Maryland, USA) eine Legierung aus Nickel und Titan entwickelt wurde.

In der Endodontie wurde dieser Werkstoff erstmalig 1988 durch *Walia et al.* eingeführt. Die Qualität einer endodontischen Therapie hat sich durch die Einführung des Werkstoffs verbessert, so können bei der Verwendung von Nickel-Titan-Instrumenten die anatomische Form des Wurzelkanals besser bewahrt und die Inzidenz von Komplikationen reduziert werden. Vorteil der Feilen aus Nickel-Titan ist vor allem die erhöhte Flexibilität, sodass es möglich ist, gekrümmte Wurzelkanäle suffizient zu präparieren. Mittlerweile wurde eine Vielzahl von Systemen entwickelt, die sich hinsichtlich der Zusammensetzung der Nickel-Titan-Legierung sowie der Geometrie der Feilen unterscheiden.

In der vorliegenden Untersuchung werden drei maschinelle Präparationssysteme aus Nickel-Titan in In-vitro-Versuchen unter standardisierten Bedingungen miteinander verglichen und auf ihre klinische Tauglichkeit geprüft.

## 2. Literaturübersicht

### 2.1 Definition und Indikation einer Wurzelkanalbehandlung

In ihrem Konsenspapier „Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlungen“ beschreibt die *Europäische Gesellschaft für Endodontologie* die Endodontologie als den Teilbereich der Zahnheilkunde, der sich mit der Anatomie, der Funktion sowie der Gesundheit der Pulpa und der periradikulären Gewebe befasst. Das Fach umfasst die Prävention und Therapie von Pulpaerkrankungen, die Wurzelkanalbehandlung und die Therapie endodontischer Misserfolge (*Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006*).

Als Indikationen für eine Wurzelkanalbehandlung werden angegeben:

- Bei Patienten, bei denen andere zahnärztliche Maßnahmen durchgeführt werden können, ist grundsätzlich eine Wurzelkanalbehandlung möglich (*Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006*).
- Eine irreversibel geschädigte oder nekrotische Pulpa, bei der das periradikuläre Gewebe beteiligt sein kann (*Hellwig et al. 2009*).
- Eine intentionelle Devitalisation, wenn der Zustand der Pulpa vor weiteren zahnärztlichen Maßnahmen fraglich ist (*Hellwig et al. 2009*).
- Wurzelkanalbehandelte Zähne, bei denen die Wurzelkanalbehandlung der Prävention oder Therapie eines Therapiemisserfolgs oder einer post-endodontischen Erkrankung dient (*Hülsmann 2008*).

### 2.2 Anatomie und Morphologie des Wurzelkanals

Schon zu Beginn des 19. Jahrhunderts erschienen erste Veröffentlichungen zu Untersuchungen der Anatomie der Wurzelkanäle. So berichtet *Fischer (1907)* von starken Verzweigungen der Wurzelkanäle sowie Unterschieden hinsichtlich der Kanalmorphologie zwischen den verschiedenen Zahntypen. Die Beschreibung des Wurzelkanals als ein komplexes System mit vielen Verzweigungen und Vernetzungen, Seitenkanälchen und Ramifikationen sowie unregelmäßig geformten apikalen Foramina ist in zahlreichen Studien (*Meyer W 1970, Davis et al. 1972*) zu finden. 94,6% der ersten unteren Molaren weisen zwei mesiale und eine distale Wurzel auf. In 5,3% der Fälle ist eine zusätzliche

distolinguale Wurzel vorhanden. 64% dieses Zahntyps weisen drei, 36% vier Wurzelkanäle auf (*Chourasia et al. 2012*). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Unterkiefer-Molar fünf Wurzelkanäle hat, liegt nach den Untersuchungen von *Poorni et al. (2009)* bei 1% bis 15%.

Bei Zähnen mit gekrümmten Kanälen treten Krümmungen zervikal, im mittleren Drittel und im apikalen Bereich auf. Die Krümmungen verlaufen zusätzlich in vier verschiedene Richtungen (distal, mesial, bukkal und lingual). Alle Wurzelkanäle weisen in unterschiedlicher Ausprägung eine konische Verlaufsform auf, welche dann vornehmlich in den beiden koronalen Dritteln ausgebildet ist (*Pineda & Kuttler 1972*). Die Verlaufsform der Wurzelkanäle präsentiert sich zumeist sehr individuell. Die Einteilung der unterschiedlichen Verlaufsformen von *Vertucci (1984)* hat sich bis heute etabliert:

- Typ I: Ein Wurzelkanal verläuft vom Pulpakavum zum Apex
- Typ II: Zwei vom Pulpakavum aus voneinander getrennt verlaufende Wurzelkanäle vereinigen sich im apikalen Abschnitt
- Typ III: Ein Wurzelkanal, welcher sich innerhalb der Wurzel teilt und sich kurz vor der Wurzelspitze wieder zu einem Wurzelkanal vereint
- Typ IV: Zwei separate Wurzelkanäle, die getrennt voneinander zum Apex verlaufen
- Typ V: Ein das Pulpakavum verlassender Wurzelkanal, welcher sich kurz vor dem Apex aufteilt und zwei apikale Foramina aufweist
- Typ VI: Zwei einzelne Wurzelkanäle, die sich in der Wurzel vereinigen und vor der Wurzelspitze wieder in zwei Wurzelkanäle teilen
- Typ VII: Ein Wurzelkanal verlässt das Pulpakavum, teilt sich und vereinigt sich innerhalb der Wurzel, bevor er sich kurz vor dem Apex nochmals verzweigt
- Typ VIII: Drei separate Wurzelkanäle.

Hinsichtlich der Verlaufsform des Wurzelkanals finden sich verschiedene Angaben: *Pineda & Kuttler (1972)* berichten über 3,1% der Wurzelkanäle, welche gerade nach apikal verlaufen. *Cunningham & Senia (1992)* kommen zu dem Ergebnis, dass alle Zähne eine Krümmung des Wurzelkanals aufweisen, wohingegen *Voss (1995)* die Zahl der Zähne mit gekrümmten Wurzelkanalverläufen auf ungefähr 90% beziffert.

### 2.3 Die Wurzelkanalpräparation

Im Rahmen einer endodontischen Behandlung stellt die Präparation des Wurzelkanals einen entscheidenden Therapieschritt dar. Die Präparation umfasst nicht nur die Formgebung, sondern auch die Reinigung und Desinfektion des komplexen Wurzelkanalsystems (*Meyer G 1991, Rödiger 2009*).

#### 2.3.1 Ziele

- Eine möglichst vollständige Entfernung des vitalen oder nekrotischen Pulpagewebes aus dem Wurzelkanal
- Eliminierung der Mikroorganismen, sodass ein Zustand der möglichst hohen Keimarmut erreicht wird
- Ausreichende chemische Desinfektion
- Entfernung von Debris
- Das Erreichen einer adäquaten Formgebung, um eine suffiziente Wurzelkanalfüllung bis zum Foramen physiologicum gewährleisten zu können
- Bestmöglicher Erhalt der Zahnhartsubstanz und der Wurzelkanalkrümmung

(*Meyer G 1991, Barthel et al. 1999, Schäfer et al. 2000, Europäische Gesellschaft für Endodontologie 2006, Hülsmann 2008, Rödiger 2009*).

#### 2.3.2 Formgebung

Die Wurzelkanalpräparation als ein kombinierter chemo-mechanischer Vorgang umfasst neben der Reinigung des Wurzelkanals seine Formgebung (*Schäfer &*



*Zapke 2000*). Durch die Präparation soll das bizarre Kanalsystem in einen möglichst regelmäßigen Kanal mit gereinigten und geglätteten Wurzelkanalwänden überführt werden. Die mechanische Erweiterung soll sich von den Wurzelkanaleingängen bis zum physiologischen Foramen fortsetzen, sodass auch im apikalen Drittel eine ausreichende Aufbereitung erfolgt. Die Ziele der Formgebung sind eine konische Gestaltung des Wurzelkanals in apikal-koronaler Richtung und eine Verengung des Kanallumens am Foramen physiologicum (*Kröncke 1981, Geurtsen 1990, Meyer G 1991*).

Die Anforderungen an eine optimale Formgebung formulierte *Schilder (1974)* in fünf Designregeln, welche sich bis heute bewährt haben:

- Gleichmäßige Verbreiterung von apikal nach koronal (continuous taper).
- Der Querschnitt muss an jedem weiter apikal gelegenen Punkt kleiner sein als koronal.
- Die Präparation sollte an allen Punkten dem Verlauf des Wurzelkanals folgen.
- Das apikale Foramen sollte nicht verlagert werden.
- Das apikale Foramen sollte so klein gehalten werden, wie es praktisch möglich erscheint.

Für die mechanische Wurzelkanalpräparation wird ein Sortiment verschieden geformter Instrumente benötigt. Die aktuell verwendeten Systeme bestehen aus Stahl oder Nickel-Titan-Legierungen, welche hinsichtlich der Elastizität, des Biegeverhaltens sowie der Fraktursicherheit unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Die Stahlinstrumente werden für die manuelle Wurzelkanalpräparation eingesetzt, wobei man bei der maschinellen Arbeitsweise die Wahl zwischen Stahl- und Nickel-Titan-Instrumenten hat (*Walia et al. 1988, Meyer G 1991*).

### 2.3.3 Reinigung und Desinfektion

Der Reinigung und Desinfektion des Wurzelkanals kommt im Rahmen der endodontischen Behandlung eine entscheidende Rolle zu, da die mechanische Präparation nicht alle Wurzelkanalwandbereiche erreicht und ungefähr ein Drittel der Oberfläche unbearbeitet bleibt (*Hülsmann 2006*). Mithilfe der Spülung sollen

im Rahmen der chemo-mechanischen Aufbereitung die Reinigung verbessert und die Keimanzahl im Wurzelkanal deutlich reduziert werden (*Hülsmann 2008, Drebenstedt 2009*). Neben der Desinfektion und der antibakteriellen Wirkung soll durch eine Spülung des Wurzelkanals erreicht werden, dass die bei der Präparation entstehenden Dentinspäne abtransportiert werden. Zusätzlich hat die Spüllösung die Funktion, organische und anorganische Partikel aufzulösen (*Stewart 1955, Hülsmann 2008*).

## 2.3.4 Manuelle und Maschinelle Wurzelkanalpräparation

### 2.3.4.1 Manuelle Wurzelkanalpräparation

An der Weiterentwicklung unterschiedlicher Instrumente für die Präparation eines Wurzelkanals wurde kontinuierlich gearbeitet. Bis in die 60er Jahre wurden Wurzelkanalinstrumente aus Karbonstählen hergestellt. Es folgten Feilen aus rostfreiem Edelstahl und seit 1988 gibt es Instrumente aus Nickel-Aluminium- und Nickel-Titan-Legierungen (*Hülsmann 2008*). Alle Feilen leiten sich ab von den drei Grundtypen Reamer, Hedström-Feilen und K-Feilen.

#### Hedström-Feilen

Diese Instrumente werden durch Fräsen aus runden Rohlingen hergestellt, sodass sich eine umlaufende Schneidekante ergibt. Im Gegensatz zu Reamern und K-Feilen sind die Hedström-Feilen frakturgefährdeter, da sie einen kleineren Kerndurchmesser haben. Hedström-Feilen besitzen die höchste Schneidleistung der Edelstahlinstrumente und eignen sich besonders gut für den Materialabtrag in einem gängigen Wurzelkanal. Sie sollen ausschließlich mit einer ziehenden und feilenden Bewegung eingesetzt werden.

#### Reamer

Reamer werden durch eine maschinelle Verdrillung hergestellt und haben – je nach Instrumentengröße – einen dreieckigen oder viereckigen Instrumentenquerschnitt. Aufgrund des stabilen Kerndurchmessers sind Reamer als bruchsicher anzusehen. Sie eignen sich zum Erschließen des Wurzelkanals und sollen in einer drehend-schabenden Arbeitsweise verwendet werden.

### K-Feilen

Diese Feilen werden ebenfalls durch Verwinden aus einem Rohling gefertigt. Im Vergleich zu einem Reamer verfügt eine K-Feile über mehr Windungen pro Millimeter. Der Schneidekantenwinkel ist ebenfalls vergrößert ( $25^\circ - 40^\circ$ ).

Der Instrumentenquerschnitt ist abhängig von der Größe der Feile drei- oder viereckig. Die Präparation soll in einer drehend-schabenden oder einer zirkulär feilenden Weise durchgeführt werden.

#### 2.3.4.2 Maschinelle Wurzelkanalpräparation

Die maschinelle Wurzelkanalpräparation begann mit der Entwicklung des ersten Winkelstücks im Jahr 1899 durch Rollins (*Hülsmann 2008*).

Durch neue Präparationssysteme, welche sich durch andere Instrumentendesigns und neue Funktionsweisen auszeichneten, wurde die maschinelle Wurzelkanalpräparation stetig weiterentwickelt, sodass sich die Systeme speziell für die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle eignen.

#### 2.4 Der gekrümmte Wurzelkanal

Aufgrund der großen anatomischen Variabilität zwischen den Wurzelkanälen gibt es nicht nur Unterschiede hinsichtlich der Anzahl und Größe der Wurzelkanäle, sondern auch in Bezug auf die Wurzelkanalkrümmung. Die aus dem Jahr 1971 stammende Einteilung der Krümmungen nach *Schneider* ist an vielen Stellen in der Literatur zu finden und gilt bis heute:

- $\leq 5^\circ$             annähernd gerader Wurzelkanal
- $10^\circ - 20^\circ$         mäßige Wurzelkanalkrümmung
- $25^\circ - 70^\circ$         starke Wurzelkanalkrümmung.

Die Bestimmung der Krümmung erfolgt mithilfe von Röntgenbildern. Dabei muss jedoch bedacht werden, dass es sich um ein dreidimensionales Wurzelkanalsystem handelt, welches auf einer zweidimensionalen Aufnahme dargestellt wird. Methoden zur Vermessung der Wurzelkanalkrümmung werden an späterer Stelle erläutert (Kap. 4.6, S. 36).

### 2.4.1 Die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle

Die Präparation eines gekrümmten Wurzelkanals stellt besondere Anforderungen an den Zahnarzt, da es schnell zu Komplikationen kommen kann. Eine Begradigung der Krümmung, ein Verlust der Arbeitslänge, eine Verlegung des Wurzelkanals, eine Perforation oder das Entstehen eines „Zip-Elbow-Effects“ können die Folgen sein (*Schneider 1971, Geurtsen 1990, Meyer G 1991*).

Je größer die Krümmung ist, desto schwieriger ist es, eine adäquate Präparation durchzuführen. *Meyer G (1991)* empfiehlt, zuerst den koronalen Bereich zu entschärfen und einen geradlinigen Eingang in den Wurzelkanal zu schaffen. Die Präparation in den koronalen zwei Dritteln sollte sich vornehmlich auf den der Furkation abgewandten Bereich der Wurzelkanalwand konzentrieren, sodass ein möglichst gerader Zugang zum apikalen Abschnitt erzielt werden kann. Mit der Verwendung von Instrumenten, die aus Nickel-Titan-Legierungen gefertigt werden, kann inzwischen der Effekt der Wurzelkanalbegradigung und der Verlagerung eines gekrümmten Wurzelkanals reduziert werden (*Hülsmann et al. 2005*).

### 2.4.2 Präparationstechniken

#### Die Standardisierte Technik

Die Standardisierte Technik der Wurzelkanalpräparation, welche von *Ingle (1961)* beschrieben wurde, sieht vor, dass alle Instrumente auf Arbeitslänge eingesetzt werden („Single-Length-Technik“). Die Präparation beginnt mit einer Feile der ISO-Größe 15, anschließend werden die Instrumente aufsteigender ISO-Größe der Reihe nach verwendet, bis die gewünschte Größe erreicht ist. Nachteilig bei dieser Methode ist die Friktion, welche die Instrumente über eine lange Distanz im Wurzelkanal haben, sodass die Gefahr einer Begradigung erhöht ist und die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle im apikalen Abschnitt erschwert wird (*Hülsmann 2008, Rödig 2009*). Für das in dieser Studie verwendete Präparationssystem *Mtwo* (VDW GmbH, München) empfiehlt der Hersteller die Anwendung der Standardisierten Technik.

#### Die Step-back-Technik

Eine Modifikation der Standardisierten Technik stellt die von *Clem (1969)* erstmals beschriebene Step-back-Technik dar. Es handelt sich um eine apikal-

koronale Technik, die sich speziell für die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle eignet (*Meyer G 1991, Hülsmann 2008*). Zuerst wird bis zu einer gewünschten ISO-Größe auf Arbeitslänge präpariert, anschließend folgt eine Stufenpräparation, bei der die Arbeitslänge sukzessiv verkürzt wird (1 mm pro Instrument). Um die Gängigkeit des gesamten Wurzelkanals zu wahren, muss nach der Verwendung jedes Instruments eine Rekapitulation mit einer dünneren Feile durchgeführt werden (*Rödig 2009*). Durch die Anwendung der Step-back-Technik kann eine zunehmende Konizität erreicht werden.

#### Die Crown-Down-Pressureless-Technik

Um einen Transport von Dentinspänen nach apikal zu vermeiden, entwickelten *Morgan & Montgomery (1984)* die Crown-Down-Pressureless-Technik. Durch das Anlegen eines breiten koronalen Zugangs sollen Debris und Dentinpartikel vom Ursprung des Wurzelkanals Richtung apikal entfernt werden (*Meyer G 1991*). Die Autoren empfehlen zu Beginn die Darstellung der Kanaleingänge und eine Präparation der koronalen zwei Drittel, um einen möglichst geradlinigen Zugang zum apikalen Drittel zu schaffen. Eine Feile der ISO-Größe 35 soll so weit in den Wurzelkanal eingebracht werden, bis ein Widerstand spürbar ist (ca. 16 mm). Anschließend soll ein Instrument der ISO-Größe 30 ebenfalls bis zu einem leichten Widerstand eingesetzt und 2-mal vollständig ohne apikalen Druck gedreht werden. Beginnend mit der ISO-Größe 25 erfolgt dieser Arbeitsschritt mit kleineren Instrumenten, bis die Arbeitslänge erreicht ist. Abschließend wird mit dickeren Feilen (ISO 40) von koronal nach apikal erweitert.

#### Die Balanced-force-Technik

Bei dieser Technik werden spezielle Feilen mit abgerundeter, nichtschneidender Spitze verwendet. Die Arbeitsweise ist eine rotierende Bewegung, bei der die Instrumente im Uhrzeigersinn in den Wurzelkanal hineingebracht und gegen den Uhrzeigersinn aus dem Wurzelkanal herausgezogen werden. Das Ziel dieser Methode ist der Erhalt der ursprünglichen Wurzelkanalform. Es können auch gekrümmte Wurzelkanäle bis zu größeren Größen (ISO 40) aufbereitet werden (*Roane et al. 1985*).

### Wurzelkanalpräparation mit einer Feile

Eine neue Präparationstechnik besteht darin, dass die gesamte Präparation mit einem einzigen Instrument durchgeführt wird. Wie bei den anderen Techniken ist ein geradliniger Zugang in den Wurzelkanal von großer Bedeutung. Die Aufbereitung erfolgt maschinell mit reziproken Bewegungen. Dabei wird die Nickel-Titan-Feile mit leichten Auf- und Abwärtsbewegungen in den Wurzelkanal eingebracht, bis sie die Arbeitslänge erreicht. Die Technik ist unabhängig von der Länge, dem Durchmesser und der Krümmung des Wurzelkanals. Vorteile dieser „Single-File-Technik“ sind eine verkürzte Arbeitszeit, die einfache Handhabung, eine gute Kosteneffektivität und die Vermeidung einer Kreuzkontamination (Yared 2008, Ruddle 2012).

### 2.5 Präparationsfehler

Bei der Präparation des Wurzelkanals können Fehler auftreten. Diese Fehler können sowohl durch eine falsche Arbeitsweise als auch durch ungeeignete Instrumente entstehen. Präparationsfehler können speziell bei der Präparation gekrümmter Wurzelkanäle mit nicht ausreichend flexiblen Feilen resultieren.

Im Folgenden werden die häufigen Präparationsfehler aufgelistet und näher erläutert (Weine et al. 1975, Stadler et al. 1986, Hülsmann 2008, Rödiger 2009).

### Apikaler Trichter („zip“) und Isthmus („elbow“)

Bedingt durch die Rückstellkraft eines Instrumentes kommt es zu einer verstärkten Präparation der äußeren Krümmung im apikalen Wurzelkanalabschnitt und einem vermehrten Substanzabtrag an der Innenseite der Krümmung im koronalen Bereich. Zwischen diesen Abschnitten kann eine Einengung („Isthmus“) entstehen. Gleichzeitig kommt es apikal zu einer trichterförmigen Aussackung des Wurzelkanals (Abb. 1.1, S. 15), was in einer im Vergleich zur angestrebten konischen Präparationsform inversen Formgebung (apikaler Zip) resultiert (Weine et al. 1975).

### Stufenbildung („ledge“) und Verlust der Arbeitslänge

Wenn Instrumente nicht vorgebogen oder unter Kraffteinwirkung forciert in den Wurzelkanal eingebracht werden, kann eine unüberwindbare Stufe in der Wurzelkanalwand entstehen (Abb. 1.2, S. 15). Als Folge kommt es zu einem

Verlust der Arbeitslänge, sodass der apikale Abschnitt nicht ausreichend präpariert und gereinigt werden kann.

### Apikale Blockade

Es handelt sich um eine irreversible Verblockung des Wurzelkanals durch Dentinspäne, welche während der Präparation durch eine unzureichende Spülung oder eine ausgelassene Rekapitulation nicht abtransportiert wurden. Wenn es sich um infizierte Dentinspäne handelt, kann eine Entzündung der periapikalen Gewebe die Folge sein.

### Perforation

Bei einer Perforation wird eine künstliche Verbindung zwischen der Mundhöhle und dem periradikulären Gewebe geschaffen (Abb. 1.3 u. 1.4, S. 16).

Eine apikale Perforation kann entstehen, wenn im Verlauf der Präparation dickere und weniger flexible Instrumente verwendet werden, die in gekrümmten Wurzelkanälen dem Kanalverlauf nicht folgen können, sodass es an der äußeren Seite der Krümmung im apikalen Bereich zu einer Perforation kommt. Wird der Wurzelkanal im medialen Bereich ungewöhnlich stark erweitert, kann es in diesem Abschnitt zu einer länglichen Perforation kommen (strip perforation).

### Instrumentenfraktur

Eine Instrumentenfraktur kann die gesamte Feile oder nur einen Teil der Feile betreffen. Die Herausforderung besteht darin, das frakturierte Segment wieder aus dem Wurzelkanal zu entfernen, was in manchen Fällen nicht mehr möglich ist.

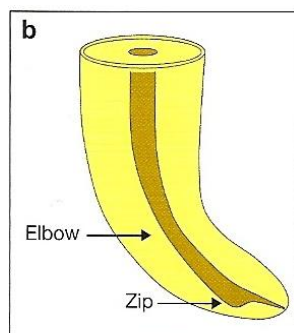


Abb. 1.1: Zip-Elbow-Effekt\*

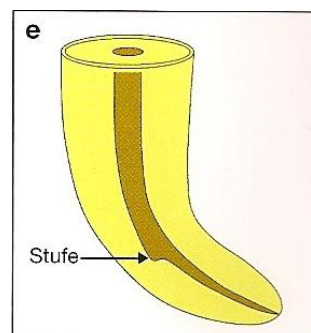


Abb. 1.2: Stufenbildung\*

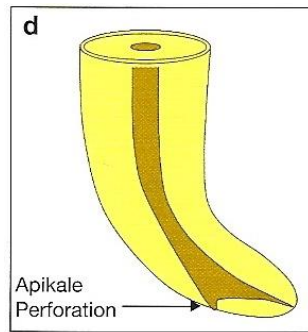


Abb. 1.3: Apikale Perforation\*

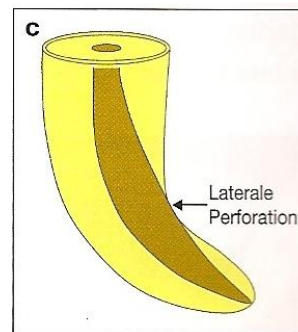


Abb. 1.4: Laterale Perforation\*

Abb. 1.1.-1.4 Schematische Darstellung der häufigsten Präparationsfehler

\* aus Rödiger 2009, S. 125

## 2.6 Maschinelle Präparationssysteme

### 2.6.1 Entwicklung von Präparationssystemen aus Nickel-Titan-Legierungen

Die ersten Instrumente für die Präparation von Wurzelkanälen wurden aus Kohlenstoff oder Edelstahl hergestellt. 1958 entwickelte das Naval Ordnance Laboratory (Silver Spring, Maryland, USA) eine neuartige Legierung, bestehend aus den Werkstoffen Nickel und Titan. Die werkstoffkundliche Bezeichnung lautet Nitinol (*Civjan et al. 1975*). *Andreasen & Hillemann (1971)* beschreiben zunächst den Einsatz von Nickel-Titan-Drähten in der Kieferorthopädie. Einige Jahre später findet die Legierung auch in der Endodontie Verwendung. So stellen *Walia et al.* im Jahr 1988 die erste aus Nickel-Titan (NiTi) gefertigte endodontische Feile vor (*Kazemi et al. 1996*). Anfangs wurden NiTi-Instrumente für die manuelle Wurzelkanalpräparation hergestellt. Diese neuen Feilen waren allerdings im Vergleich zu den damals üblichen Stahlinstrumenten mit einigen Nachteilen (Preis, Einsatzdauer, Substanzabtrag) behaftet und fanden daher nur eine geringe Akzeptanz.

Die ersten maschinellen Nickel-Titan-Systeme wurden in den frühen 90er Jahren in den USA entwickelt. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Vorteile dieses neuartigen Werkstoffs ersichtlich: Mit den maschinellen Systemen war es möglich, die Wurzelkanalpräparation schneller durchzuführen und gleichzeitig eine Begradigung gekrümmter Wurzelkanäle zu vermindern. Die erhöhte Frakturanfälligkeit konnte im Laufe der Zeit durch eine adäquate Handhabung kompensiert werden (*Hermann 2005*).



### 2.6.2 Eigenschaften von Aufbereitungssystemen aus Nickel-Titan- Legierungen

Die rotierenden Nickel-Titan-Feilen werden im Gegensatz zu den Stahlinstrumenten nicht verdrillt, sondern in einem aufwändigeren Verfahren durch Fräsen aus einem Rohling (55-Nitinol) hergestellt (*Thompson 2000, Schäfer 2002 a u. b, Rödig 2009*). Die beiden Elemente Nickel und Titan verfügen jeweils über verhältnismäßig niedrige Elastizitätsmodule, sodass die Legierung dehnfähiger ist als Edelstahl und viele andere Legierungen (*Civjan et al. 1975, Viana et al. 2010*). Zu den Eigenschaften des Werkstoffs zählt der sogenannte „Memory-Effect“, welcher dazu führt, dass NiTi-Feilen nach einer Krafteinwirkung wieder in ihren Ausgangszustand zurückkehren (*Camps & Pertot 1995, Kazemi et al. 1996, Rowan et al. 1996*). Durch das zuvor erwähnte niedrige Elastizitätsmodul verfügt die Legierung über eine ausgesprochen gute Elastizität (*Walia et al. 1988, Rowan et al. 1996, Wolcott & Himel 1997, Kuhn G et al. 2001*). Weitere Charakteristika sind ein gutes Biege- und Torsionsverhalten und eine im Vergleich zu den Stahlinstrumenten gesteigerte Flexibilität (*Walia et al. 1988, Kazemi et al. 1996, Rowan et al. 1996, Schäfer et al. 2003, Viana et al. 2010*). Endodontische Nickel-Titan-Instrumente weisen im Vergleich zu herkömmlichen Instrumenten folgende Eigenschaften auf:

- Eine nichtschneidende Instrumentenspitze (Batt-Spitze), welche eine zentrische Führung der Feile bewirkt und die Gefahr eines apikalen Zips oder einer Perforation reduziert. Zusätzlich soll eine Wurzelkanalbegradigung minimiert werden (*Schäfer et al. 1994 a u. b, Kuhn WG et al. 1997, Merte 2002, Peters 2004*).
- Unterschiedliche Schaftlängen und -designs; so gelten dünne, flexible Schäfte als geeigneter für eine ausreichende apikale Präparation. Durch unterschiedliche Schaftlängen kann bei der Präparation der verschiedenen Wurzelkanalanteile variiert werden, sodass im koronalen Bereich verkürzte Instrumente mit höherer Konizität verwendet werden können (*Peters 2004*).
- Im Gegensatz zu den Handfeilen, welche entsprechend der ISO-Norm eine Konizität von 2% aufweisen, gibt es Nickel-Titan-Feilen mit größeren Konizitäten von 4%, 6% und mehr (*Wolcott & Himel 1997*).

- Teilweise verfügen die Feilen über „Radial Lands“ (seitliche Führungsflächen), welche eine zentrische Position im Wurzelkanal gewährleisten sollen (*Wolcott & Himel 1997*).
- Der Instrumentenquerschnitt kann variieren. So gibt es Feilen mit dreieckigem, rechteckigem, quadratischem oder s-förmigem Querschnitt.

Insgesamt eignen sich diese Instrumente besonders gut für die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle (*Wolcott & Himel 1997, Pettiette et al. 1999, Kuhn G et al. 2001, Schäfer 2002 a u. b*). Die Qualität der Präparation hat sich durch den Einsatz der Nickel-Titan-Systeme verbessert und die Präparationszeit konnte reduziert werden (*Rapisarda et al. 2001*). Seit wenigen Jahren werden die Feilen nicht nur mit einer kontinuierlichen Rotation verwendet. Neue Präparationssysteme zeichnen sich durch reziproke Bewegungen aus. Nach den Untersuchungen von *Yared (2008)* ist die Verwendung dieser reziproken Rotation sicherer und verlängert die Verwendbarkeit der Feilen.

### 2.6.3 Aktuelle Nickel-Titan-Systeme

Im Laufe der Jahre wurden viele maschinelle Nickel-Titan-Systeme entwickelt, von denen nun einige gängige vorgestellt werden:

#### ProFile (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz)

Dieses System existiert bereits seit 1996 und eignet sich für die Wurzelkanalpräparation mit der Crown-Down-Technik. Die Feilen verfügen über einen u-förmigen Querschnitt, eine nichtschneidende Sicherheitsspitze und Radial Lands. Die ProFile-Sequenz umfasst die folgenden drei Instrumente:

- ProFile O.S.: Diese Feile dient der Präparation des koronalen Wurzelkanalanteils oder der Entfernung von Wurzelkanalfüllmaterial. Den Orifice Shaper gibt es in den Konizitäten 5 % bis 8 %.
- ProFile .06: Dieses Instrument hat eine Konizität von 6% und dient in verschiedenen ISO-Größen (Größe 15 – 40) der Präparation des mittleren Wurzelkanaldrittels.
- ProFile .04: Diese Feile präpariert den Wurzelkanal im apikalen Bereich, weist eine Konizität von 4 % auf und kann in den ISO-Größen 15 bis 90 verwendet werden.

GT Series X (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz)

GT Series X ist die neue Generation des bewährten System GT der Firma Dentsply Maillefer. Die Instrumente zeichnen sich durch einen großen, offenen Schneidekantenwinkel, breite Schneidenabstände und einen verringerten Kerndurchmesser aus. Die vergrößerten Abstände zwischen den Schneiden bewirken einen guten koronalen Abtransport von Dentinspänen und eine zentrische Position des Instruments im Wurzelkanal.

FlexMaster (VDW, München, Deutschland)

Das FlexMaster-System umfasst Instrumente der ISO-Größen 15 bis 70 mit den Konizitäten .02, .04 und .06. Ein Vorteil, der vor allem im Molarenbereich ersichtlich wird, besteht in dem verkürzten Schaft der FlexMaster-Instrumente. Die Feilen zeichnen sich durch einen individuellen Schneidekantenwinkel für jede Instrumentengröße sowie einen stabilen konvexen Instrumentenkern aus. Das System beinhaltet drei Sequenzen, die sich speziell für weite, mittlere und enge Wurzelkanäle eignen. Allgemein soll die Präparation mit der IntroFile begonnen werden, welche eine Konizität von 11% besitzt und für die Eröffnung der Wurzelkanäleingänge vorgesehen ist. Die verschiedenen Feilen mit den Konizitäten .04 und .06 werden für die empfohlene Crown-Down-Präparation verwendet, bevor die apikale Erweiterung durch die Feilen mit einer zwei-prozentigen Steigung erfolgt.

BioRaCe (FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz)

Das aus zehn Feilen bestehende System wurde entwickelt, um ohne den Einsatz zusätzlicher Instrumente eine ausreichende apikale Präparation zu erreichen. Es handelt sich um Instrumente mit einer nichtschneidenden Sicherheitsspitze, einem dreieckigen Instrumentenquerschnitt mit scharfen alternierenden Schneidekanten, die ein Festschrauben der Feile im Wurzelkanal verhindern sollen, und einer elektrochemisch bearbeiteten Oberfläche. Die Basic-Sequenz umfasst sechs Nickel-Titan-Feilen BR 0 – 5 (25/.08, 15/.05, 25/.04, 25/.06, 35/.04 und 40/.04), die für die vollständige Präparation des Wurzelkanals in vielen Fällen ausreichend ist. Zusätzlich gibt es für stark gekrümmte Wurzelkanäle das Extended Set, welches die Instrumente BR 4C (35/.02), BR 5C (40/.02), BR 6 (50/.04) und BR 7 (60/.02) beinhaltet.

### HERO 642 (Micro-Mega, Oberursel, Deutschland)

Das System HERO (**H**ohe **E**lastizität in **R**otation) besteht aus zwölf Instrumenten unterschiedlicher Längen (21 mm, 25 mm, 29 mm) in den Größen 20, 25, 30 und den Konizitäten 2%, 4%, 6%.

Die besonderen Merkmale sind drei positive Spiralkanten, ein verhältnismäßig massiger Instrumentenkern, wodurch der Widerstand gegenüber Frakturen erhöht wird, ein progressives Gewinde sowie eine nichtschneidende Batt-Spitze. Die Feilen verfügen über breite Radial Lands, wodurch die Resistenz gegenüber Torsionskräften erhöht ist (*El Batouty & Elmallah 2011*). Bei der Präparation wird die Crown-down-Technik verwendet.

### WaveOne (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz)

Bei der Anwendung des WaveOne-Systems wird der Wurzelkanal mit nur einer rotierenden Feile vollständig präpariert. Die Feile wird aus M-Wire-Nickel-Titan gefertigt. Durch das angewandte Wärmebehandlungsverfahren ist sie sehr flexibel und widerstandsfähig. Zusätzlich verfügt sie über einen großen Rotationswinkel in Schneidrichtung. Es handelt sich um eine Ein-Feilen-Technik mit reziproker Bewegung, bei der je nach Wurzelkanalbeschaffenheit eine der drei WaveOne-Feilen (WaveOne Primary 25/.08, WaveOne Small 21/.06, WaveOne Large 40/.08) verwendet wird.

### Reciproc (VDW, München, Deutschland)

Auch dieses System zeichnet sich durch eine Wurzelkanalpräparation mit reziproker Feilenbewegung aus. In vielen Fällen ist die Aufbereitung mit nur einer rotierenden Feile und ohne Handinstrumentierung durchführbar, sodass sich im Vergleich zu vielen konventionellen rotierenden Systemen eine verkürzte Präparationszeit ergibt. Die Feilen sind am Ende des Arbeitsteils schlanker als andere Nickel-Titan-Instrumente desselben Durchmessers und verfügen über einen regressiven Taper, sodass eine substanzschonende Präparation erzielt werden kann. Reciproc umfasst 3 Instrumentengrößen (R25, R40 und R50), die abhängig von der Morphologie des Wurzelkanals eingesetzt werden.

*Kim et al. (2012)* beschreiben bessere mechanische Eigenschaften und eine höhere Widerstandskraft gegen Ermüdung der Ein-Feilen-Systeme Reciproc und WaveOne. In einer Untersuchung von *Bürklein et al. (2012)* werden die beiden

Ein-Feilen-Systeme Reciproc und WaveOne mit den beiden Systemen *Mtwo* und ProTaper (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) verglichen. Hinsichtlich der Arbeitszeit ist Reciproc signifikant schneller als die anderen drei Systeme, wobei WaveOne signifikant schneller als *Mtwo* und ProTaper ist. In Bezug auf die Reinigungswirkung konnten sowohl Reciproc als auch *Mtwo* im apikalen Wurzelkanalabschnitt ein signifikant besseres Ergebnis erzielen. Insgesamt schätzen die Autoren alle vier Systeme als sicher ein und sind der Meinung, dass alle vier die Wurzelkanalkrümmung ausreichend gut erhalten.

Die Präparationszeit wird in einer weiteren Studie von *Bürklein & Schäfer (2012)* ebenfalls untersucht. Zusätzlich treffen die Autoren eine Aussage über apikal überstopften Debris. Die Wurzelkanalpräparation mit Reciproc ist auch in dieser Untersuchung signifikant schneller als die Präparation mit den anderen untersuchten Systemen (WaveOne, *Mtwo* und ProTaper). Hinsichtlich des apikal überstopften Debris sind die beiden Ein-Feilen-Systeme den Systemen mit mehreren Instrumenten signifikant unterlegen. Ein weiterer Grund für die Verwendung von Feilen mit reziproker Bewegung ist die Vermutung, dass auf diese Weise die Resistenz des Materials verbessert werden kann. *Kim et al. (2012)* kommen zu dem Schluss, dass sowohl Reciproc als auch WaveOne eine signifikant bessere Torsions- sowie Ermüdungsresistenz als ProTaper haben.

## 2.7 Die untersuchten Präparationssysteme

In der vorliegenden Studie wurden die folgenden 3 NiTi-Systeme untersucht:

### 2.7.1 S5

Das System S5 (Sendoline, Täby, Schweden) besteht aus fünf Nickel-Titan-Feilen S1 bis S5 (Abb. 2 – 4, S. 22), welche je nach Bedarf 18 mm oder 23 mm lang sind, wobei die Schaftlänge 13 mm beträgt. Die verkürzte Schaftlänge soll die Handhabung der Feilen erleichtern und eine verbesserte Erreichbarkeit des Wurzelkanals ermöglichen. Die Feilen sind entsprechend der vom Hersteller empfohlenen Arbeitsreihenfolge mit roten Farbringen markiert. Jede Feile hat einen s-förmigen Querschnitt und zwei Schneidekanten, wodurch die Schneidleistung effizient gestaltet und der Debristransport im Wurzelkanal verbessert werden soll. Dadurch, dass sich die spiralförmigen Nuten von der

Instrumentenspitze bis hin zum Schaft vergrößern, entsteht eine langgestreckte Steigung und ein Festschrauben der Feile im Kanal wird vermieden.

Die Firma Sendoline entwickelte für das System S5 speziell den S5 Endo Motor. Das kabellose Handstück verfügt über fünf vorprogrammierte Drehmoment-einstellungen, sodass bei der Präparation mit den verschiedenen Feilen jeweils nur die passende Motor-Einstellung (Nr. 1-5) gewählt werden muss. Der S5 Endo Motor ist drehmomentbegrenzt und arbeitet mit einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit von  $300 \text{ Umin}^{-1}$ . Das dazugehörige Winkelstück (EB-16 S, Fa. Sendoline) hat eine Übersetzung von 16:1. Die Einstellungen für die einzelnen Feilen können der Abb. 4 entnommen werden.



Abb. 2: Die S5-Feilen



Abb. 3: Der S5 Endo Motor

Instrument	Größe	Konizität	Drehzahl ( $\text{Umin}^{-1}$ )	Torque
S1	30	.08	300	4,0
S2	30	.06	300	3,0
S3	30	.04	300	2,3
S4	25	.04	300	1,2
S5	20	.04	300	0,5

Abb. 4: Eigenschaften und Motoreinstellungen für die einzelnen Instrumente des S5-Systems

### 2.7.2 S5 – Bisherige Untersuchungen

Studien zum S5-System liegen bislang nicht vor.

### 2.7.3 *Mtwo*

Die *Mtwo*-Feilen werden ebenfalls aus einer Nickel-Titan-Legierung hergestellt. Die Basissequenz, welche für alle Wurzelkanalanatomien geeignet ist, besteht aus vier Feilen. Um Wurzelkanäle mit größerem Durchmesser zu präparieren, stehen weitere Instrumente mit größeren Instrumentendurchmessern zur Verfügung. Im Rahmen dieser Studie werden bei der Präparation mit *Mtwo* die

Basissequenz sowie ein weiteres Instrument (Größe 30, 5% Konizität) verwendet.

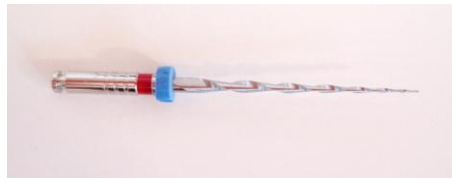


Abb. 5: Die Feile 25/.06 mit der roten Farbmarkierung sowie 3 gefrästen Ringen

Alle *Mtwo*-Feilen haben am Schaft sowohl einen farbigen Ring, welcher entsprechend der ISO-Norm die Spitzengröße des Instrumentes anzeigt, als auch fein gefräste Ringe, welche beginnend mit einem Ring die Konizitäten .04, .05, .06 und .07 (4 Ringe) kennzeichnen (Abb. 5). Der kurze Schaft (11 mm) ermöglicht einen guten Zugang zu den Wurzelkanälen, speziell im Molarenbereich. Der Instrumentenquerschnitt ist s-förmig. Jede Feile hat somit zwei Schneidekanten und einen geringen radialen Wandkontakt im Wurzelkanal. Dadurch ergibt sich ein großer Spanraum und der Debristransport aus dem Kanal wird erleichtert.

Die Feilen mit stärkeren Größen oder Konizitäten weisen einen verkleinerten Querschnitt auf, sodass die Flexibilität der Instrumente auch bei den größeren Feilen erhalten bleibt. Die beiden ersten Instrumente der Basissequenz 10/.04 (violett) und 15/.05 (weiß) haben einen großen konstanten Schneidekantenwinkel und somit mehr Windungen, sodass die Stabilität dieser kleineren Instrumente verbessert wird. Die anderen beiden Feilen der Basissequenz 20/.06 (gelb) und 25/.06 (rot) verfügen über aktive Schneidekanten und einen progressiven Schneidenabstand. Es resultieren ein guter Dentinabtrag und -abtransport nach koronal. Außerdem soll das Einschrauben der Feile im Kanal verhindert werden. Das im Rahmen der Studie zuletzt verwendete *Mtwo*-Instrument 30/.05 (blau) hat im Gegensatz zur vierten Feile der Basissequenz eine reduzierte Konizität, sodass der Wurzelkanal nur im apikalen Abschnitt präpariert wird.

Der Hersteller empfiehlt die Verwendung eines Motors mit Drehmomentbegrenzung. Die Drehzahl sollte im Bereich zwischen  $250 \text{ Umin}^{-1}$  und  $350 \text{ Umin}^{-1}$  liegen. Für diese Studie wurde der Endo IT professional Motor (VDW GmbH, München) verwendet (Abb. 6, S.24). In der Tabelle (Abb. 7, S.24) sind die Motoreinstellungen für die *Mtwo*-Feilen aufgeführt.



Abb. 6: Der Endo IT professional Motor mit Winkelstück

Mtwo-Feile	Drehzahl ( $\text{Umin}^{-1}$ )	Drehmoment (gcm)
10/.04	280	120
15/.05	280	130
20/.06	280	210
25/.06	280	230
30/.05	280	125

Abb. 7: Motoreinstellungen für die einzelnen Mtwo-Instrumente

Die folgende Tabelle (Abb. 8) verdeutlicht die Unterschiede der beiden zuvor beschriebenen Präparationssysteme hinsichtlich der Größe und Konizität.

S5-Feile	Größe	Konizität	Mtwo-Feile	Größe	Konizität
S1	30	.08	violett	10	.04
S2	30	.06	weiß	15	.05
S3	30	.04	gelb	20	.06
S4	25	.04	rot	25	.06
S5	20	.04	blau	30	.05

Abb. 8: Gegenüberstellung der Feilen der Systeme S5 und Mtwo

#### 2.7.4 Mtwo – Bisherige Untersuchungen

Zum Zeitpunkt dieser Studie liegen verschiedene Untersuchungen zu den Mtwo-Instrumenten vor. Es werden hier ausschließlich diejenigen aufgeführt, die sich mit der Wurzelkanalpräparation befassen.

*Foschi et al. (2004)* untersuchten anhand einer SEM-Auswertung (scanning electron microscopy) die Beschaffenheit des Dentins der Wurzelkanalwand nach der Aufbereitung mit Mtwo- und ProTaper-Instrumenten. Bei der Auswertung wurden die Parameter Smear Layer, pulpaler Debris, anorganischer Dentindebris und Oberflächenbeschaffenheit berücksichtigt. Insgesamt zeigten die koronalen Kanaldrittel bessere Ergebnisse. Mit Smear Layer und anorganischen Rückständen bedeckte Bereiche waren vornehmlich im apikalen Kanaldrittel zu erkennen. Pulpaler Debris war im gesamten Kanalverlauf reduziert. Die Beschaffenheit der Oberfläche innerhalb des Wurzelkanals war im koronalen und



mittleren Kanaldrittel gleichmäßig, lediglich im apikalen Bereich waren nicht aufbereitete Wandabschnitte zu erkennen. *Veltri et al. (2005)* verglichen die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle mit *Mtwo* und Endoflare-Hero Shapern (Micro-Mega, Besancon, Frankreich) hinsichtlich des Dentinabtrags, der Formgebung, der Arbeitszeit sowie auftretender Frakturen. Insgesamt konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Systemen festgestellt werden. Das Wurzelkanallumen war nach der Präparation an allen Messpunkten gleichmäßig erweitert, sodass von beiden Systemen behauptet werden kann, dass sie sowohl effizient im Wurzelkanal arbeiten als auch die ursprüngliche Wurzelkanalanatomie wahren. *Schäfer et al. (2006 a u. b)* verglichen in einer zweiteiligen Studie die Flexibilität und die Reinigungseffizienz der *Mtwo*-Instrumente. Im ersten Teil der Untersuchung wurden künstliche gekrümmte Wurzelkanäle mit den NiTi-Systemen *Mtwo*, K3 (SybronEndo, West Collins, CA, USA) und RaCe (FKG, La-Chaux-de-Fonds, Schweiz) präpariert und miteinander verglichen. Die Untersuchung ergab für *Mtwo* eine schnellere Wurzelkanalpräparation, bei der die ursprüngliche Kanalkrümmung erhalten blieb. Da keine Instrumentenfraktur bei Präparation mit *Mtwo* auftrat, bei K3 aber 4 Frakturen und bei RaCe 6 Frakturen, ist die Anwendung dieses Systems als sicher zu betrachten. Im zweiten Teil der Studie fokussierten *Schäfer et al. (2006 b)* neben der Biegefähigkeit auch die Reinigungseffizienz der *Mtwo*-Instrumente. Anhand prä- und postoperativer Röntgenaufnahmen sowie postoperativer SEM-Bilder wurde die erzielte Formgebung verglichen. Die *Mtwo*-Feilen entfernten Debris besser aus den Wurzelkanälen als die anderen beiden Systeme; zusätzlich erhielten sie die ursprüngliche Wurzelkanalkrümmung besser.

*Sonntag et al. (2007)* veröffentlichten eine Studie über die Wurzelkanalpräparation mit den Nickel-Titan-Instrumenten K3, *Mtwo* und ProTaper. Das Ziel der Studie war es, die drei Systeme auf Unterschiede hinsichtlich eines Zip-Elbow-Effektes, des Erhalts der Arbeitslänge sowie der Verlagerung des Wurzelkanals zu überprüfen. Die Auswertung der künstlichen Wurzelkanäle ergab, dass 50% der mit ProTaper und 46,9% der mit K3 aufbereiteten Molaren einen „Zip“ aufwiesen, wohingegen der Wert bei *Mtwo* bei 20% lag. Bezüglich des Auftretens eines „Elbow-Effekts“ oder der Entstehung von Stufen waren keine signifikanten Unterschiede festzuhalten. Bei der Betrachtung der

Arbeitslänge und der Aufbereitung des apikalen Foramens unterschieden sich die drei Systeme nicht signifikant. Eine ausreichende Konizität der Wurzelkanäle von apikal nach koronal wurde in 82% der mit *Mtwo* präparierten Molaren erreicht. Hier gab es einen Unterschied zu K3 und ProTaper, bei denen der Konus in 26,5% beziehungsweise in 62% erreicht wurde. Die Ergebnisse der Wurzelkanalpräparationen in extrahierten Zähnen zeigten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Arbeitslänge, der Kanalverlagerung sowie der Konizität.

*El Ayouti et al. (2008)* gingen in ihrer Untersuchung auf die Wirksamkeit rotierender Instrumente mit stärkeren Konizitäten bei der Präparation ovaler Wurzelkanäle ein. Die beiden rotierenden NiTi-Systeme *Mtwo* und ProTaper wurden mit NiTi-Handinstrumenten (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) verglichen. Die Autoren heben hervor, dass die Geometrie der Feilen und die Morphologie des Wurzelkanals nicht übereinstimmen, weswegen eine vollständige mechanische Bearbeitung der Kanaloberfläche nur sehr schwer zu gewährleisten ist. Die Auswertung der Untersuchung zeigte, dass kein signifikanter Unterschied zwischen ProTaper und *Mtwo* bestand. Beide Versuchsgruppen wiesen bessere Resultate auf als die Aufbereitung mit den NiTi-Handfeilen. Insgesamt unterstreicht diese Untersuchung die Ergebnisse anderer Studien, welche ebenfalls zu dem Schluss kommen, dass keine Technik in der Lage ist, den Wurzelkanal vollständig und gleichmäßig zu präparieren.

Der Erhalt der Wurzelkanalkrümmung, die benötigte Arbeitszeit sowie Veränderungen der Arbeitslänge wurden in einer Studie von *Vahid et al. (2009)* beschrieben. Die Untersuchung erfolgte mit den Systemen ProTaper, ProFile, FlexMaster und *Mtwo*. Die Auswertung der Arbeitszeiten ergab eine durchschnittliche Präparationszeit von 378,2 Sekunden mit den *Mtwo*-Instrumenten, 416,8 Sekunden mit den ProTaper-Instrumenten, 462,9 Sekunden mit den FlexMaster-Instrumenten und 477,7 Sekunden mit den ProFile-Instrumenten. *Vahid et al.* beschreiben das s-förmige Querschnittsdesign der *Mtwo*-Feilen als mögliche Ursache für die verkürzte Aufbereitungszeit. Aus diesem s-förmigen Querschnitt resultieren scharfe, aggressive Schneidekanten sowie ein positiver Spanwinkel. Diese beiden Eigenschaften führen dazu, dass das Instrument weniger Kraft benötigt, um das Dentin zu schneiden, als neutrale oder negative Spanwinkel. Bei der Präparation mit den ProTaper- und *Mtwo*-

Feilen konnte eine stärkere Begradigung der Wurzelkanalkrümmung festgestellt werden. Die Untersuchung zur Abweichung der Arbeitslänge zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier verwendeten Systemen.

### 2.7.5 ProTaper Universal

ProTaper Universal-Feilen (PTU) (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz), welche die neue Generation des Systems ProTaper darstellen, werden aus einer Nickel-Titan-Legierung hergestellt. Ein Instrumentensatz besteht aus sechs Feilen (SX, S1, S2, F1, F2, F3), welche durch verschiedenfarbige Markierungen gekennzeichnet sind (Abb. 9). Mit Ausnahme der „Auxilliary Shaper“-Feile SX sind die Feilen in 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Die Arbeitslänge von SX beträgt 19 mm. Der Hersteller empfiehlt eine Crown-Down-Technik, bei der die ersten drei Feilen, die sogenannten „Shaping Files“, für die koronale Präparation verwendet werden. Anschließend folgen die drei „Finishing Files“ für die Bearbeitung des apikalen Kanalabschnittes sowie die Formgebung.



Abb. 9: Die ProTaper-Feilen – SX, S1, S2, F1, F2, F3

Bei den ProTaper Universal-Feilen handelt es sich um Instrumente mit einem aktiven Schneidewinkel sowie einem dreiseitigen Querschnitt, wobei die Flächen konvex sind. Auf diese Weise sollen die Stabilität und die Bruchsicherheit verbessert werden. Durch diese Schneidengeometrie haben alle Feilen drei Schneidekanten, sodass die Effizienz durch die reduzierte Kontaktfläche zwischen Feile und Dentin erhöht wird. Eine Ausnahme hinsichtlich des Instrumentenquerschnitts stellt die Feile F3 dar. Sie verfügt über verbreiterte Schneideflächen und leicht konkave Flächen, sodass auch die Querschnittsfläche dieses Instruments im Vergleich zu den anderen vermindert ist, wobei gleichzeitig die Flexibilität verbessert wird. Die Instrumente des Systems haben abgesehen von der Feile S1 eine nichtschneidende Batt-Spitze. Da die ProTaper

Universal-Feilen sehr verschiedene Eigenschaften bezüglich der Konizität und der Länge des Arbeitsteils haben, werden sie im Folgenden kurz einzeln beschrieben:

- Das Instrument SX (farblos) ist 19 mm lang, wobei der Arbeitsteil 14 mm lang ist. Ausgehend von der ISO-Größe 19 an der Feilenspitze folgen im Verlauf des Arbeitsteils neun unterschiedliche Konizitäten zwischen 3,5% und 19%.
- Das Instrument S1 (violett) besitzt ebenfalls ein Arbeitsteil von 14 mm Länge. Es hat apikal die Größe 17. Im weiteren Verlauf hat die Feile elf verschiedene Konizitäten im Bereich von 2% bis 11%.
- Das Instrument S2 (weiß) hat die Größe 20 und ein 14 mm langes Arbeitsteil. Bis zu dem Punkt D14 gibt es neun Konizitäten (4% bis 11,5%).
- Das Instrument F1 (gelb) weist an der Spitze die Größe 20 auf und hat ein Arbeitsteil, welches 16 mm lang ist. Wie die beiden folgenden Feilen besitzt die erste „Shaping File“ eine umgekehrte Konizität. Die ersten 3 mm des Instrumentes (bis D3) haben eine stärkere Steigung als der folgende Feilenbereich (7% bis 5,5%).
- Das Instrument F2 (rot; Größe 25, Arbeitsteil 15 mm) hat eine umgekehrte Konizität zwischen 8% und 5,5%.
- Das Instrument F3 (blau; Größe 30, Arbeitsteil 14mm) hat eine umgekehrte Konizität zwischen 9% und 5,5%.

Die ProTaper Universal-Instrumente können bei konstanten Geschwindigkeiten verwendet werden, wobei der Hersteller eine Umdrehungszahl von  $250 \text{ Umin}^{-1}$  empfiehlt (Abb. 10). Der Motor soll drehmomentbegrenzt sein. Wie für das *Mtwo*-System wird in der vorliegenden Untersuchung auch für das ProTaper Universal-System der Endo IT professional Motor verwendet.

ProTaper-Feile	Drehzahl ( $\text{Umin}^{-1}$ )	Drehmoment (gcm)
SX	300	400
S1	300	400
S2	300	50
F1	300	80
F2	300	145
F3	300	183

Abb. 10: Motoreinstellungen für die Instrumente des ProTaper Universal-Systems

### 2.7.6 ProTaper Universal – Bisherige Untersuchungen

In einer Studie von *Williamson et al. (2009)* wurde das Reinigungsvermögen der drei rotierenden Nickel-Titan-Systeme EndoSequence (Brasseler USA, Savannah, USA), ProTaper Universal und ProFile GT verglichen. Anhand von SEM-Bildern wurden die drei Systeme bezüglich postoperativ vorhandenem Debris untersucht. Das Resultat der Studie zeigte eine vergleichbare Effektivität hinsichtlich des Reinigungsvermögens der drei Systeme. Die Wurzelkanalwände aller drei Versuchsgruppen wiesen Bereiche mit Smear Layer und Debris auf. Eine vollständige Reinigung des Wurzelkanals konnte mit keinem der drei Aufbereitungssysteme erreicht werden. In einer Studie beurteilen *Aguiar et al. (2009)* die Wurzelkanalwände nach der biomechanischen Präparation mit den Systemen ProTaper Universal und Nitiflex (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz). Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Systemen gibt. In beiden Versuchsgruppen konnte keine vollständige Bearbeitung aller Wurzelkanalwandanteile erzielt werden. Der Einfluss der maschinellen Präparationssysteme Hero 642, K3 und ProTaper Universal auf die Entfernung des entzündeten Gewebes wurde in einer Studie von *De-Deus & Garcia-Filho (2009)* untersucht. 67 vitale untere Molaren wurden extrahiert, präpariert und anschließend in Segmente gesägt. Insgesamt konnte in allen Proben verbleibendes pulpaes Gewebe nachgewiesen werden.

*Celik Ünal et al. (2009)* verglichen die ProTaper-Instrumente mit dem Nachfolger ProTaper Universal, um zu prüfen, ob es Veränderungen in Bezug auf das Biegevermögen bei der Präparation gekrümmter Wurzelkanäle gibt. Es konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Beide Systeme waren in der Lage, dem Wurzelkanal eine adäquate Form zu geben, ohne ihn stark zu begradigen. Einen weiteren Vergleich der Systeme ProTaper und ProTaper Universal veröffentlichten *Câmara et al (2009)*. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Flexibilität sowie dem Torsionsverhalten der einzelnen Feilen. Bei den ProTaper Universal-Instrumenten S1 und F1 konnte eine erhöhte Flexibilität festgestellt werden, während sie bei den Feilen F2 und F3 vermindert ist. Hinsichtlich der Torsionsbeständigkeit konnte für die Instrumente S2, F2 und F3 eine Verbesserung nachgewiesen werden.

Die Verlegung des apikalen Wurzelkanalabschnitts durch die ProTaper Universal-Instrumente F3 und F4 wurde in einer Untersuchung von *Kunert et al.*

(2010) beschrieben. Die Autoren verdeutlichten, dass die Präparation mit der ProTaper-Feile F3 in gekrümmten Wurzelkanälen mit Vorsicht durchzuführen ist. Die häufig aufgetretene Kanalverlagerung durch die Präparation mit der F4-Feile zeigte, dass eine Verwendung dieses Instrumentes im apikalen Wurzelkanaldrittel nicht zu empfehlen ist.

Der Einfluss der maschinellen Präparationssysteme *Mtwo* und ProTaper Universal auf die Geometrie des Wurzelkanals wurde von *Yang et al. (2011)* mithilfe der Mikro-Computertomographie untersucht. Mithilfe prä- und postoperativer Aufnahmen konnten die Wurzelkanäle dreidimensional rekonstruiert und auf folgende Parameter untersucht werden: Wurzelkanaloberfläche und -dicke, Volumen, die Wurzelkanalbegradigung und -verlegung sowie nicht bearbeitete Wandbereiche. Unterschiede zwischen den Systemen konnten nicht festgestellt werden, jedoch kam es durch die Präparation zu einer Veränderung der Wurzelkanaloberfläche, des Volumens, der Dicke und der Wurzelkanalkrümmung. Insgesamt erzielten beide Systeme eine adäquate Wurzelkanalgeometrie.

Die Studie von *Yigit Özer (2011)* zeigt den Vergleich zwischen den Systemen ProTaper Universal, Hero 642 Apical und FlexMaster in Bezug auf eine adäquate Formgebung. Alle drei Systeme verfügen über Instrumente mit nicht-schneidenden Feilenspitzen. Mithilfe computertomographischer Aufnahmen wurde die Wurzelkanalkrümmung prä- und postoperativ gemessen und verglichen. Beim FlexMaster-System lag die Abweichung bei  $0,07 \pm 0,02$  mm, beim System Hero 642 Apical bei  $0,09 \pm 0,03$  mm und beim ProTaper Universal-System bei  $0,10 \pm 0,02$  mm. Trotz der Battspitze kommt es bei allen Proben zu einer Wurzelkanalbegradigung.

### 3. Ziele der Arbeit

Die drei maschinellen Nickel-Titan-Aufbereitungssysteme S5 (Fa. Sendoline, Täby, Schweden), *Mtwo* (Fa. VDW GmbH, München) und ProTaper Universal (Fa. Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) sollen in einem In-vitro-Versuch unter standardisierten Bedingungen miteinander verglichen und auf ihre klinische Verwendbarkeit getestet werden.

Im Rahmen dieser Studie sollen die folgenden Parameter untersucht werden:

- Veränderungen des ursprünglichen Wurzelkanalverlaufs
  - Begradigung gekrümmter Wurzelkanäle
  - Veränderungen der Querschnittsform der Wurzelkanäle
- Reinigung der Wurzelkanalwand
- Glättung der Wurzelkanalwand
- Arbeitssicherheit der Aufbereitungssysteme
  - Perforationen
  - Instrumentenfrakturen
  - Stufenbildung
  - Apikale Blockaden
  - Verlust der Arbeitslänge
- Zeitaufwand.

Die Ergebnisse sollen mit denen aus vergleichbaren Studien zu anderen Nickel-Titan-Systemen verglichen werden.

## 4. Material & Methodik

### 4.1 Auswahl der Zähne

Der Auswahl der Zähne wurden die folgenden Ein- und Ausschlusskriterien zugrunde gelegt:

- Unterkiefermolaren mit deutlich getrennten mesialen und distalen Wurzeln
- Ausreichend intakte koronale Hartschubstanz für das Anlegen von Kofferdam
- Zahnlänge von mindestens 19 mm, da die Wurzelkanalpräparation mit einer Arbeitslänge von 18 mm durchgeführt werden sollte.
- Abgeschlossenes Wurzelwachstum
- Keine Beschädigungen der mesialen Wurzel
- Keine Anzeichen einer begonnenen oder abgeschlossenen Wurzelkanalbehandlung
- Keine Risse oder Frakturen
- Vollständig durchgängige Wurzelkanäle
- Krümmungswinkel der Wurzelkanäle zwischen 20° und 40°.
- Kein s-förmiger Wurzelkanalverlauf.

Für die Studie wurden 60 Unterkiefer-Molaren benötigt. Im ersten Schritt erfolgte die Präparation der Zugangskavitäten mit einem Diamanten der ISO-Größe 012 (835KR.314.012, Kommet, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo). Mit einem Reamer der ISO-Größe 10 (VDW, München) wurden der mesiobukale und der mesiolinguale Wurzelkanal sondiert und auf ihre Gängigkeit überprüft. Die Kanäleingänge wurden mit einem Gates-Glidden-Bohrer der Größe 2 (VDW, München) dargestellt und alle Zähne von koronal auf eine Länge von 19 mm gekürzt.

### 4.2 Vorläufige Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung

Von allen Zähnen wurden Röntgenaufnahmen mit dem Röntgengerät Heliodont DS (Fa. Sirona, Bensheim) bei 70 kV und 0,06 sec. erstellt. Pro Zahn wurden zwei Zahnfilm-Aufnahmen (3 x 4 cm, Agfa Dentus M2, Fa. Agfa, Leverkusen)



angefertigt. Für das erste Röntgenbild wurde ein Reamer der ISO-Größe 10 so weit in den mesiolingualen Kanal eingebracht, dass die Instrumentenspitze apikal wieder sichtbar war; die zweite Aufnahme wurde gleichermaßen für den mesiobukkalen Wurzelkanal angefertigt. Alle Zähne mit Krümmungen unter  $20^\circ$  und über  $40^\circ$  sowie diejenigen mit s-förmigem Wurzelkanalverlauf wurden aussortiert und durch neue UK-Molaren ersetzt. Konnte das Instrument nicht ausreichend tief inseriert werden, wurde der Zahn ebenfalls von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. Die Röntgenbilder wurden mittels des HP Photosmart C3180 (Fa. Hewlett-Packard GmbH, Böblingen) eingescannt und nach der Methode nach *Schneider (1971)* folgendermaßen ausgewertet:

Mithilfe der Bildanalysesoftware ImageJ (Research Services Branch, National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA) wird eine erste Gerade eingezeichnet, die der Längsachse des Instrumentes entspricht. Die zweite Gerade verläuft vom Foramen apicale zu dem Punkt, an dem der Wurzelkanal die Längsachse des eingebrachten Instrumentes verlässt. Der Winkel  $\alpha$  (Abb. 11), den diese beiden Geraden bilden, entspricht der Wurzelkanalkrümmung.



Abb.11: Vermessung der Wurzelkanalkrümmung

Nur Zähne, die die oben genannten Auswahlkriterien erfüllten und deren Krümmungswinkel zwischen  $20^\circ$  und  $40^\circ$  betrug, wurden für die weiteren Untersuchungen verwendet.

#### 4.3 Das Küvettensystem

Das verwendete Küvettensystem (Abb. 12 u. 13, S. 34) nach *Bramante et al. (1987)* in der Modifikation nach *Hülsmann (1998)* besteht aus drei Teilen, welche

mit Führungsrillen ausgestattet sind. Die drei Teile können mithilfe von Schrauben fest zusammengesetzt werden, sodass immer eine exakte Repositionierung der Molaren im Küvettensystem möglich ist.



Abb.12: Die Bestandteile des Küvettensystems

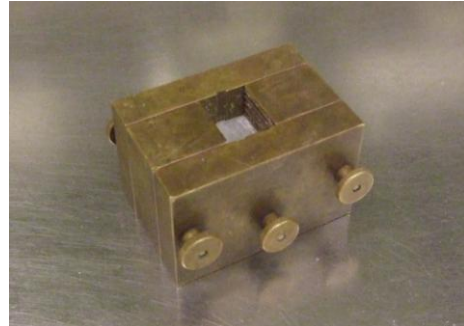


Abb.13: Das zusammengesetzte Küvettensystems

Der mittlere Teil des Systems verfügt über drei Bohrungen. Auf der einen Seite kann mithilfe von zwei Schrauben eine Halterung für den Röntgenfilm angebracht werden. Auf der anderen Seite kann über zwei Metallstifte eine Vorrichtung für den Röntgentubus angebracht werden (Abb. 14). So kann auch der Tubus immer wieder in derselben Position fixiert werden.



Abb. 14: Konstruktion für das digitale Röntgen

#### 4.4 Einbetten der Zähne

Vor dem Einbetten wurden die beiden Wurzelspitzen sorgfältig mit wenig Gusswachs verschlossen, damit kein Kunststoff von apikal in die Wurzelkanäle eindringen konnte. Das Küvettensystem wurde anschließend zusammengesetzt und in die unterste Führungsschiene des mittleren Anteils wurde eine Zwischenscheibe aus Metall eingesetzt. Alle Flächen sowie die Führungsrillen wurden

gründlich mit Vaseline (Vaseline weiss DAB 10, Winthrop Arzneimittel GmbH, Mülheim-Kärlich) bestrichen.

Die Zähne wurden in immer gleicher bucco-oraler Richtung zentral und mit Bodenkontakt im System positioniert und mithilfe eines Reamers der ISO-Größe 20 über einen Wachssteg aus Peripheriewachs (Heraeus Kulzer GmbH, Hanau) am Küvettensystem befestigt (Abb. 15).

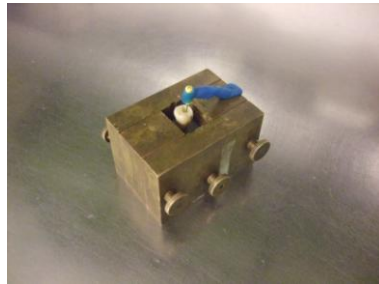


Abb. 15: Einbetten in Kunststoff



Abb. 16: Eingebetteter UK-Molar

Das Einbetten wurde mit dem autopolymerisierenden Kunststoff Paladur (Heraeus Kulzer GmbH, Hanau) vorgenommen. Der dickflüssig angerührte Kunststoff wurde in das Küvettensystem eingebracht und im Anschluss 15 Minuten im Drucktopf ausgehärtet. Die Kunststoffblöckchen (Abb. 16) wurden mit Zahlen versehen und in einem Gefäß mit Wasser gelagert.

#### 4.5 Präoperative Röntgenaufnahmen

Nach dem Einbetten der Zähne wurden erneut Röntgenaufnahmen angefertigt, um die endgültigen Ausgangswinkel sowie die Radien der Wurzelkrümmung berechnen zu können (Abb. 17, S. 36). Die Aufnahmen wurden digital mit dem Röntgengerät Elitys (Trophy Radiologie, Washington, USA) bei 60 kV, 4 mA und 0,102 sec. angefertigt.

Dafür wurden die Kunststoffblöckchen erneut in das Küvettensystem eingesetzt und ein Reamer der ISO-Größe 15 wurde 19 mm tief in den jeweiligen Wurzelkanal eingebracht. Wie oben beschrieben, wurde der Filmhalter mit dem digitalen Röntgensensor (CDR1, CoSi Elektronik GmbH, Eching; Format 2 x 3 cm) angebracht, sowie die Vorrichtung für den Röntgentubus befestigt. Alle Zähne wurden im bucco-oralen Strahlengang geröntgt. Es wurden erneut separate Röntgenbilder für die mesiolingualen und mesiobukkalen Wurzelkanäle

angefertigt, um Überlagerungen zu vermeiden und eine eindeutige Zuordnung der eingebrachten Instrumente zu den Wurzelkanälen zu sichern. Die Aufnahmen wurden am Monitor eines Computers bei zehnfacher Vergrößerung betrachtet.

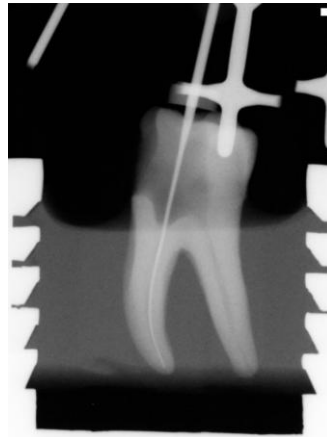


Abb. 17: Präoperatives Röntgenbild

#### 4.6 Bestimmung der Ausgangswinkel und Ausgangsradien

Die Auswertung der präoperativen Krümmungswinkel und -radien erfolgte nach der von *Zhang und Hu (2010)* modifizierten Methode nach *Schneider (1971)* folgendermaßen:

Mithilfe der Bildanalysesoftware ImageJ wurde in den digitalen Röntgenaufnahmen eine erste Gerade durch die Längsachse des sich im Wurzelkanal befindlichen Instrumentes gezogen. Der Punkt, an dem der Wurzelkanalverlauf diese Längsachse verlässt, wurde als Punkt A markiert. Eine zweite Gerade wurde durch den Punkt A und einen Punkt B festgelegt, welcher die Instrumentenspitze darstellte. Auf diese Weise konnte die Wurzelkanalkrümmung (Winkel  $\alpha$ ) berechnet werden (Abb. 18, S.37). Zur Bestimmung des Krümmungsradius wurden die Strecke AB vermessen und folgende Überlegungen zugrunde gelegt: Es kann davon ausgegangen werden, dass sowohl Punkt A als auch Punkt B auf der Kreisbahn liegen, sodass die Strecke AB und der Winkel  $\beta$  halbiert werden können. Mithilfe folgender Formel kann schließlich der Wert berechnet werden:

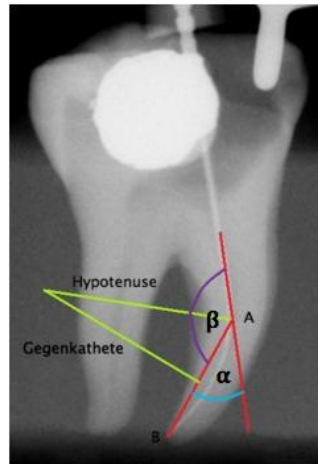


Abb. 18: Berechnung des Krümmungsradius

$$\text{Krümmungsradius} = (\text{Strecke AB} / 2) / \cos (180 - \alpha) / 2$$

#### 4.7 Einteilung der Versuchsgruppen

Nach der Bestimmung der Krümmungswinkel und -radien konnte für die beiden Parameter bezüglich des lingualen und des bukkalen Wurzelkanals der Mittelwert berechnet werden. Im Anschluss wurden die 60 Zähne zufällig in drei Gruppen aufgeteilt und in jeder Gruppe die Mittelwerte für die verschiedenen Parameter bestimmt. Durch den Tausch einzelner Zähne zwischen den Gruppen erfolgte eine Korrektur, sodass in den drei Versuchsreihen annähernd gleiche Mittelwerte vorlagen (Abb. 19).

Versuchsreihen		Mittelwert der Krümmungswinkel	Mittelwert der Krümmungsradien
<b>S5</b>	mesiobukkale Kanäle	28,3°	13,2 mm
	mesiolinguale Kanäle	25,5°	14,7 mm
<b>Mtwo</b>	mesiobukkale Kanäle	26,9°	12,3 mm
	mesiolinguale Kanäle	25,8°	12,8 mm
<b>ProTaper</b>	mesiobukkale Kanäle	27,8°	12,7 mm
	mesiolinguale Kanäle	25,2°	13,8 mm

Abb. 19: Mittelwerte der Krümmungswinkel und -radien in den 3 Versuchsgruppen

#### 4.8 Versuchsdurchführung

Die Wurzelkanalpräparation wurde an insgesamt 60 Unterkiefer-Molaren durchgeführt. Vor der Präparation wurde das Gusswachs, welches vor dem

Einbetten der Zähne als Schutz auf die Wurzelspitzen aufgetragen worden war, wieder entfernt. Den Angaben der Hersteller folgend wurden jeweils 20 Zähne mit dem S5-, dem ProTaper Universal- und dem Mtwo-System präpariert. Die Präparation erfolgte immer bis zur Größe 30. Das erste System verfügt über einen vom Hersteller eigens entwickelten Motor (S5 Endo Motor). Für die beiden anderen Systeme wurde der Endo IT Professional Motor verwendet.

#### 4.8.1 Präparation mit dem S5-System

Nach der Präparation der Zugangskavität, der Darstellung der Kanaleingänge sowie einer orientierenden Sondierung mit einem Handinstrument konnte die Wurzelkanalpräparation mit dem ersten Instrument des Systems begonnen werden. Es wurde eine Crown-Down-Standardtechnik angewendet. Bei allen Feilen wurde das Handstück kontinuierlich mit leichten Auf- und Abwärtsbewegungen geführt. Die Instrumente sollten jeweils so kurz wie möglich im Wurzelkanal arbeiten. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Präparation nie ohne Spülflüssigkeit durchgeführt wurde. Nachdem das Winkelstück auf die Motor-Einstellung Nr.1 eingestellt wurde, konnte mit der ersten Feile S1 (1 roter Ring) begonnen werden. Das Instrument S1 hat die Größe 30 und eine Konizität von 8%. Eine Besonderheit von S1 ist die verkürzte Länge, da das Instrument nicht in die apikalen Kanalanteile vordringt. Die erste Feile erweitert den koronalen und mittleren Anteil des Wurzelkanals. Nach gründlicher Spülung mit 2 ml 3%igem Natriumhypochlorit (Apotheke der Universitätsklinik Göttingen) wurde die Präparation in der entsprechenden Motor-Einstellung mit dem zweiten Instrument S2 (2 rote Ringe) weitergeführt. Diese Feile hat die Größe 30 mit einer Konizität von 6%. Die Aufgabe von S2 war ebenfalls die Präparation des koronalen und mittleren Kanalanteils, wobei sie bis zur Hälfte der Arbeitslänge eingebracht wurde. Abschließend wurde wieder mit 2 ml Natriumhypochlorit (3%) gespült.

Die Feile S3 (ISO-Größe 30, 4% Konizität), welche durch drei rote Ringe gekennzeichnet ist, wurde in Kombination mit der Motor-Einstellung Nr.3 bis in den apikalen Bereich eingebracht. Sobald sie keine schneidende Wirkung mehr aufwies, konnte gespült (2 ml NaOCl 3%) und zum nächsten Instrument übergangen werden. Mit der nächsten Feile S4 (4 rote Ringe), die ebenfalls bei passender Motor-Einstellung verwendet wurde und die Größe 25 sowie eine

Konizität von 4% aufweist, wurde die vollständige Arbeitslänge (18 mm) erreicht. Mit leichten Auf- und Abwärtsbewegungen wurde die Feile langsam und unter ständiger Bewegung in den Wurzelkanal eingebracht. Eventuell musste sie zwischenzeitlich gereinigt werden, um die Dentinspäne vom Instrument zu lösen und wieder eine effizientere Schneideleistung zu erzielen. Sobald die Arbeitslänge erreicht wurde, erfolgte eine Spülung mit 2 ml 3%igem Natriumhypochlorit. Das folgende Instrument S5 (5 rote Ringe) mit der Größe 20 und einer Konizität von 4% wurde in gleicher Weise wie S4 und ebenfalls bis zum Erreichen der Arbeitslänge verwendet.

Nach der gründlichen Spülung (2 ml NaOCl 3%) konnte mit der apikalen Präparation begonnen werden. Dafür wurden die Feile S4, S3 und S2 in umgekehrter Instrumentenfolge verwendet. Bei dieser Erweiterung des apikalen Wurzelkanalabschnittes wurden alle Feilen auf Arbeitslänge eingebracht. Wie zuvor beschrieben, wurde nach jedem Instrument mit Natriumhypochlorit gespült. Nach der Fertigstellung der apikalen Präparation erfolgte die Abschlussspülung mit jeweils 5 ml EDTA (Calcinase EDTA-Lösung, Igea artis GmbH + Co. KG, Dettenhausen) und Natriumhypochlorit.

Für die spätere Auswertung wurde nach der Beendigung der Präparation jeweils eine digitale Röntgenaufnahme angefertigt. Für diese Aufnahme wurde ein Reamer der ISO-Größe 25 auf Arbeitslänge (18 mm) in den Wurzelkanal eingebracht.

#### 4.8.2 Präparation mit dem *Mtwo*-System

Die Wurzelkanalpräparation mit den *Mtwo*-Instrumenten erfolgte nach einer Single-Length-Technik. Nachdem der Zugang zu den Kanaleingängen dargestellt wurde, konnte mit dem ersten *Mtwo*-Instrument begonnen werden. Die Feile 10/.04 (violett) wurde passiv in den Kanal eingebracht. Sie drang dabei automatisch vor. Sobald ein leichter Widerstand spürbar war, wurde das Instrument 1 mm bis 2 mm zurück nach koronal bewegt und dabei leicht gegen die Kanalwände gedrückt. Durch diese bürstende Feilenbewegung schneiden die *Mtwo*-Feilen lateral und dringen allmählich nach apikal vor, bis sie die Arbeitslänge erreichen. Sobald mit der ersten Feile die Arbeitslänge (18 mm) erreicht wurde, konnte mit der Präparation mit der zweiten Feile (15/.05 (weiß)) begonnen werden. Die Technik entspricht der zuvor beschriebenen Methode.

Anschließend wurde die Präparation mit der dritten und vierten Feile der *Mtwo*-Basissequenz fortgeführt (20/.06 (gelb); 25/.06 (rot)). Auch diese Instrumente wurden mit der bürstenden Feilenbewegung eingesetzt und nur solange verwendet, bis die Arbeitslänge erreicht war. Die Handhabung des letzten Instruments 30/.05 (blau) entspricht ebenfalls der Technik der Basissequenz-Feilen. Analog zu den beiden anderen Systemen wurde auch beim *Mtwo*-System zwischen der Präparation mit den verschiedenen Feilen mit jeweils 2 ml Natriumhypochlorit gespült. Zum Schluss erfolgten die Abschlussspülung (je 5 ml EDTA und NaOCl) sowie die Anfertigung der Röntgenaufnahme.

#### 4.8.3 Präparation mit dem ProTaper Universal-System

Die vorbereitenden Arbeitsschritte entsprechen den Ausführungen bei der Beschreibung des Systems S5. Die Spülung mit jeweils 2 ml Natriumhypochlorit (3%) erfolgte ebenfalls nach jedem Instrument. Für das ProTaper Universal-System wurde eine Crown-Down-Technik empfohlen. Mit den „Shaping Files“ wurde in bürstenden Bewegungen gearbeitet. Dabei wurde das jeweilige Instrument (SX, S1 oder S2) langsam und passiv in den Wurzelkanal eingebracht. Sobald ein leichter Widerstand zu spüren war, wurde die Feile bürstend aus dem Kanal bewegt. Bei den „Finishing Files“ ist von einer bürstenden Arbeitsweise abzusehen. Die Präparation mit den Feilen F1, F2 und F3 wurde mit kontinuierlichen Ein- und Auswärtsbewegungen durchgeführt. Begonnen wird mit der ProTaper Universal-Feile S1 (violett). Sie wird etwa auf zwei Drittel der späteren Arbeitslänge in den Kanal eingebracht und dient somit der Präparation des koronalen und mittleren Abschnittes. Im nächsten Schritt folgte die koronale Erweiterung mit dem Auxiliary Shaper SX (farblos). Auch dieses verkürzte Instrument wurde nicht bis auf Arbeitslänge, sondern nur einige Millimeter in den Kanal eingebracht. Die Präparation wurde mit dem Instrument S1 (violett) fortgesetzt. Nach der zuvor beschriebenen Weise wurde mit dieser Feile nun schrittweise und ohne Druck bis auf Arbeitslänge (18 mm) präpariert. In gleicher Weise folgte die Präparation mit der ProTaper Universal-Feile S2 (weiß). Für die Bearbeitung des apikalen Wurzelkanaldrittels wurde mit den Instrumenten F1 (gelb), F2 (rot) und F3 (blau) jeweils nach der oben beschriebenen Methode bis zum Erreichen der Arbeitslänge präpariert.



Für alle Arbeitsschritte galt, dass zum nächsten Instrument gewechselt wurde, sobald die Arbeitslänge erreicht war. Die ProTaper Universal-Feilen wurden unmittelbar nach der Verwendung gereinigt. Entsprechend dem Vorgehen bei den beiden anderen Systemen wurde auch von den mit ProTaper Universal-Instrumenten aufbereiteten Molaren im Anschluss an die Abschlussspülung pro Wurzelkanal eine digitale Röntgenaufnahme angefertigt.

#### 4.8.4 Präparation des mesiobukkalen Wurzelkanals

Bei den Systemen S5 und ProTaper Universal wurde entsprechend den Herstellerangaben eine Crown-Down-Technik angewandt. Die Präparation mit den *Mtwo*-Feilen erfolgte nach der Single-Length-Technik. Für den Arbeitsverlauf wurde im Vorfeld der Wurzelkanalpräparation für jedes System ein eigener Arbeitsbogen erstellt, welcher die genauen Arbeitsschritte dokumentiert (s. Anhang). So wurden während der Präparation für jede Feile die genaue Arbeitszeit im Wurzelkanal sowie die gesamte Arbeitszeit an dem jeweiligen Molaren erfasst. Zusätzlich wurden Zwischenfälle wie der Verlust der Arbeitslänge, Instrumentenfrakturen, eine apikale Blockade oder eine mögliche Perforation der Wurzel vermerkt. Die Feilen wurden nach jedem Wechsel des Instrumentes auf ihre Unversehrtheit geprüft. Verbogene sowie frakturierte Instrumente wurden umgehend gegen neue Feilen ausgetauscht. Der Wechsel eines Instrumentensatzes erfolgte jeweils nach Präparation von 8 Wurzelkanälen. Nach jedem Instrument erfolgte eine Rekapitulation mit einem Reamer der ISO-Größe 10, um die Gängigkeit des Wurzelkanals zu prüfen. An den mesiobukkalen Wurzelkanälen wurden folgende Parameter untersucht:

- Veränderung der Wurzelkanalkrümmung
- Sauberkeit der Wurzelkanalwände nach der Präparation
- Zwischenfälle (Apikale Blockade, Längenverlust, Fraktur, Perforation)
- Messung der Arbeitszeit.

#### 4.8.5 Präparation des mesiolingualen Wurzelkanals

Vor der Präparation erfolgten zwei weitere Arbeitsschritte:

- Die Kunststoffblöckchen wurden mit dem EXAKT-Trennschleifsystem (EXAKT Apparatebau GmbH & Co. KG, Norderstedt) in drei Sägevorgängen in vier Segmente unterteilt. Die Sägeschnitte erfolgten beginnend von apikal im Abstand von 3 mm (Abb. 20).

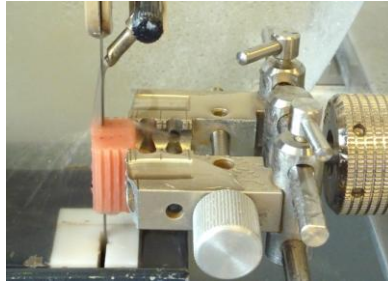


Abb. 20: Sägen eines Kunststoffblocks

- Die Querschnitte der apikalen, medialen und koronalen Segmente wurden bei 36facher Vergrößerung fotografiert, um später eine Aussage über die Veränderung des Wurzelkanalquerschnitts treffen zu können. Dafür wurde die Spiegelreflexkamera Nikon D7000 (Nikon GmbH, Düsseldorf) mit dem Objektiv Nikon AF-S Mikro-Nikkor (Nikon GmbH, Düsseldorf) und einem Ringlicht (Doctorseyes PLC4 mit Winglights, Doctorseyes GmbH, Oberhausen) verwendet. Zur Sicherung der Reproduzierbarkeit der prä- und postoperativen Aufnahmen wurde ein Stativ verwendet. Um eine gute Bildschärfe zu gewährleisten, wurden die Bilder mithilfe eines Infrarotauslösers aufgenommen. Die Belichtung betrug immer 5/100 Sekunden. Die Bildschärfe wurde bei jeder Aufnahme manuell eingestellt.

Die Querschnittsaufnahmen wurden nach der Präparation des mesiolingualen Wurzelkanals wiederholt. Mithilfe der seitlichen Führungsrillen an den Kunststoffblöckchen war es anschließend möglich, die einzelnen Segmente für die folgende Wurzelkanalpräparation wieder im Küvettensystem zu repositionieren. Die Wurzelkanalpräparation der mesiolingualen Kanäle erfolgte analog zur Präparation der mesiobukkalen Kanäle. An den mesiolingualen Wurzelkanälen wurden folgende Parameter untersucht:

- Veränderung der Kanalkrümmung
- Qualitative Veränderung des Kanalquerschnitts

- Quantitative Veränderung des Kanalquerschnitts
- Zwischenfälle (Apikale Blockade, Längenverlust, Fraktur, Perforation)
- Messung der Arbeitszeit.

#### 4.9 Postoperative Röntgenaufnahmen

Für die postoperative Röntgenaufnahme wurden der Röntgentubus sowie der Halter für den Röntgensensor in gleicher Weise fixiert, sodass die Aufnahme in der gleichen Position erfolgte wie die präoperative Röntgenmessung. Ein Reamer der ISO-Größe 25 wurde auf Arbeitslänge (18 mm) in den mesio-bukkalen Wurzelkanal eingebracht (Abb. 21).

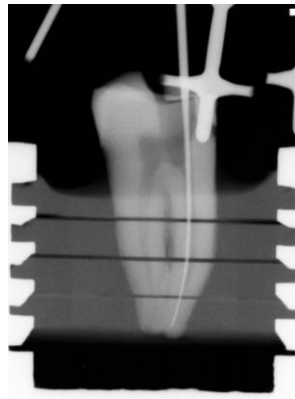


Abb. 21: Postoperatives Röntgenbild

#### 4.10 Herstellung der Präparate für die elektronenmikroskopische Auswertung

Die rasterelektronenmikroskopische Auswertung erfolgte lediglich an den mesio-bukkalen Wurzelkanälen, da eine reguläre Hydrodynamik der Spülung während der Präparation bei den gesägten mesiolingualen Kanälen nicht ausreichend gewährleistet werden konnte. Für die Herstellung der Probenkörper wurde jeweils aus den drei Segmenten eines Zahnes ein Segment des Kanallumens herausgetrennt. Dafür wurden im ersten Schritt mithilfe einer Trennscheibe der Kunststoff gespalten und jeweils zwei feine Kerben in den Zahn gesägt, ohne das Kanallumen zu erreichen. In einem zweiten Schritt konnten mit einem Heidemannspatel das angesägte Segment aufgebrochen und das Kanallumen dargestellt werden. Die Präparate wurden anschließend mit Sekundenkleber (Distr. Herlitz PSB AG, Berlin) auf Aluminiumnieten (DIN 661,

3,0 mm x 12,0 mm) befestigt, sodass bei senkrechter Betrachtung das Segment der Wurzelkanalwand gut sichtbar war. Alle 180 Probenkörper wurden für zehn Wochen im Exsikkator getrocknet.

#### 4.11 Auswertung

##### 4.11.1 Veränderung des Krümmungswinkels

Die Veränderung der Kanalkrümmung wurde anhand prä- und postoperativer Röntgenaufnahmen dokumentiert. Durch die Verwendung des Küvettensystems konnte eine exakte Repositionierung der Molaren gewährleistet werden. Die Röntgenaufnahmen konnten mithilfe eines Computerprogramms (ImageJ) übereinander gelagert werden. Für die Auswertung wurde der Krümmungswinkel der Wurzelkanäle sowohl auf den prä- als auch auf den postoperativen Röntgenaufnahmen bei 18 mm Arbeitslänge bestimmt.

##### 4.11.2 Beurteilung des Wurzelkanalquerschnitts

Die zur Beurteilung des Wurzelkanalquerschnitts angefertigten Fotografien konnten ebenfalls mithilfe von ImageJ übereinander gelagert werden, sodass die Veränderung des Querschnitts gut sichtbar war. Folgende Parameter dienten zur Auswertung der Aufnahmen (*Loushine et al. 1989*):

➤ Querschnittsform

- annähernd rund - akzeptable Querschnittsform (Abb. 22)
- annähernd oval - akzeptable Querschnittsform (Abb. 23)
- unregelmäßig - nicht akzeptable Querschnittsform (Abb. 24)

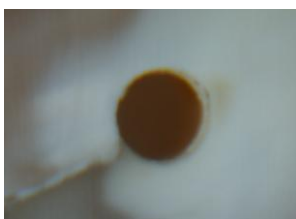


Abb. 22: annähernd runder Querschnitt

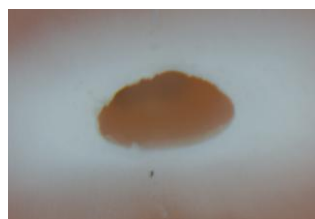


Abb. 23: annähernd ovaler Querschnitt

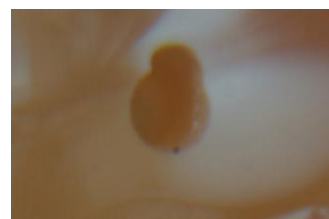


Abb. 24: unregelmäßiger Querschnitt

- Divergenz alter/neuer Wurzelkanal (Abb. 25)
  - 0% Wandkontakt (ursprünglicher Kanal vollständig im präparierten Kanal enthalten)
  - 0-25% Wandkontakt zwischen dem ursprünglichen und präparierten Kanal
  - >25% Wandkontakt zwischen dem ursprünglichen und präparierten Kanal
  - >50% Wandkontakt zwischen dem ursprünglichen und präparierten Kanal
  - >75% Wandkontakt zwischen dem ursprünglichen und präparierten Kanal.



Abb. 25: 0 % Wandkontakt (links); 0 – 25 % Wandkontakt (rechts)

#### 4.11.3 Rasterelektronenmikroskopische Auswertung

Um die Sauberkeit der Wurzelkanaloberfläche bewerten zu können, wurden die vorbereiteten Probenkörper im Rasterelektronenmikroskop (REM) (DSM 960, Fa. Zeiss, Oberkochen) betrachtet. Die 180 Proben wurden randomisiert, um eine objektive Bewertung gewährleisten zu können. Die Auswertung wurde von zwei unabhängigen Untersuchern durchgeführt, welche sich im Vorfeld anhand vergleichbarer rasterelektronenmikroskopischer Bilder kalibriert hatten. Die Kalibrierung erfolgte anhand von 40 REM-Bildern, welche mit den unten beschriebenen Scores bewertet wurden. Die Ergebnisse beider Untersucher wurden verglichen. Es lag eine Übereinstimmung von 90% bei der Bewertung der Smear-Layer und eine Übereinstimmung von 83% bei der Bewertung des Debris vor. Die Untersuchung der Smear-Layer erfolgte bei 1000-facher Vergrößerung, die Debris-Auswertung bei einer Vergrößerung um den Faktor 200. Die Bewertung richtete sich nach Referenzfotographien für die jeweiligen

Scores (Abb. 26 – 35, S.46 - 50). Die *American Association of Endodontists (1994)* definiert Debris als Dentinpartikel und Reste des vitalen oder nekrotischen pulpalen Gewebes. Die Definition der Smear-Layer lautet: Ein oberflächlicher Film, welcher dem Dentin oder anderen Oberflächen nach der Instrumentierung mit rotierenden Wurzelkanalinstrumenten aufliegt. Dieser Film besteht aus Dentinpartikeln sowie Überresten des pulpalen Gewebes, Bakterienbestandteilen und Rückständen verbliebener Spülflüssigkeit.

Für die Auswertung erfolgte eine Einteilung in folgende Kategorien:

#### Debris:

- Score 1: Saubere, glatte Kanalwand oder nur vereinzelte kleine Auflagerungen
- Score 2: Wenige kleine Debrisinseln
- Score 3: Zahlreiche Debrisinseln, weniger als 50% der Kanalwand von Debris bedeckt
- Score 4: Mehr als 50% der Kanalwand von Debris bedeckt
- Score 5: Gesamte oder fast gesamte Kanalwand von Debrissschicht bedeckt.

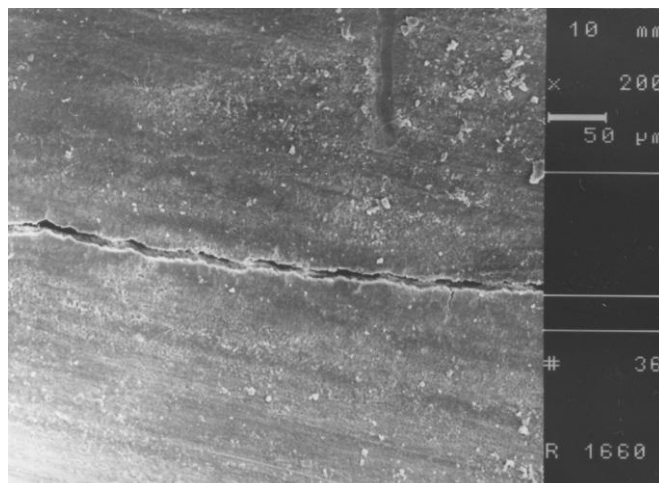


Abb. 26: Referenzfotografie - Debris-Score 1

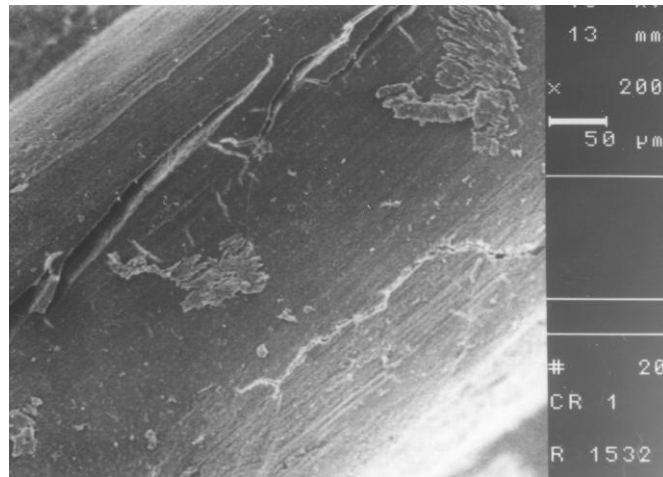


Abb. 27: Referenzfotographie - Debris-Score 2

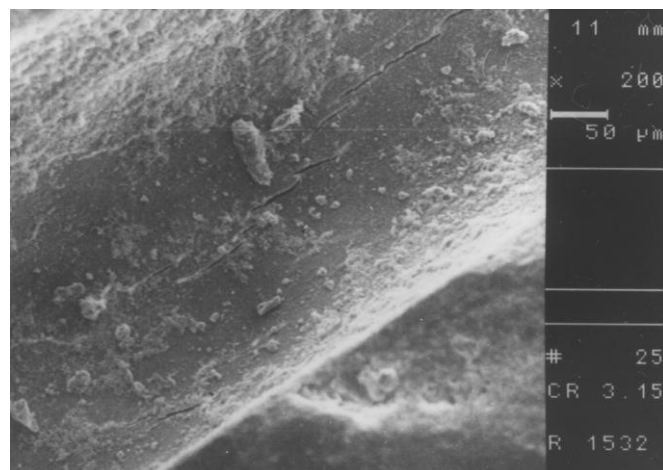


Abb. 28: Referenzfotographie - Debris-Score 3

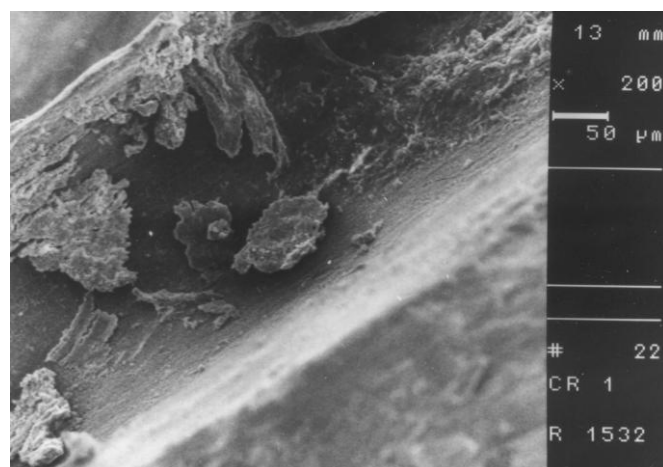


Abb. 29: Referenzfotographie - Debris-Score 4

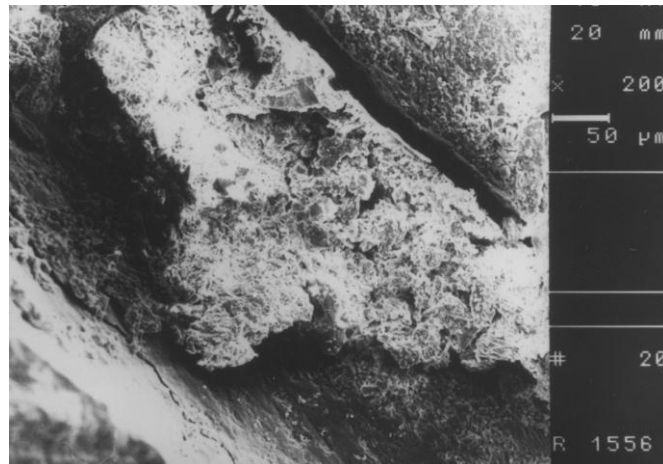


Abb. 30: Referenzfotographie - Debris-Score 5

### Smear Layer:

- Score 1: Keine oder fast keine Schmierschicht an der gesamten Wand, Dentintubuli überwiegend offen
- Score 2: Dünne, homogene, aber gleichmäßige Schmierschicht an der gesamten Wand, nur vereinzelt offene Dentintubuli
- Score 3: Gesamte Kanalwand von einer inhomogenen Schmierschicht bedeckt
- Score 4: Inhomogene Schmierschicht mit großen Debrisinseln an der gesamten Kanalwand
- Score 5: Kanalwand nicht bearbeitet, dichte, inhomogene Schmierschicht.

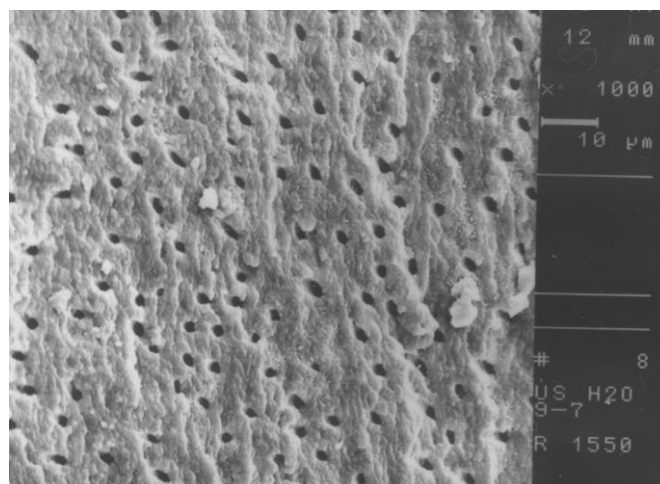


Abb. 31: Referenzfotographie – Smear-Layer Score 1



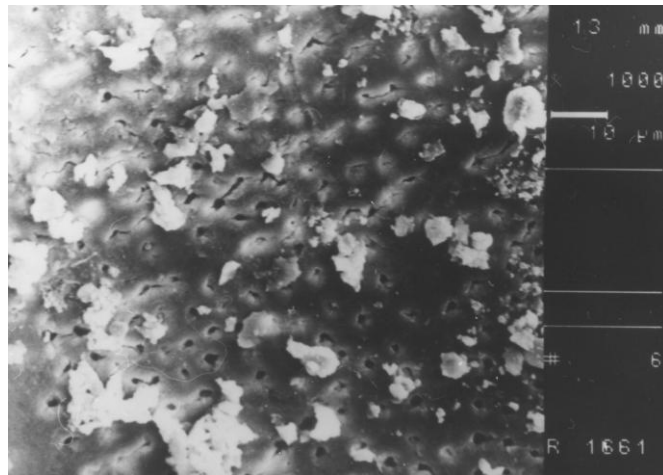


Abb. 32: Referenzfotographie – Smear-Layer Score 2

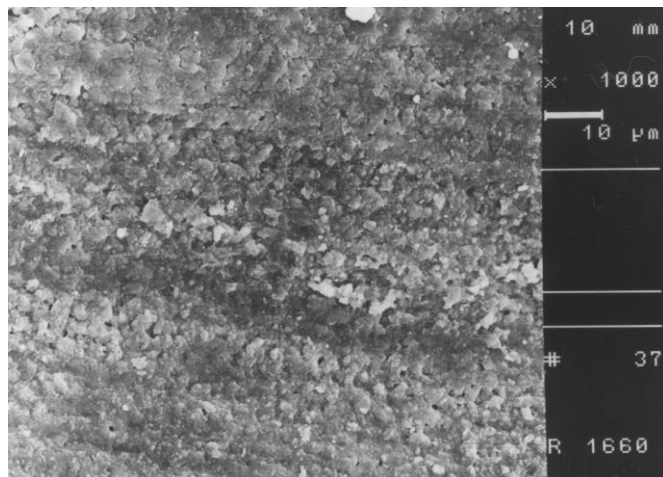


Abb. 33: Referenzfotographie – Smear-Layer Score 3

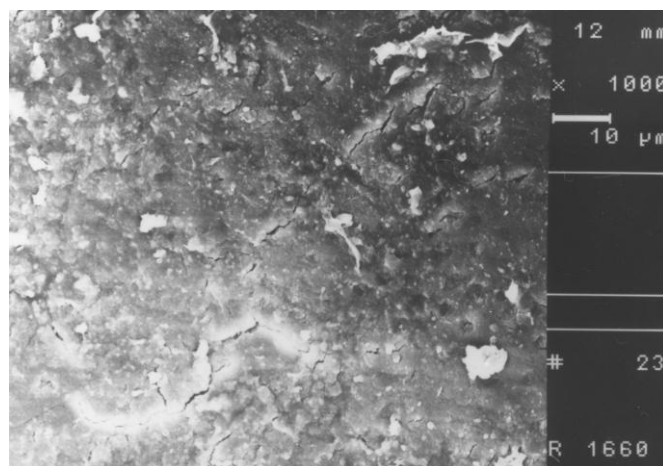


Abb. 34: Referenzfotographie – Smear-Layer Score 4

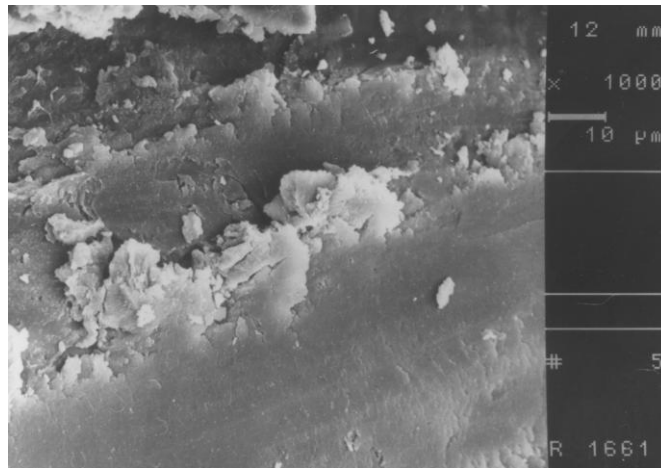


Abb. 35: Referenzfotographie – Smear-Layer Score 5

#### 4.11.4 Messung der Arbeitszeit

Die Arbeitszeit wurde bei jeder einzelnen Präparation mit einer Stoppuhr gemessen. Dabei wurde die Zeit für Instrumentenwechsel nicht beachtet. Für die Spülzeit wurde während der Probepreparationen für jedes System ein Mittelwert erhoben, sodass die Spülzeit bei allen Zähnen einer Versuchsgruppe standardisiert war.

#### 4.11.5 Arbeitssicherheit

Für die Protokollierung der Arbeitssicherheit umfassten die Arbeitsbögen für die drei verschiedenen Systeme jeweils einen Abschnitt, in dem Zwischenfälle wie beispielsweise eine Instrumentenfaktur, eine Stufenbildung oder der Verlust der Arbeitslänge dokumentiert wurden.

#### 4.11.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Medizinische Statistik der Universitätsmedizin Göttingen. Für die Auswertung der Versuchsparameter wurden folgende Tests verwendet:

- Wurzelkanalbegradigung: Kruskal-Wallis-Test
- Veränderung des Krümmungsradius: Kruskal-Wallis-Test

- Beurteilung des Wurzelkanalquerschnitts
  - qualitativ: Kruskal-Wallis-Test
  - quantitativ: Kruskal-Wallis-Test
  
- Sauberkeit der Wurzelkanalwand
  - Smear-Layer: Kruskal-Wallis-Test
  - Debris: Kruskal-Wallis-Test
  
- Zeitaufwand: Kruskal-Wallis-Test  
Mann-Whitney-U-Test
  
- Arbeitssicherheit: Kruskal-Wallis-Test.

Das Signifikanzniveau lag jeweils bei  $p = 0,05$ .

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Wurzelkanalbegradigung

Um die Veränderung der Wurzelkanalkrümmung und des Krümmungsradius beurteilen zu können, wurde die Vermessung des Wurzelkanals zunächst vor der Präparation vorgenommen. Für den Mittelwert der präoperativen Krümmungswinkel wurde für die drei Systeme eine Abweichung von 2° toleriert. Hinsichtlich des durchschnittlichen präoperativen Krümmungsradius konnten Differenzen von bis zu 2 mm akzeptiert werden (Abb. 36 u. 37).

Mesiobukkaler Wurzelkanal		Mesiolinguale Wurzelkanal	
S5	28,3°	S5	25,5°
<i>Mtwo</i>	26,9°	<i>Mtwo</i>	25,8°
PTU	27,8°	PTU	25,5°

Abb. 36: Mittelwerte der Wurzelkanalkrümmungswinkel in den Versuchsgruppen

Mesiobukkaler Wurzelkanal		Mesiolinguale Wurzelkanal	
S5	13,2 mm	S5	14,7 mm
<i>Mtwo</i>	12,3 mm	<i>Mtwo</i>	12,8 mm
PTU	12,7 mm	PTU	13,8 mm

Abb. 37: Mittelwerte der Krümmungsradien in den Versuchsgruppen

Nach der Wurzelkanalpräparation, die in allen drei Versuchsgruppen bis zu der Größe 30 erfolgte, wurden die Krümmungswinkel postoperativ erneut dokumentiert. Aus den beiden Werten, die sich für jeden Wurzelkanal ergeben, wurde die Winkeldifferenz ermittelt.

Die Ergebnisse wurden für den mesiobukkalen und den mesiolinguale Wurzelkanal separat aufgeführt und für die einzelnen Systeme in den Abb. 38 – 43 (S. 54 – 56) zusammengefasst. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der Wurzelkanalbegradigung nach der Präparation mit den drei Systemen ähnlich ausfielen. In allen drei Versuchsgruppen liegt die Wurzelkanalbegradigung in über 50% der Fälle bei weniger als 1° (S5 mb: 70%, S5 ml: 58%, *Mtwo* mb: 70%, *Mtwo* ml: 72%, PTU mb: 55%, PTU ml: 74%), (Abb. 54, S. 60). Die maximale Begradigung in der Versuchsgruppe S5 liegt bei 5,9°, in der Versuchsgruppe *Mtwo* bei 5,8° und in der Versuchsgruppe ProTaper Universal bei 7,7°.

Der Mittelwert der Auswertung für die mit dem *Mtwo*-System präparierten Zähne ist mit 0,9 Grad (mesiobukkaler Wurzelkanal) und 0,7 Grad (mesiolingualer Wurzelkanal) der niedrigste in der Untersuchung. Gefolgt von dem System S5 (mesiobukkal: 1,1°, mesiolingual: 1°), während nach der Präparation mit dem ProTaper Universal-System die stärkste Begradigung auftrat (mesiobukkal: 1,4°, mesiolingual: 1,3°). Bei der Betrachtung der Ergebnisse für den Krümmungsradius lässt sich feststellen, dass die durchschnittliche Veränderung in den Versuchsgruppen ähnlich ist (S5 mb: 0,7 mm, S5 ml: 1,1 mm, *Mtwo* mb: 0,5 mm, *Mtwo* ml: 0,8 mm, PTU mb: 0,9 mm, PTU ml: 0,8 mm). Die maximale Radiusveränderung ist in der S5-Gruppe mit 5,4 mm (mesiobukkal) und 4,2 mm (mesiolingual) am höchsten. Die niedrigsten Maxima sind in der *Mtwo*-Gruppe zu finden (mb: 1,8 mm, ml: 1,9 mm), während die ProTaper Universal-Gruppe mit 3,0 mm (mesiobukkal) und 3,1 mm (mesiolingual) zwischen den beiden Systemen liegt. In allen drei Versuchsgruppen liegt die Radiuszunahme in über 50 % der Fälle bei weniger als 1 mm (S5 mb: 85%, S5 ml: 53%, *Mtwo* mb: 85%, *Mtwo* ml: 67%, PTU mb: 55%, PTU ml: 68%), (Abb. 55, S. 60).

Für die statistische Auswertung wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Dieser Test dient zum Vergleich von mehr als zwei unabhängigen Versuchsgruppen und bestätigt, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Systemen hinsichtlich der Wurzelkanalbegradigung gibt (bukkal  $p = 0,50885$ , lingual  $p = 0,433$ ), (Abb. 44 u. 45, S. 57). Der gleiche Test wurde für die Bewertung des Radius genutzt. Auch hier gibt es keinen signifikanten Unterschied (bukkal  $p = 0,41854$ , lingual  $p = 0,50995$ ), (Abb. 46 u. 47, S. 57/58). Die Abbildungen 48 bis 53 (S. 58-60) veranschaulichen als positiv und als negativ zu bewertende Veränderungen der Wurzelkanalkrümmung.

Wurzel- kanal Nr.	Kanalkrümmung in Grad		Kanal- begradigung in Grad	Kanalradius in mm		Änderung des Radius in mm
	prä- operativ (ISO 15)	post- operativ (ISO 30)		präoperativ (ISO 15)	postoperativ (ISO 30)	
9	22,9	17,0	5,9	14,9	20,3	5,4
11	24,9	20,4	4,5	14,9	17,0	2,1
12	22,7	22,6	0,1	16,6	17,7	1,1
15	28,9	28,8	0,1	13,4	13,6	0,2
27	21,6	19,3	2,3	12,3	13,2	0,9
34	39,9	39,2	0,7	8,0	8,0	0
41	36,2	36,2	0	9,2	9,3	0,1
45	37,4	35,6	1,8	8,4	8,6	0,2
52	28,3	27,2	1,1	12,8	13,4	0,6
53	30,9	30,8	0,1	15,0	15,3	0,3
54	28,4	27,7	0,7	14,9	15,2	0,3
66	26,0	25,9	0,1	12,7	12,9	0,2
67	23,4	23,3	0,1	12,3	12,6	0,3
68	32,1	31,6	0,5	12,5	13,2	0,7
70	21,6	21,0	0,6	12,6	13,3	0,7
79	29,6	28,3	1,3	15,9	16,1	0,2
85	20,1	20,1	0	27,4	27,9	0,5
86	27,1	26,2	0,9	10,2	10,7	0,5
90	27,8	27,7	0,1	10,1	10,3	0,2
91	36,4	36,0	0,4	9,2	9,4	0,2
n						20
Minimum	20,1	17,0	0	8,0	8,0	0
Maximum	39,9	39,2	5,9	27,4	27,9	5,4
Mittelwerte	28,3	27,2	1,1	13,2	13,9	0,7

Abb. 38.: Veränderung des Krümmungswinkels und Krümmungsradius nach Aufbereitung der bukkalen (ungesägten) Kanäle mit dem System S5

Wurzel- kanal Nr.	Kanalkrümmung in Grad		Kanal- begradigung in Grad	Kanalradius in mm		Änderung des Radius in mm
	prä- operativ (ISO 15)	post- operativ (ISO 30)		präoperativ (ISO 15)	postoperativ (ISO 30)	
9	22,5	22,5	0	18,0	18,1	0,1
11	20,1	19,8	0,3	14,5	15,5	1,0
12	20,1	18,5	1,6	18,4	21,2	2,8
15	25,5	24,0	1,5	11,7	12,9	1,2
27	20,3	18,3	2,0	12,5	14,4	1,9
34	39,1	38,5	0,6	9,3	9,3	0
41	35,9	35,8	0,1	8,0	8,6	0,6
45	32,0	31,9	0,1	11,5	11,8	0,3
52	20,0	19,5	0,5	19,5	21,2	1,7
53	33,2	33,1	0,1	14,5	15,0	0,5
54	nicht rekonstruierbar *					
66	20,2	19,0	1,2	16,5	19,1	2,6
67	22,5	21,3	1,2	15,8	17,3	1,5
68	23,1	22,3	0,8	16,9	17,3	0,4
70	21,2	17,0	4,2	13,2	17,4	4,2
79	29,2	27,0	2,2	15,7	16,9	1,2
85	19,6	19,0	0,6	27,2	27,8	0,6
86	24,2	23,8	0,4	12,3	12,8	0,5
90	22,8	21,5	1,3	13,2	13,3	0,1
91	33,6	33,3	0,3	11,0	11,2	0,2
n						19
Minimum	20,0	18,3	0	8,0	8,6	0
Maximum	39,1	38,5	4,2	27,2	27,8	4,2
Mittelwerte	25,5	24,5	1	14,7	15,8	1,1

Abb. 39: Veränderung des Krümmungswinkels und Krümmungsradius nach Aufbereitung der lingualen (gesägten) Kanäle mit dem System S5

Wurzel-Kanal Nr.	Kanalkrümmung in Grad		Kanal-begradigung in Grad	Kanalradius in mm		Änderung des Radius in mm
	prä-operativ (ISO 15)	post-operativ (ISO 30)		präoperativ (ISO 15)	postoperativ (ISO 30)	
1	33,1	32,7	0,4	10,3	10,4	0,1
2	24,5	23,5	1,0	10,9	11,1	0,2
7	20,0	18,5	1,5	19,2	21,0	1,8
8	27,5	26,9	0,6	12,0	13,1	1,1
14	21,8	20,4	1,4	12,1	12,6	0,5
26	32,1	31,6	0,5	7,7	8,0	0,3
32	33,2	27,4	5,8	7,1	7,6	0,5
33	25,0	24,9	0,1	14,0	14,8	0,8
35	27,9	27,6	0,3	9,0	9,2	0,2
38	30,2	30,2	0	10,5	10,6	0,1
39	25,7	25,6	0,1	11,9	11,9	0
42	21,7	21,5	0,2	14,9	15,2	0,3
49	33,6	33,6	0	9,2	9,5	0,3
55	34,4	34,1	0,3	12,4	12,9	0,5
59	24,0	22,0	2,0	11,3	12,3	1,0
62	20,9	20,9	0	16,0	16,7	0,7
64	25,7	25,3	0,4	15,2	15,7	0,5
74	21,9	20,7	1,2	14,3	15,1	0,8
75	28,0	28,0	0	14,0	14,0	0
77	27,0	25,1	1,9	14,6	15,0	0,4
n						20
Minimum	20,0	18,5	0	7,1	7,6	0
Maximum	34,4	34,1	5,8	19,2	21,0	1,8
Mittelwerte	26,9	26,0	0,9	12,3	12,8	0,5

Abb. 40: Veränderung des Krümmungswinkels und Krümmungsradius nach Aufbereitung der bukkalen (ungesägten) Kanäle mit dem System Mtwo

Wurzel-Kanal Nr.	Kanalkrümmung in Grad		Kanal-begradigung in Grad	Kanalradius in mm		Änderung des Radius in mm
	prä-operativ (ISO 15)	post-operativ (ISO 30)		präoperativ (ISO 15)	postoperativ (ISO 30)	
1	31,6	31,5	0,1	11,8	11,9	0,1
2	20,1	18,1	2,0	9,6	11,1	1,5
7	20,7	20,4	0,3	18,0	19,1	1,1
8	24,8	24,5	0,3	14,7	14,9	0,2
14	20,6	18,7	1,9	13,7	14,7	1,0
26	37,7	36,7	1,0	9,9	10,7	0,8
32	28,0	27,9	0,1	8,5	9,7	1,2
33	25,8	25,5	0,3	14,7	15,6	0,9
35	20,2	19,8	0,4	12,1	12,2	0,1
38	28,1	28,1	0	13,5	13,8	0,3
39	nicht rekonstruierbar *					
42	22,4	20,6	1,8	11,1	11,5	0,4
49	38,8	38,0	0,8	8,6	9,5	0,9
55	32,6	32,5	0,1	11,2	13,1	1,9
59	25,9	24,7	1,2	10,3	11,1	0,8
62	20,1	18,3	1,8	11,9	12,6	0,7
64	Fraktur					
74	22,9	22,0	0,9	14,2	15,7	1,5
75	20,6	20,6	0	19,9	20,8	0,9
77	23,7	23,6	0,1	17,3	17,5	0,2
n						18
Minimum	20,1	18,1	0	8,5	9,5	0,1
Maximum	38,8	38,0	2,0	19,9	20,8	1,9
Mittelwerte	25,8	25,1	0,7	12,8	13,6	0,8

Abb. 41: Veränderung des Krümmungswinkels und Krümmungsradius nach Aufbereitung der lingualen (gesägten) Kanäle mit dem System Mtwo

Wurzel-Kanal Nr.	Kanalkrümmung in Grad		Kanal-begradigung in Grad	Kanalradius in mm		Änderung des Radius in mm
	prä-operativ (ISO 15)	post-operativ (ISO 25)		präoperativ (ISO 15)	postoperativ (ISO 25)	
4	22,4	19,7	2,7	13,6	15,1	1,5
6	29,2	29,0	0,2	12,4	12,5	0,1
10	26,3	24,7	1,6	13,7	14,7	1,0
13	20,1	18,1	2,0	16,9	19,9	3,0
16	28,0	25,3	2,7	7,1	8,0	0,9
17	22,4	19,3	3,1	14,9	16,0	1,1
18	34,3	32,6	1,7	10,7	10,9	0,2
21	27,9	26,5	1,4	10,4	11,6	1,2
25	29,1	28,7	0,4	11,0	11,6	0,6
28	25,9	25,6	0,3	13,6	14,0	0,4
36	20,3	19,8	0,5	27,4	27,9	0,5
43	32,6	31,8	0,8	10,5	10,9	0,4
47	25,2	24,6	0,6	11,7	11,9	0,2
63	26,2	24,6	1,6	12,7	14,6	1,9
71	25,9	25,1	0,8	13,5	13,6	0,1
72	32,3	26,7	5,6	6,4	7,7	1,3
80	36,2	35,2	1,0	11,6	12,8	1,2
82	28,9	28,3	0,6	11,1	11,6	0,5
83	32,6	32,5	0,1	10,4	11,4	1,0
87	30,7	30,4	0,3	14,4	14,5	0,1
n						20
Minimum	20,1	18,1	0,1	6,4	7,7	0,1
Maximum	36,2	35,2	5,6	27,4	27,9	3,0
Mittelwerte	27,8	24,4	1,4	12,7	13,6	0,9

Abb. 42: Veränderung des Krümmungswinkels und Krümmungsradius nach Aufbereitung der bukkalen (ungesägten) Kanäle mit dem System ProTaper Universal

Wurzel-Kanal Nr.	Kanalkrümmung in Grad		Kanal-begradigung in Grad	Kanalradius in mm		Änderung des Radius in mm
	prä-operativ (ISO 15)	post-operativ (ISO 25)		präoperativ (ISO 15)	postoperativ (ISO 25)	
4	22,2	22,0	0,2	12,6	13,3	0,7
6	27,3	26,9	0,4	12,4	13,3	0,9
10	23,4	23,4	0	17,8	17,9	0,1
13	20,3	17,6	2,7	12,4	14,8	2,4
16	25,8	25,5	0,3	8,3	9,0	0,7
17	22,7	17,0	5,7	14,3	17,4	3,1
18	39,4	39,4	0	9,9	10,0	0,1
21	22,3	21,9	0,4	14,4	14,8	0,4
25	26,9	26,5	0,4	13,1	13,2	0,1
28	27,7	26,4	1,3	10,2	10,7	0,5
36	21,5	21,5	0	24,5	25,2	0,7
43	21,2	20,8	0,4	17,4	17,7	0,3
47	25,0	24,6	0,4	9,7	9,9	0,2
63	26,1	25,6	0,5	13,1	14,6	1,5
71	20,9	20,6	0,3	15,9	15,9	0
72	32,3	24,6	7,7	6,5	9,0	2,5
80	28,3	28,1	0,2	16,6	17,8	1,2
82	24,3	20,1	4,2	14,6	15,0	0,4
83	nicht rekonstruierbar *					
87	27,2	27,2	0	17,6	18,7	1,1
n						19
Minimum	20,3	17,0	0	6,5	9,0	0
Maximum	39,4	39,4	7,7	24,5	25,2	3,1
Mittelwerte	25,5	24,2	1,3	13,8	14,6	0,8

Abb. 43.: Veränderung des Krümmungswinkels und Krümmungsradius nach Aufbereitung der lingualen (gesägten) Kanäle mit dem System ProTaper Universal



\* als nicht rekonstruierbar werden die Molaren geführt, welche nach dem Sägevorgang im Küvettensystem nicht eindeutig repositioniert werden konnten, sodass eine weitere Wurzelkanalpräparation nicht möglich war

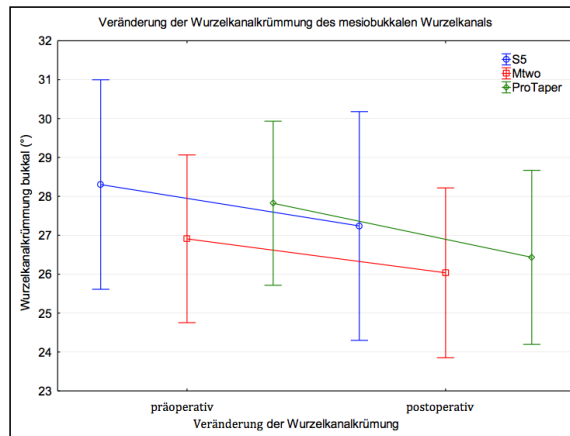


Abb. 44: Veränderung der Wurzelkanalkrümmung der mesiobukkalen Wurzelkanäle für alle 3 Systeme

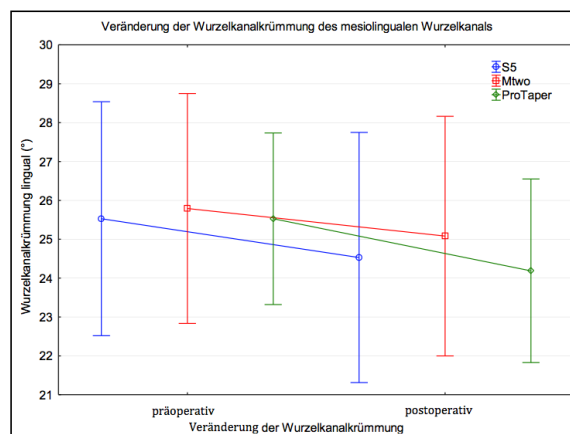


Abb. 45: Veränderung der Wurzelkanalkrümmung der mesiolingualen Wurzelkanäle für alle 3 Systeme

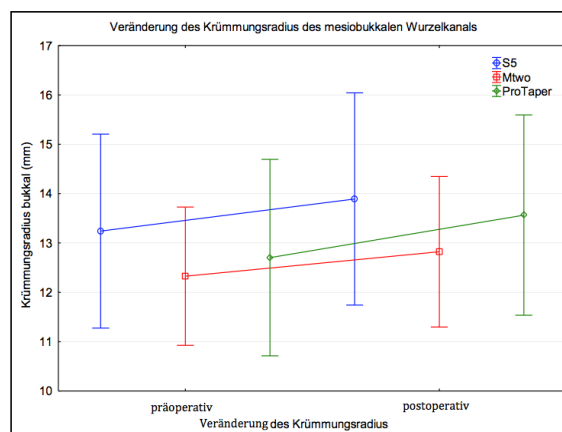


Abb. 46: Veränderung des Krümmungsradius der mesiobukkalen Wurzelkanäle für alle 3 Systeme

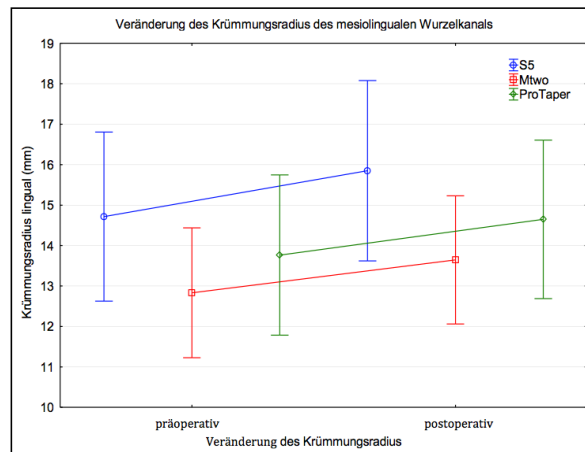


Abb. 47: Veränderung des Krümmungsradius der mesiolingualen Wurzelkanäle für alle 3 Systeme

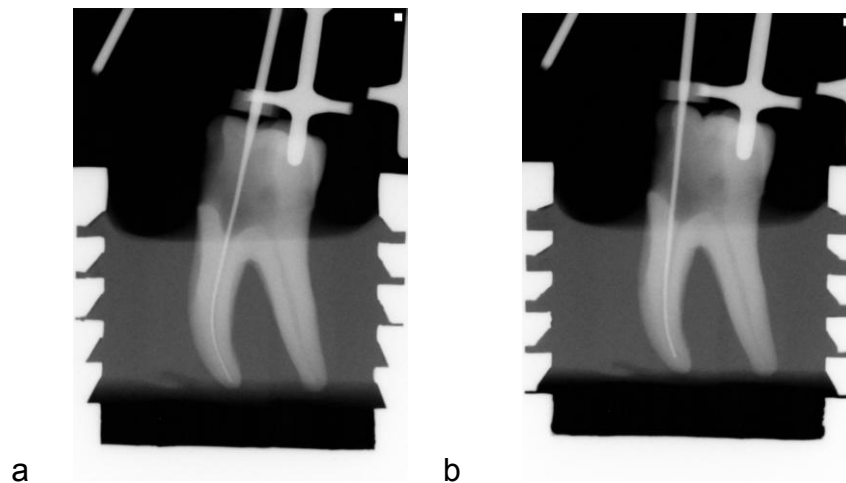


Abb 48. a – b: Positives Aufbereitungsergebnis mit dem S5-System  
 a) präoperative Röntgenaufnahme  
 b) postoperative Röntgenaufnahme

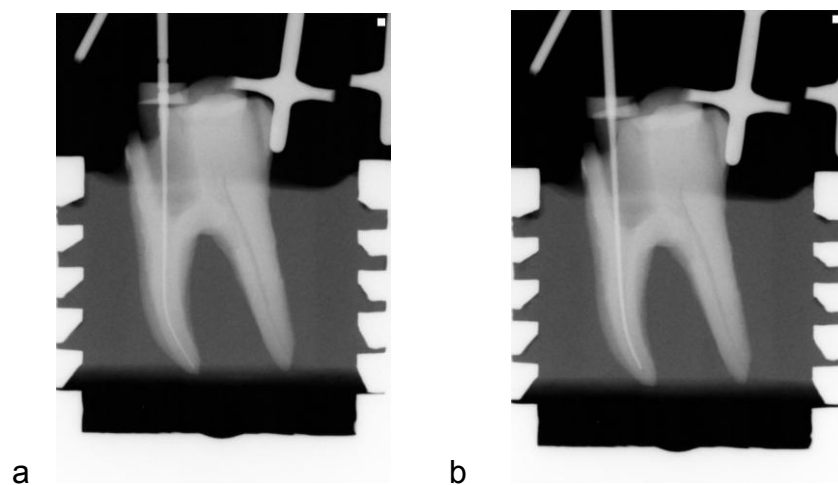
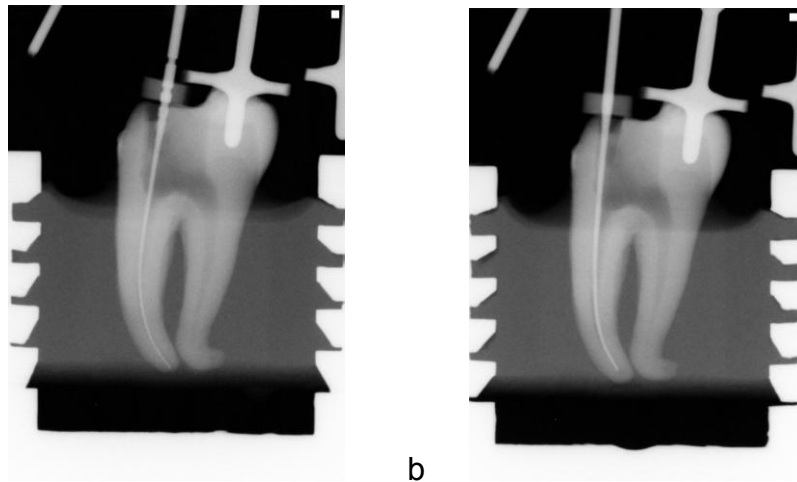


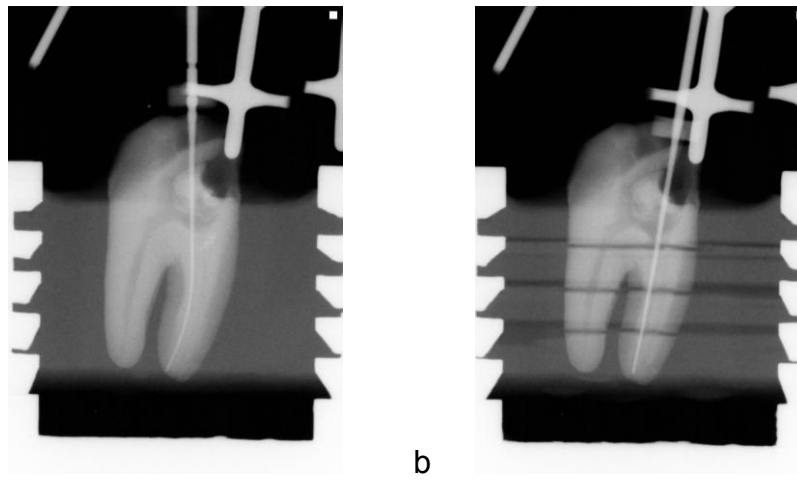
Abb. 49 a – b: Positives Aufbereitungsergebnis mit dem Mtwo-System  
 a) präoperative Röntgenaufnahme  
 b) postoperative Röntgenaufnahme



a

b

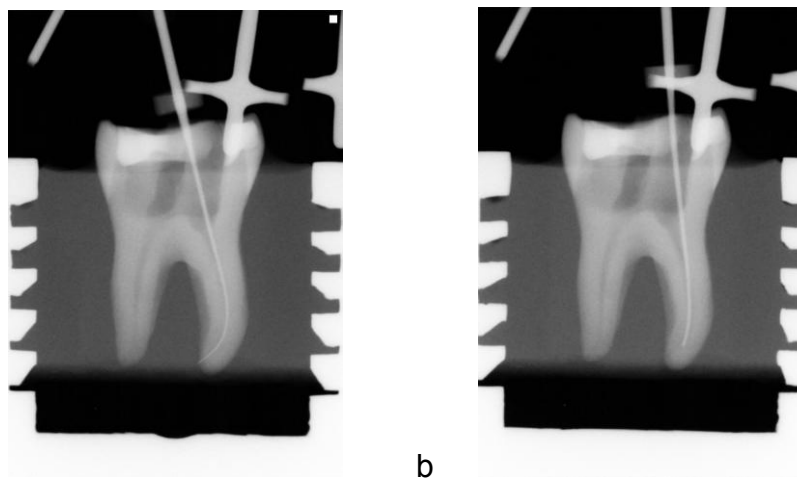
Abb. 50 a – b: Positives Aufbereitungsergebnis mit dem PTU-System  
 a) präoperative Röntgenaufnahme  
 b) postoperative Röntgenaufnahme



a

b

Abb. 51 a – b: Negatives Aufbereitungsergebnis mit dem S5-System  
 a) präoperative Röntgenaufnahme  
 b) postoperative Röntgenaufnahme



a

b

Abb. 52 a – b: Negatives Aufbereitungsergebnis mit dem Mtwo-System  
 a) präoperative Röntgenaufnahme  
 b) postoperative Röntgenaufnahme

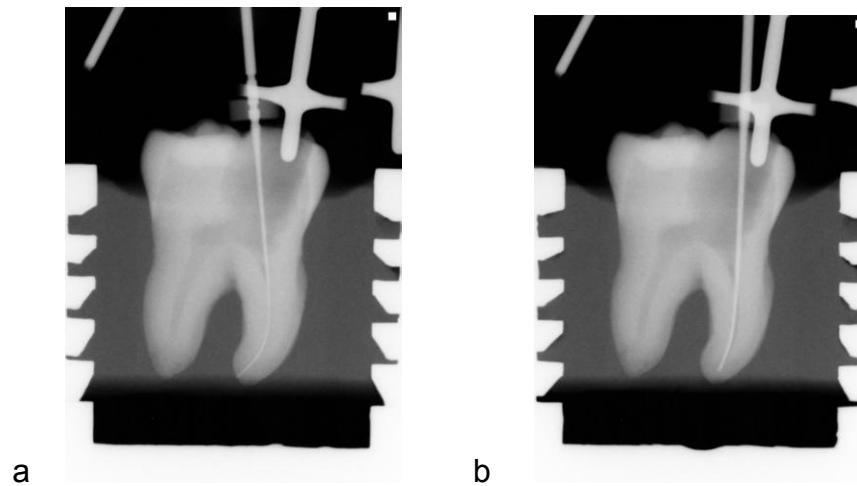


Abb. 53 a – b: Negatives Aufbereitungsergebnis mit dem PTU-System  
 a) präoperative Röntgenaufnahme  
 b) postoperative Röntgenaufnahme

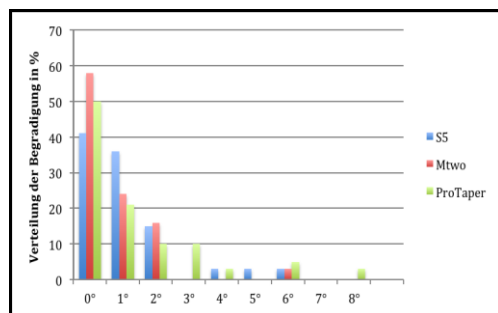


Abb. 54: Prozentuale Verteilung der Wurzelkanalbegradigung für alle 3 Systeme

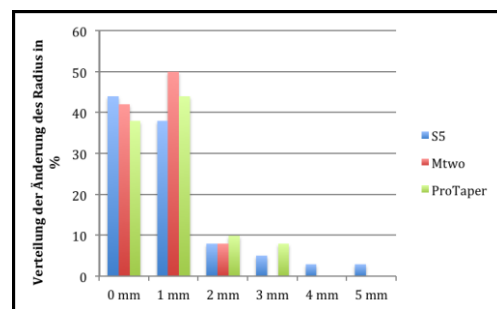


Abb. 55: Prozentuale Verteilung der Radiusveränderung für alle 3 Systeme

## 5.2 Beurteilung des Wurzelkanalquerschnitts

Die Querschnittsbeurteilung, welche ausschließlich für die mesiolingualen Wurzelkanäle vorgenommen wurde, erfolgte qualitativ und quantitativ. Die koronalen, medialen und apikalen Proben wurden getrennt voneinander anhand der prä- und postoperativen Fotografien bewertet.

### 5.2.1 Qualitative Querschnittsbeurteilung

Für die Auswertung wurden die resultierenden Querschnittsmorphologien in die drei Kategorien rund, oval und unregelmäßig eingestuft. Die runden und ovalen Querschnittsformen wurden als akzeptabel bewertet. In der S5- und in der ProTaper Universal-Gruppe wurden jeweils 57 Proben beurteilt, da in beiden Versuchsgruppen der mesiolinguale Wurzelkanal eines Zahns nach der

Segmentierung nicht rekonstruiert werden konnte. In der *Mtwo*-Gruppe wurden 54 Proben in die Auswertung einbezogen, da auch in dieser Versuchsgruppe ein Wurzelkanal nicht rekonstruiert werden konnte und es bei einer Präparation zu einer Instrumentenfraktur kam. Die Ergebnisse sind in der Abb. 56 aufgeführt. Für den koronalen Wurzelkanalabschnitt ergeben sich für die Versuchsgruppen S5 und *Mtwo* jeweils 14 akzeptable Querschnitte, in der ProTaper Universal-Gruppe sind es 15. Im medialen Wurzelkanalanteil stehen 14 akzeptable Querschnitte in der S5- sowie in der ProTaper Universal-Gruppe 12 akzeptablen Fällen in der *Mtwo*-Gruppe gegenüber. Bei der Bewertung der apikalen Segmente ergeben sich 11 akzeptable Querschnitte für das System S5, wohingegen die Zahl in den anderen beiden Versuchsgruppen bei 16 runden oder ovalen Querschnittsformen liegt. Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die Anzahl der akzeptablen Formen in der S5-Gruppe im apikalen Bereich etwas geringer ausfällt als im medialen und koronalen Bereich. Für *Mtwo* und ProTaper Universal weisen die apikalen Segmente jedoch die niedrigste Anzahl nicht akzeptabler Querschnitte auf.

Die statistische Auswertung wurde mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests durchgeführt. Dabei wurden die drei unterschiedlichen Querschnittsformen für das koronale (Abb. 57, S. 62), mediale (Abb. 58, S. 62) und apikale (Abb. 59, S. 62) Segment analysiert. Zusätzlich wurde getestet, ob es einen Unterschied hinsichtlich der akzeptablen und nicht akzeptablen Ergebnisse gibt. In keinem der Wurzelkanalabschnitte konnte ein signifikanter Unterschied beim Vergleich der drei Systeme festgestellt werden (koronal  $p = 0,9561$ , medial  $p = 0,8341$ , apikal  $p = 0,0744$ ).

Kanalanteil	Querschnittsform	S5	a	<i>Mtwo</i>	a	PTU	a
koronal	rund	13	14	10	14	10	15
	oval	1		4		5	
	unregelmäßig	5	5	4	4	4	4
medial	rund	9	14	7	12	10	14
	oval	5		5		4	
	unregelmäßig	5	5	6	6	5	5
apikal	rund	6	11	8	16	9	16
	oval	5		8		7	
	unregelmäßig	8	8	2	2	3	3
		n=	57	n=	54	n=	57

Abb. 56: Verteilung der Querschnittsformen nach der Aufbereitung in den drei untersuchten Kanalabschnitten für alle drei Aufbereitungssysteme

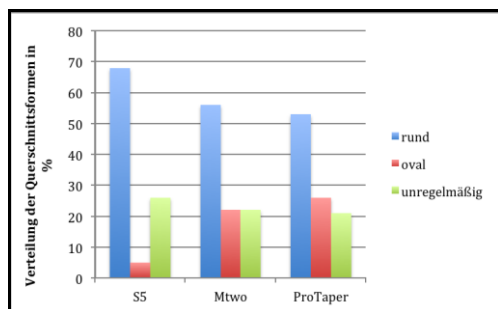


Abb. 57: Prozentuale Verteilung der Querschnittsformen für die koronalen Segmente

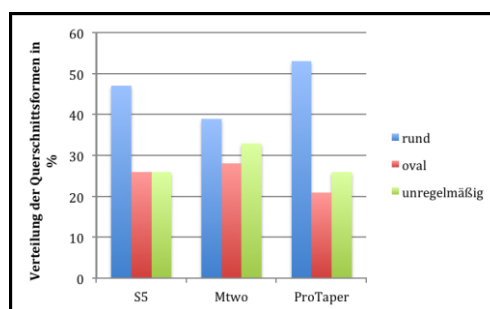


Abb. 58: Prozentuale Verteilung der Querschnittsformen für die medialen Segmente

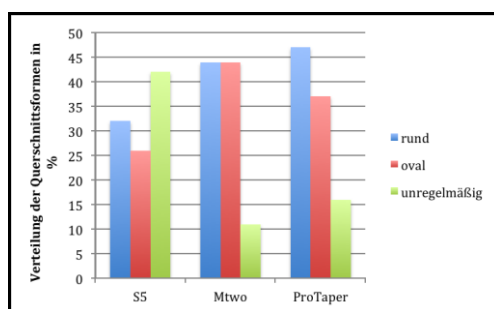


Abb. 59: Prozentuale Verteilung der Querschnittsformen für die apikalen Segmente

### 5.2.2 Quantitative Querschnittsbeurteilung

Die quantitative Auswertung wurde ebenfalls mithilfe der Photographien durchgeführt. Es wurde beurteilt, wie der präparierte Wurzelkanal den ursprünglichen Wurzelkanal umgibt. Dafür wurden die prä- und postoperativen Querschnittsbilder mithilfe des Computerprogramms Photoshop übereinander gelagert. Ein Wert von 0% Deckung von prä- und postoperativem Kanalriss bedeutet, dass der ursprüngliche Wurzelkanal vollständig bearbeitet wurde. Zunehmende Prozentzahlen weisen auf einen steigenden Anteil nicht präparierter Wurzelkanalwandbereiche hin. Ein verbleibender Wandkontakt von <25% bedeutet, dass mehr als drei Viertel des ursprünglichen Wurzelkanalwandanteils präpariert wurden. Lediglich die Wandkontakte von 0% und <25% wurden als akzeptabel eingestuft. Die Anzahl der ausgewerteten Photographien entspricht derjenigen der qualitativen Querschnittsbeurteilung.

Die Auswertung (Abb. 60, S. 63), welche für die apikalen, medialen und koronalen Wurzelkanalsegmente separat gemacht wurde, ergibt keine Unterschiede zwischen den Präparationssystemen.

Für die statistische Auswertung wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Dabei traten keine signifikanten Unterschiede auf (koronal:  $p = 0,5890$ , medial:  $p = 0,8983$ , apikal:  $p = 0,4741$ ), (Abb. 61 – 63).

System	Segment	Wandkontakte				
		0%	<25%	>25%	>50%	>75%
S5	koronal	11	6	2	0	0
	medial	9	7	2	1	0
	apikal	8	5	2	4	0
Mtwo	koronal	11	5	0	2	0
	medial	8	8	1	1	0
	apikal	4	5	6	3	0
PTU	koronal	12	3	3	1	0
	medial	9	7	2	1	0
	apikal	6	4	4	5	0

Abb. 60: Darstellung des Wandkontaktes zwischen aufbereitetem und ursprünglichem Kanal untergliedert nach den untersuchten Kanalabschnitten

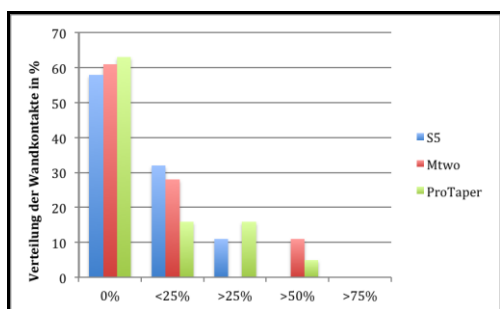


Abb. 61: Prozentuale Verteilung der Wandkontakte für die koronalen Segmente

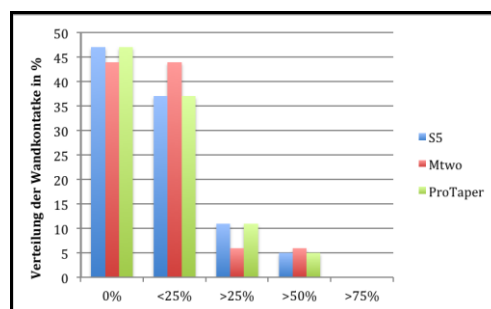


Abb. 62: Prozentuale Verteilung der Wandkontakte für die medialen Segmente

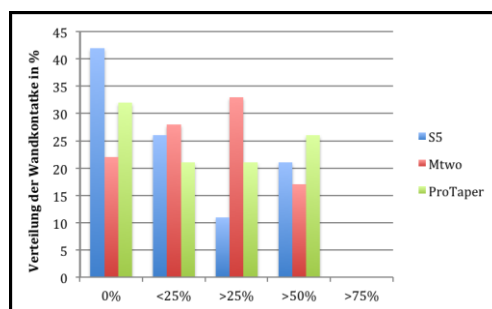


Abb. 63: Prozentuale Verteilung der Wandkontakte für die apikalen Segmente

### 5.3 Rasterelektronenmikroskopische Auswertung

Die Beurteilung der Sauberkeit erfolgte ausschließlich für die mesiobukkalen Wurzelkanäle, da diese vor der Segmentierung präpariert und gespült wurden. Die Parameter Smear-Layer und Debris wurden anhand einer 5-Score-Einteilung bewertet. Die apikalen, medialen und koronalen Segmente wurden getrennt

voneinander bewertet. In allen drei Versuchsgruppen wurden jeweils 60 Querschnittsfotographien von 2 Untersuchern ausgewertet, denen die Gruppenzugehörigkeit der Präparate nicht bekannt war.

### 5.3.1 Smear Layer

Die Abb. 64 und 65 fassen die Ergebnisse zusammen. Beim Vergleich der zu untersuchenden Systeme fällt auf, dass es insgesamt mehr Proben mit einer akzeptablen Smear-Layer-Entfernung gibt. In der S5-Gruppe wurden 85% der Proben als akzeptabel bewertet, in der *Mtwo*-Gruppe 73% und in der ProTaper Universal-Gruppe 78%. Die besten Ergebnisse konnten für die medialen Segmente der S5- sowie der ProTaper Universal-Gruppe nachgewiesen werden. Hier lag der Anteil der akzeptablen Proben bei 95%. Die Anzahl der Proben, bei denen keine oder fast keine Schmierschicht zu erkennen war, die Dentinkanäle offen waren und die somit den Score 1 erhielten, war für alle drei Präparationssysteme ähnlich (S5 36 Proben, *Mtwo* 37 Proben, PTU 33 Proben). Die Verteilung der weiteren Scores kann aus den Abb. 66 – 71 (S. 65) entnommen werden.

Der Kruskal-Wallis-Test, welcher für die statistische Auswertung verwendet wurde, ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den drei Systemen (koronal  $p = 0,9059$ , medial  $p = 0,6284$ , apikal  $p = 0,7325$ ).

Smearlayer	Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
<b>S5</b>	71	33	7	7	2
<b><i>Mtwo</i></b>	75	12	14	13	6
<b>ProTaper</b>	66	28	18	7	1

Abb. 64: Score-Verteilung in den 3 Versuchsgruppen

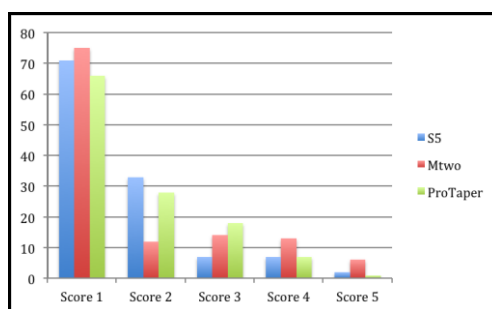


Abb. 65: Score-Verteilung in den 3 Versuchsgruppen



<i>S5</i>				
	Koronal	medial	apikal	gesamt
Score 1	15	15	6	36
Score 2	3	4	8	15
Score 3	1	1	2	4
Score 4	1	-	3	4
Score 5	-	-	1	1
				n= 60

Abb. 66: Bewertung der Sauberkeit (Smear Layer) der Kanalwände nach Aufbereitung mit dem S5-System

<i>Mtwo</i>				
	Koronal	medial	apikal	gesamt
Score 1	14	13	10	37
Score 2	3	3	1	7
Score 3	2	2	2	6
Score 4	1	1	5	7
Score 5	-	1	2	3
				n= 60

Abb. 67: Bewertung der Sauberkeit (Smear Layer) der Kanalwände nach Aufbereitung mit dem Mtwo-System

<i>ProTaper</i>				
	Koronal	medial	apikal	gesamt
Score 1	15	14	4	33
Score 2	3	5	6	14
Score 3	2	1	6	9
Score 4	-	-	3	3
Score 5	-	-	1	1
				n= 60

Abb. 68: Bewertung der Sauberkeit (Smear Layer) der Kanalwände nach Aufbereitung mit dem ProTaper-System

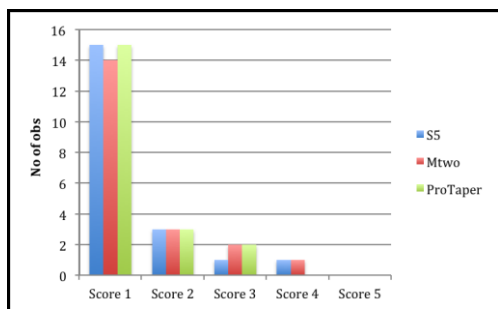


Abb. 69: Prozentuale Darstellung der Reinigungswirkung (Smear Layer) für den koronalen Wurzelkanalabschnitt

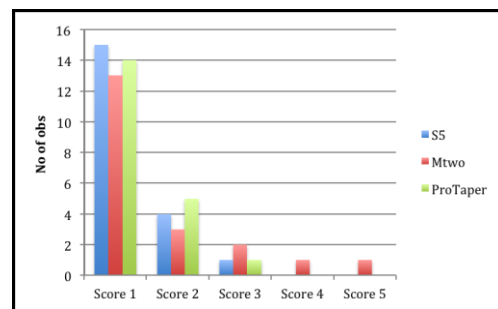


Abb. 70: Prozentuale Darstellung der Reinigungswirkung (Smear Layer) für den medialen Wurzelkanalabschnitt

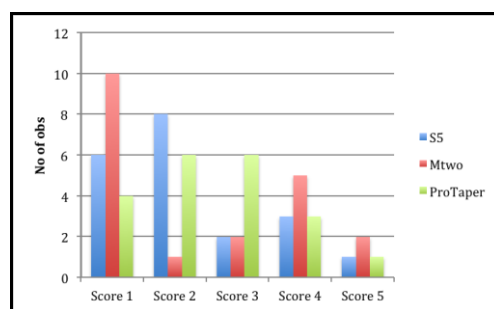


Abb. 71: Prozentuale Darstellung der Reinigungswirkung (Smear Layer) für den apikalen Wurzelkanalabschnitt

## 5.3.2 Debris

Die Abb. 72 bis 79 (S. 66-67) fassen die Ergebnisse zusammen. Eine Bewertung mit Score 1 und Score 2 wurde erneut als akzeptabel eingestuft. In den Versuchsgruppen S5 und ProTaper Universal konnte die Mehrheit der Proben als akzeptabel gewertet werden (S5 57%, PTU 60%), wohingegen in der *Mtwo*-Gruppe dieser Anteil gering unter der Hälfte liegt (47%). Die Verteilung der Scores 3 und 4 zeigt keine wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Systemen. Auffällig ist, dass der Score 5 für die mit dem ProTaper Universal-System präparierten Proben kein einziges Mal vergeben wurde (S5: 1 Probe, *Mtwo*: 3 Proben). Insgesamt fällt die Bewertung für den koronalen sowie den medialen Abschnitt positiver aus als für den apikalen Bereich. Die statistische Analyse, welche mit dem Kruskal-Wallis-Test durchgeführt wurde, belegt die Ergebnisse. So kann kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des verbliebenen Debris für die drei Systeme festgestellt werden (koronal  $p = 0,1574$ , medial  $p = 0,2664$ , apikal  $p = 0,3476$ ).

Debris	Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
S5	34	32	42	10	2
<i>Mtwo</i>	49	10	36	19	6
PTU	61	10	31	18	-

Abb. 72: Score-Verteilung in den 3 Versuchsgruppen

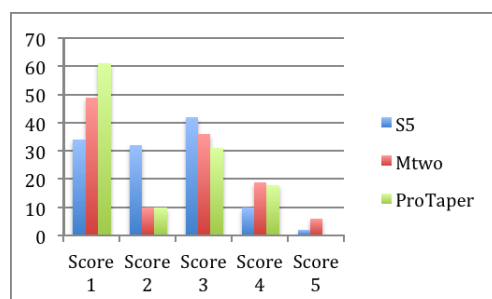


Abb. 73: Score-Verteilung in den 3 Versuchsgruppen

S5				
	Koronal	medial	apikal	gesamt
Score 1	9	5	4	18
Score 2	5	6	5	16
Score 3	6	8	7	21
Score 4	-	1	3	4
Score 5	-	-	1	1
				n= 60

Abb. 74: Bewertung der Sauberkeit (Debris) der Kanalwände nach Aufbereitung mit dem S5-System

<i>Mtwo</i>				
	Koronal	medial	apikal	gesamt
Score 1	9	11	3	23
Score 2	3	1	1	5
Score 3	6	6	6	18
Score 4	2	1	8	11
Score 5	-	1	2	3
				n= 60

Abb. 75: Bewertung der Sauberkeit (Debris) der Kanalwände nach Aufbereitung mit dem Mtwo-System

<i>ProTaper Universal</i>				
	Koronal	medial	apikal	gesamt
Score 1	15	12	4	31
Score 2	1	3	1	5
Score 3	3	2	10	15
Score 4	1	3	5	9
Score 5	-	-	-	-
				n= 60

Abb. 76: Bewertung der Sauberkeit (Debris) der Kanalwände nach Aufbereitung mit dem ProTaper Universal-System

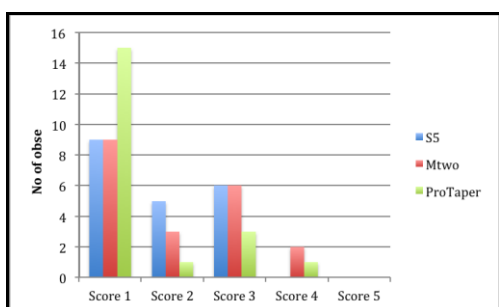


Abb. 77: Prozentuale Verteilung der Reinigungswirkung (Debris) für den koronalen Wurzelkanalabschnitt

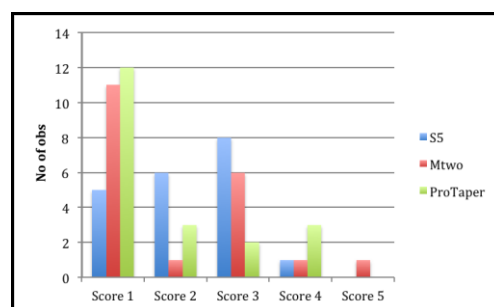


Abb. 78: Prozentuale Verteilung der Reinigungswirkung (Debris) für den medialen Wurzelkanalabschnitt

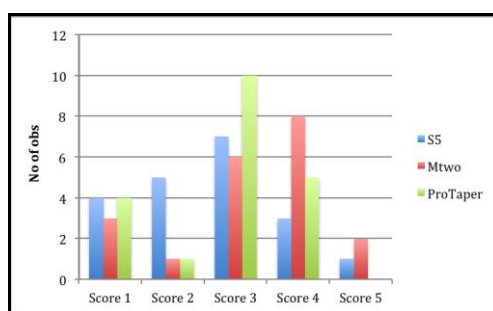


Abb. 79: Prozentuale Verteilung der Reinigungswirkung (Debris) für den apikalen Wurzelkanalabschnitt

## 5.4 Zeitaufwand

Der Zeitaufwand spielt im Zuge einer endodontischen Behandlung eine wichtige Rolle. Die für eine Wurzelkanalpräparation benötigte Zeit ist speziell bei maschinellen Systemen hinsichtlich einer effizienten Arbeitsweise in der Praxis

ein wesentlicher Aspekt. Der Zeitaufwand ergibt sich als die Summe aus der reinen Arbeitszeit (AZ) mit den einzelnen Instrumenten und der Zeit, die zwischen der Anwendung der Instrumente und in die Spülung des Wurzelkanals (SZ) investiert wird. Die Aufbereitungszeit wurde jeweils für den mesiobukkalen und mesiolingualen Wurzelkanal getrennt betrachtet. Die Anzahl der Instrumente in den Versuchsgruppen war nicht einheitlich. Die Sequenz bestand aus acht Instrumenten in der S5-Gruppe, aus fünf Feilen in der *Mtwo*-Gruppe und aus sieben Instrumenten in der ProTaper Universal-Gruppe. Für die Spülzeit wurde anhand von repräsentativen Vorversuchen ein Mittelwert erfasst, welcher zur Arbeitszeit addiert wurde. Der Mittelwert ergab sich aus der Summe der Spülungen zwischen der Verwendung der unterschiedlichen Feilen und der Abschlussspülung. Die Ergebnisse sind in den Abb. 80 bis 82 (S.69 – 70) dokumentiert. Beim Vergleich des durchschnittlichen Zeitaufwandes ergeben sich Unterschiede bei den mesiobukkalen und mesiolingualen Wurzelkanälen. In den Versuchsgruppen S5 und *Mtwo* lag der Mittelwert für den mesiobukkalen Wurzelkanal (S5 329 sec., *Mtwo* 293 sec.) unter dem Wert für den mesiolingualen Wurzelkanal (S5 339 sec., *Mtwo* 329 sec.). In der ProTaper Universal-Gruppe ist das Ergebnis umgekehrt. Für den mesiobukkalen Wurzelkanal wurden durchschnittlich 369 Sekunden benötigt, wobei der Mittelwert des mesiolingualen Wurzelkanals bei 334 Sekunden liegt.

Die statistische Analyse wurde zunächst mit dem Kruskal-Wallis-Test vorgenommen. Im Gegensatz zum mesiolingualen Wurzelkanal ( $p = 0,499$ ), bei dem es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Versuchsgruppen gab, konnte für den mesiobukkalen Wurzelkanal ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden ( $p = 0,000$ ). Mithilfe des Mann-Whitney-U-Tests wurden die drei Versuchsgruppen jeweils gegeneinander getestet, um zu prüfen, ob sich alle drei Systeme signifikant voneinander unterscheiden. Die Ergebnisse belegen diese Vermutung (S5 zu *Mtwo*  $p = 0,000027$ , S5 zu PTU  $p = 0,046597$ , *Mtwo* zu PTU  $p = 0,000005$ ).

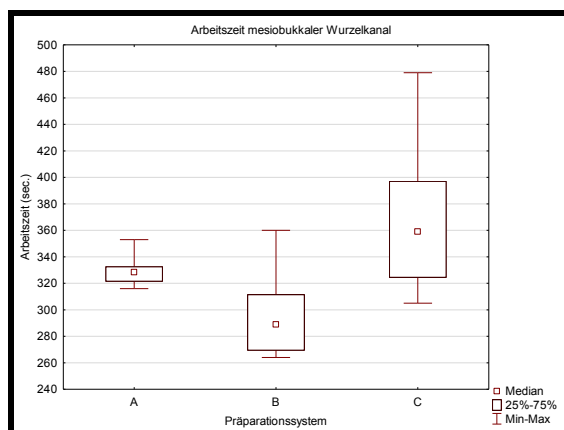


Abb. 80: Graphische Darstellung der benötigten Arbeitszeit (=Summe aus Präparations- und Spülzeit) für den mesiobukkalen Wurzelkanal, A: S5, B: Mtwo, C: PTU

Aufbereitungszeit der ungesägten Kanäle (sec.)								
S5			Mtwo			PTU		
AZ gesamt	AZ + SZ	SZ=252	AZ gesamt	AZ + SZ	SZ=207	AZ gesamt	AZ + SZ	SZ=237
78	330		85	292		109	346	
67	319		58	265		153	390	
78	330		113	320		242	479	
77	329		60	267		124	361	
64	316		57	264		68	305	
81	333		86	293		76	313	
70	322		103	310		230	467	
70	322		153	360		191	428	
101	353		85	292		73	310	
85	337		71	278		92	329	
70	322		106	313		131	368	
66	318		60	267		167	404	
70	322		82	289		77	314	
69	321		115	322		84	321	
79	331		77	284		137	374	
76	328		58	265		91	328	
88	340		124	331		153	390	
67	319		65	272		92	329	
80	332		73	280		120	357	
91	342		82	289		221	458	
n	20		n	20		n	20	
Minimum	64		Minimum	58		Minimum	68	
Maximum	101		Maximum	153		Maximum	242	
Mittelwert	76	328	Mittelwert	86	293	Mittelwert	132	369

Abb. 81: Zeitaufwand für die Aufbereitung der ungesägten Kanäle mit den 3 Systemen S5, Mtwo und ProTaper Universal;  
AZ = Summe der Aufbereitungszeit, SZ= Summe der durchschnittlichen Spülzeit

Aufbereitungszeit der gesägten Kanäle (sec.)									
S5			Mtwo			PTU			
AZ gesamt	AZ + SZ SZ=252		AZ gesamt	AZ + SZ SZ=207		AZ gesamt	AZ + SZ SZ=237		
81	333		158	365		96	333		
73	325		64	271		69	306		
79	331		56	263		141	378		
81	333		179	386		96	333		
71	323		51	258		72	309		
82	334		96	303		63	300		
91	343		61	268		121	358		
90	342		76	283		89	326		
86	338		160	367		73	310		
72	324		76	283		99	336		
nicht rekonstruierbar			nicht rekonstruierbar			106			343
96	348		104	311		155	392		
77	329		125	332		92	329		
74	326		262	469		88	325		
89	341		170	377		91	328		
127	379		50	257		88	325		
92	344		Fraktur			85	322		
80	332		142	349		101	338		
87	339		135	342		nicht rekonstruierbar			
124	376		224	431		127	364		
n	19		n	18		n	19		
Minimum	71		Minimum	50		Minimum	63		
Maximum	127		Maximum	262		Maximum	155		
Mittelwert	87	339	Mittelwert	122	329	Mittelwert	97	334	

Abb. 82: Zeitaufwand für die Aufbereitung der gesägten Kanäle mit den 3 Systemen S5, Mtwo und ProTaper Universal;  
AZ = Summe der Aufbereitungszeit, SZ= Summe der durchschnittlichen Spülzeit

### 5.5 Arbeitssicherheit

Die vorliegende Studie umfasste 120 Wurzelkanäle. Die Anzahl der präparierten Wurzelkanäle lag jedoch bei 117, da es in drei Fällen nicht möglich war, die einzelnen Segmente nach dem Sägevorgang so im Küvettensystem zu repositionieren, dass eine Präparation des mesiolingualen Wurzelkanals möglich war. Insgesamt konnte bei 111 Wurzelkanälen eine komplikationslose Bearbeitung dokumentiert werden. 37 Wurzelkanäle gehörten in die S5-Gruppe, 38 Wurzelkanäle in die Mtwo-Gruppe und 36 Wurzelkanäle in die ProTaper Universal-Gruppe. Eine Instrumentenfraktur trat einmal auf. Das Instrument 10/.04 frakturierte in der Mtwo-Gruppe bei der Präparation eines mesiolingualen Wurzelkanals. Der präoperative Krümmungswinkel des Zahnes lag in diesem Fall bei 20,7°. Bei zwei Präparationen entstand eine Stufe, zusätzlich kam es bei zwei Wurzelkanälen zu einem Verlust der Arbeitslänge sowie einer apikalen Blockade. Die Ergebnisse der Auswertung der Arbeitssicherheit sind in Abb. 83 (S. 71) zusammengefasst.

Für die statistische Auswertung wurde der Kruskal-Wallis-Tests verwendet. Sowohl für den mesiobukkalen als auch für den mesiolingualen Wurzelkanal ließ sich kein signifikanter Unterschied nachweisen (bukkal  $p = 0,1308$ , lingual  $p = 0,2988$ ), (Abb. 84 u. 85).

	Fraktur	Apikale Blockade	Perforation	Längenverlust	Stufe	Summe
<b>S5</b>	-	-	-	-	2	2
<b>Mtwo</b>	1	-	-	-	-	1
<b>PTU</b>	-	1	-	2	-	3

Abb. 83: Zwischenfälle während der Wurzelkanalaufbereitung

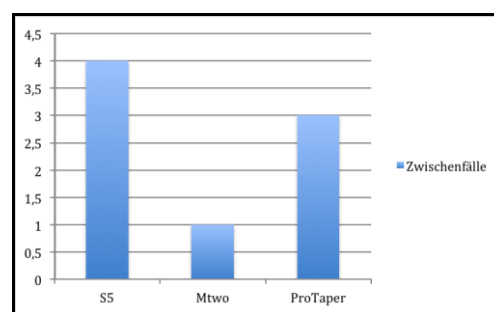


Abb. 84: Summe der Zwischenfälle für jede Versuchsgruppe

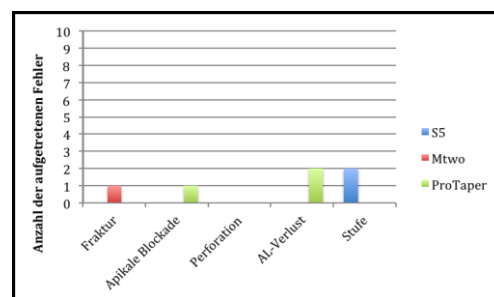


Abb. 85: Verteilung der Zwischenfälle auf die 3 Versuchsgruppen

## 6. Diskussion

### 6.1 Diskussion der Methode

Die Intention der vorliegenden Studie war es, drei maschinelle Präparationssysteme hinsichtlich verschiedener Parameter miteinander zu vergleichen, um eine Aussage über die klinische Tauglichkeit der Systeme treffen zu können. Um eine Untersuchung unter standardisierten Bedingungen durchführen zu können, entwickelten *Bramante et al. (1987)* ein Versuchsmodell, welches in den folgenden Jahren von *Calhoun & Montgomery (1988)*, *Campos & Del Rio (1990)*, *McCann et al. (1990)* und *Hülsmann (1998)* modifiziert wurde. Daher ist es nun möglich, mehrere Parameter parallel in einem durch die Modifikationen vereinfachten Studienmodell zu untersuchen. Wesentlich für die standardisierte Untersuchung ist das verwendete Küvettensystem (*Bramante et al. 1987*), welches zu jedem Zeitpunkt der Studie eine Repositionierung der Zähne sowie der gesägten Segmente erlaubt. In Kombination mit der von *Walker (1986)* und *Sydney et al. (1991)* entwickelten Röntgenvorrichtung können zu jedem beliebigen Zeitpunkt Röntgenaufnahmen in standardisierter und reproduzierbarer Projektion angefertigt werden, welche eine Beurteilung des Wurzelkanalverlaufs sowie von dessen Veränderung ermöglichen.

#### 6.1.1 Auswahl der Präparate

Der Vergleich der Präparationssysteme wurde in dieser Studie mithilfe von 60 extrahierten Unterkiefer-Molaren durchgeführt. Zahlreiche andere Untersuchungen verwendeten ebenfalls extrahierte natürliche Zähne (*Plotino et al. 2007*, *Sonntag et al. 2007*). Eine Alternative dazu stellt der Einsatz simulierter Wurzelkanäle in Kunststoffblöckchen dar, wie er in vielen Studien beschrieben wird (*Briseno et al. 1989*, *Tharuni et al. 1996*, *Coleman & Svec 1997*, *Perez et al. 2005*, *Schäfer et al. 2006 a*, *Giovannone et al. 2008*, *Akçay et al. 2011*, *Sadeghi 2011*). Nach *Ebeleseder et al. (1995)* sollten die Kunststoffblöckchen bevorzugt werden, da die künstlichen Wurzelkanäle normiert und somit vergleichbar sind. Bei der Verwendung natürlicher Zähne kann aufgrund der enormen anatomischen Variationsbreite eine standardisierte Untersuchung nur begrenzt realisiert werden.



Ein weiterer Vorteil der simulierten Wurzelkanäle besteht darin, dass die Blöckchen aus durchsichtigem Kunststoff gefertigt werden, sodass die Instrumente im Wurzelkanal sichtbar sind (*Campos & Del Rio 1990*). Die Autoren weisen jedoch zusätzlich darauf hin, dass das Material nicht mit dem Dentin eines natürlichen Zahnes zu vergleichen ist und die vielen Unwägbarkeiten hinsichtlich der Anatomie eines Zahnes nicht gegeben sind. Nachteilig ist außerdem, dass sich die Härte sowie das Abriebverhalten nicht vergleichen lassen (*Kazemi et al. 1996*). *Miserendino et al. (1988)* und *Schäfer et al. (2006 a)* weisen darauf hin, dass eine Untersuchung an vorgefertigten Kunststoffblöckchen keine Rückschlüsse auf das Arbeitsverhalten an natürlichen Zähnen zulässt, sodass aus Sicht der Autoren eine Studie an natürlichen Zähnen zu präferieren ist.

#### 6.1.2 Wurzelkanalbegradigung und Veränderung des Krümmungsradius

Für den Vergleich der Präparationssysteme wurden Unterkiefer-Molaren mit einer Wurzelkanalkrümmung zwischen 20° und 40° verwendet. Die Auswahl der Zähne wird durch andere Studien gestützt, die ebenfalls an unteren Molaren durchgeführt wurden (*Hülsmann et al. 2003, Paqué et al. 2005, Rödiger et al. 2007, Plotino et al. 2007, Sonntag et al. 2007, Gu et al. 2010, Nordmeyer et al. 2011*). Die Untersuchung von *Cunningham & Senia (1992)* ergibt, dass alle UK-Molaren eine Wurzelkanalkrümmung aufweisen. Gleichzeitig wird betont, dass es sich bei der Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung mithilfe von Röntgenbildern um ein zweidimensionales Verfahren handelt, welches ein dreidimensionales System beschreibt.

Die erste Veröffentlichung zur Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung stammt von *Schneider* aus dem Jahr 1971. Der Autor beschreibt eine Methode, welche in der Vergangenheit in zahlreichen Studien angewandt wurde und bis heute noch Anerkennung findet (*Gressmann 2001, Kahlmeier 2002, Musch 2002, Schnell 2007*). Im Laufe der Jahre wurde die Methode nach *Schneider* mehrfach modifiziert. Während anfangs nur der Winkel der Wurzelkanalkrümmung von Bedeutung war, wiesen verschiedene Autoren auf die Wichtigkeit des Krümmungsradius und der Länge der Krümmung hin und entwickelten modifizierte Methoden zur Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung (*Lim & Webber 1985, Alodeh & Dummer 1989, Dummer et al. 1989, Hülsmann & Stryga*

1993, Pruett et al. 1997). Schäfer et al. (2002) publizierten eine weitere Modifikation, welche sowohl den Winkel der Krümmung als auch den Radius und die Länge berücksichtigt.

Bislang existiert noch immer keine allgemein akzeptierte Methode, sodass es verschiedene Möglichkeiten gibt, die Wurzelkanalkrümmung zu bestimmen (Schäfer 2010). Basierend auf der modifizierten Methode nach Schäfer et al. (2002) und den Aussagen von Schneider (1971) entwickelten Zhang & Hu (2010) ein neues Modell, um die Wurzelkanalkrümmung zu bestimmen. Diese Methode berücksichtigt sowohl den Winkel als auch den Radius sowie die Länge der Wurzelkanalkrümmung und wurde in der vorliegenden Studie verwendet.

### 6.1.3 Auswertung der Wurzelkanalquerschnitte

Zu Beginn der Studie wurden die Zähne mithilfe des modifizierten Küvettensystems (Hülsmann 1998) in Kunststoff eingebettet. Auf diese Weise konnte für die Beurteilung der Veränderung der Wurzelkanalkrümmung eine exakte Repositionierung der Zähne zur Anfertigung der prä- und postoperativen Röntgenaufnahmen gewährleistet werden. Zusätzlich konnten die Zähne vor der Präparation des mesiolingualen Wurzelkanals in drei Segmente gesägt werden. Die Bewertung der Querschnittsveränderung anhand der Querschnittsfotografien wurde von Briseno et al. (1989) entwickelt. In vielen Studien wurde das Modell verwendet, wobei früher die Überlagerung der Fotos mithilfe von Diapositiven und einer Durchzeichenfolie durchgeführt wurde (Gressmann 2001, Herbst 2002, Musch 2002, Schnell 2007). Durch das Sägen der Segmente ist es möglich, den Wurzelkanal in einer zweiten Ebene zu betrachten, da die Röntgenaufnahmen lediglich Erkenntnisse über die Längsachse des Wurzelkanals bieten. Mithilfe der Betrachtung in der zweiten Ebene ist es möglich, die Wurzelkanalquerschnittsform und die bearbeiteten Wurzelkanalwandareale zu beurteilen.

### 6.1.4 Rasterelektronenmikroskopische Auswertung

Die Reinigungswirkung der Präparationssysteme kann anhand der Beurteilung der Wurzelkanaloberfläche untersucht werden. Dazu dienen die Parameter Smear-Layer und Debris. Bei der Herstellung der Probenkörper für die rasterelektronenmikroskopische Auswertung wird die direkte von der indirekten

Methode unterschieden. Bei der indirekten Methode werden die Proben hergestellt, indem der Wurzelkanal mit einem erhärtenden Material gefüllt wird (*Gutierrez & Garcia 1968, Davis et al. 1972, O`Connell & Brayton 1975*). Auf diese Weise ist eine dreidimensionale Betrachtung möglich; nachteilig ist jedoch, dass die Feinstruktur der Oberfläche nicht analysiert werden kann (*Hülsmann 1987*). Durch das Brechen, Aufsägen oder Aufschleifen werden die Proben für die direkte Methode gewonnen, bei der die Wurzelkanalwand direkt betrachtet und bewertet werden kann (*Fromme et al. 1970, Hülsmann 1987, Bahr 1997, Gambal 1997, Schade 1999, Versümer 1999*).

In der vorliegenden Studie wurde diese Methode angewandt. Die Segmente wurden vorsichtig von zwei Seiten eingekerbt, ohne die Oberfläche der Wurzelkanalwand zu touchieren. Anschließend konnte der bukkale Anteil des Segments vorsichtig herausgebrochen werden. Während die Bewertung der Oberfläche früher ausschließlich deskriptiv vorgenommen wurde, sodass eine Vergleichbarkeit zu anderen Studien äußerst schwierig war, werden heute Referenzfotografien herangezogen. Die Verwendung dieser Bilder wird in der Literatur mehrfach empfohlen (*Hülsmann et al. 1988, Hülsmann & Bertzbach 1989*). Daher wurde für diese Untersuchung – wie in vielen Studien zuvor - eine separate Bewertung für die beiden Parameter Smear Layer und Debris anhand von Referenzfotografien vorgenommen (*Bahr 1997, Hülsmann 1998, Gressmann 2001, Kahlmeier 2002, Musch 2002*)

In Anlehnung an andere Studien wurde die Smear-Layer-Bewertung bei 1000-facher Vergrößerung, die Bewertung des Debris bei 200-facher Vergrößerung durchgeführt (*Beer & Gängler 1989, Baumgartner et al. 1992, Briseno & Kremers 1992*). Die Auswertung wurde von zwei unabhängigen Untersuchern vorgenommen, welche sich zuvor anhand anderer REM-Bilder kalibriert hatten. Es wurde ein Scoringsystem mit fünf Stufen angewandt, welches in vorangegangenen Studien ebenfalls Anwendung fand (*Gambal 1997, Versümer 1999, Schade 1999, Herbst 2002, Schnell 2007*).

#### 6.1.5 Zeitaufwand

Die Zeit, die für eine Wurzelkanalpräparation benötigt wird, stellt ein wichtiges Kriterium im klinischen Alltag dar. Sie setzt sich aus der Präparationszeit, der Spülzeit, der Zeit für das Wechseln der Instrumente und der Zeit zum Vorbiegen

der Feilen zusammen (*Weine et al. 1976, Glosson et al. 1995, Luiten et al. 1995*). Da in der vorliegenden Studie Feilen aus Nickel-Titan verwendet wurden, war kein Vorbiegen der Instrumente notwendig. Der Zeitaufwand ergab sich aus der Präparationszeit und der Spülzeit. Die Präparationszeit wurde als die Verweildauer der Feilen eines Systems im Wurzelkanal definiert, wobei für die Spülung ein Mittelwert aus repräsentativen Vorversuchen ermittelt wurde, der zur Präparationszeit addiert wurde.

Bei der Betrachtung der Auswertung muss bedacht werden, dass die Anzahl der Instrumente in den drei Systemen nicht übereinstimmte. Während bei den Systemen S5 (7 Instrumentenwechsel) und ProTaper Universal (6 Instrumentenwechsel) die Sequenz vorgegeben wurde, wurde für das System Mtwo die Basissequenz sowie ein zusätzliches Instrument (4 Instrumentenwechsel) verwendet, sodass in allen drei Versuchsgruppen bis zur Instrumentengröße 30 präpariert wurde.

## 6.2 Diskussion der Ergebnisse

### 6.2.1 Wurzelkanalbegradigung

Eines der wichtigsten Ziele der Wurzelkanalpräparation ist die Wahrung der ursprünglichen Wurzelkanalanatomie. Eine ausreichende Reinigung und Desinfektion ist nur zu gewährleisten, wenn der Substanzabtrag gleichmäßig und an allen Wandbereichen geschieht. Speziell bei gekrümmten Wurzelkanälen stellt das Beibehalten des Krümmungswinkels und des Krümmungsradius eine besondere Herausforderung dar. Durch die Entwicklung der Nickel-Titan-Systeme wurde die Präparation dieser gekrümmten Wurzelkanäle deutlich erleichtert. Dies ist nach Meinung von *Coleman et al. (1996)* auf die besonderen Materialeigenschaften wie die hohe Elastizität und den Memory-Shape-Effekt zurückzuführen. Diese Meinung wird in der Literatur vielfach bestätigt (*Himel et al. 1994, Esposito & Cunningham 1995, Gambill et al. 1996, Coleman & Svec 1997, Sadeghi 2011*), es finden sich aber auch einige Untersuchungen, die die Überlegenheit der Nickel-Titan-Instrumente nicht unterstreichen (*Harlan et al. 1996, Samyn et al. 1996, Elliot et al. 1998*). Vorangegangene Studien, welche die gleiche Methodik verwendeten, kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Verwendung der Nickel-Titan-Systeme zur Präparation gekrümmter Wurzel-

kanäle vorteilig ist (*Schade 1999, Versüner 1999, Gressmann 2001, Herbst 2002, Kahlmeier 2002, Musch 2002, Schnell 2007*).

In der vorliegenden Studie wird die Veränderung des Krümmungswinkels und des Krümmungsradius nach der Präparation mit den maschinellen Nickel-Titan-Systemen S5, *Mtwo* und ProTaper Universal verglichen. Die Ergebnisse zeigen keine eindeutige Überlegenheit eines Systems. In allen Versuchsgruppen konnte in der Mehrheit der Fälle die Wurzelkanalbegradigung minimal ( $< 1^\circ$ ) gehalten werden. Das System *Mtwo* respektierte die ursprüngliche Wurzelkanalanatomie mit einer durchschnittlichen Begradigung von  $0,8^\circ$  am besten. Der Wert für S5 liegt bei  $1,05^\circ$  und für ProTaper Universal bei  $1,35^\circ$ . Diese positiven Resultate werden in der Literatur bestätigt (*Schäfer und Lohmann 2002 a und b, Kuzekanani et al. 2009, Yang et al. 2011*). Letztere verglichen zwei der in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls verwendeten Systeme miteinander. Hinsichtlich der Wurzelkanalbegradigung schnitten die Systeme *Mtwo* und ProTaper Universal sogar etwas besser ab.

Insgesamt haben sich alle drei Nickel-Titan-Systeme in Bezug auf den Erhalt der Wurzelkanalkrümmung bewährt und können für den Einsatz bei der Präparation gekrümmter Wurzelkanäle empfohlen werden.

### 6.2.2 Querschnittsveränderungen

Lange Zeit spielte die Querschnittsform eines präparierten Wurzelkanals eine entscheidende Rolle für die Qualität der Wurzelkanalfüllung. So konnten bei unregelmäßigen Querschnittsformen nicht immer vollkommen dichte und homogene Wurzelkanalfüllungen erzielt werden. Die Bewertung des Wurzelkanalquerschnitts hat im Laufe der Zeit an Bedeutung verloren, da es mithilfe neuerer Fülltechniken, wie zum Beispiel der lateralen und vertikalen Kondensation, ebenso möglich ist, unregelmäßig geformte Wurzelkanäle suffizient zu füllen (*Hülsmann & Bertzbach 1989*).

Anhand der Einteilung von *Loushine et al. (1989)* wurden die 180 Präparate den drei verschiedenen Kategorien rund, oval und unregelmäßig zugeordnet. Allgemein wird eine runde Querschnittsform angestrebt, jedoch wurde in der vorliegenden Untersuchung in Anlehnung an vorangegangene Studien auch die ovale Querschnittsform als akzeptabel bewertet. Der Wurzelkanalquerschnitt spielt allerdings nicht nur im Hinblick auf die anschließende Obturation eine

Rolle. Von zentraler Bedeutung ist, dass die Elimination von Bakterien sowie erweichten Wurzelkanalwanddentins nur erreicht werden kann, wenn die Präparation einen zirkulären Dentinabtrag gewährleistet und möglichst alle Bereiche der Wurzelkanalwand bearbeitet werden (*Lim & Webber 1985, Lim et al. 1987*).

Für das S5-System konnten in der vorliegenden Studie 14 koronale, 14 mediale und 11 apikale Segmente in Hinsicht auf die Querschnittsform als akzeptabel eingestuft werden. Für das System *Mtwo* wurden im koronalen Bereich 14, im medialen Bereich 12 und im apikalen Bereich 16 akzeptable Proben gezählt. In der Versuchsgruppe ProTaper Universal gab es koronal 15, medial 14 und apikale 16 Wurzelkanalsegmente mit einer akzeptablen Querschnittsform. Auffällig ist, dass es in zwei Versuchsgruppen im apikalen Bereich die meisten akzeptablen Querschnittsformen gibt. Diese Verteilung wird ebenfalls von *Gressmann (2001)* beschrieben. Die Resultate stehen in Kontrast zu anderen Untersuchungen, die mit identischer Methodik durchgeführt wurden (*Kahlmeier 2002, Schnell 2007*). Unterschiede zwischen der manuellen und maschinellen Wurzelkanalpräparation in Bezug auf die Querschnittsform untersuchte *Hülsmann (1998)*. Er kommt zu dem Ergebnis, dass die maschinellen Nickel-Titan-Systeme den manuellen Instrumenten überlegen sind. Die Überlegenheit könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich die Arbeitsweisen der beiden Methoden deutlich unterscheiden. Bei der maschinellen Präparation werden die Feilen passiv in den Wurzelkanal eingebracht, während die Arbeitsweise durch die Umdrehungszahl und das Drehmoment des Antriebsmotors reguliert wird. Die Bewegungen beschränken sich auf Ein- und Auswärtsbewegungen, sodass der Wurzelkanal durch die Geometrie der Feilen geformt wird. Bei der manuellen Präparation mit Hedströmfeilen feilt der Behandler den Wurzelkanal aktiv („circumferential filing“). Dabei spielen die Kraft sowie die Dauer der Präparation eine entscheidende Rolle und der Behandler hat einen im Vergleich zur maschinellen Arbeitsweise großen Anteil an der Formgebung.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass mit allen drei Nickel-Titan-Systemen überwiegend als akzeptabel einzustufende Querschnittsformen erzielt werden konnten und es keinen signifikanten Unterschied gibt. Alle drei Systeme eignen sich in dieser Hinsicht für die klinische Praxis.

### 6.2.3 Materialabtrag

Der Materialabtrag spielt nicht nur für die entstehende Querschnittsform und damit für die Wurzelkanalfüllung eine Rolle. Entscheidend ist, dass es einen zirkulären Substanzabtrag gibt, sodass alle Bereiche der Wurzelkanalwand ausreichend präpariert, gereinigt und desinfiziert werden können. Im Idealfall umgibt der präparierte Wurzelkanal den ursprünglichen Wurzelkanal vollständig. Dabei ist die nicht-schneidende Instrumentenspitze, über die die untersuchten Präparationssysteme verfügen, von Vorteil. Sie zentriert das Instrument im Wurzelkanal und verhindert eine Veränderung der Verlaufsform weitgehend.

Wenn der Wurzelkanal allseits präpariert wurde, besteht kein Wandkontakt zwischen dem präparierten Wurzelkanal und der unbehandelten Wurzelkanal (0 %). Dies wurde bei 28 Präparaten der S5-Gruppe, bei 23 Präparaten der *Mtwo*-Gruppe und bei 27 Präparaten der ProTaper-Gruppe erreicht. Damit schnitt das *Mtwo*-System etwas schlechter ab, jedoch war der Unterschied nicht signifikant. Die vollständige Bearbeitung konnte mit keinem der untersuchten Systeme bei der Mehrheit der Proben festgestellt werden. In einer Studie von *Yang et al. (2011)* wurden die Systeme *Mtwo* und ProTaper Universal hinsichtlich der Wurzelkanalgeometrie mithilfe einer mikro-computertomographischen Auswertung verglichen. Die Autoren beschreiben ebenfalls, dass es nach der Präparation ungefähr 39 % bis 42 % Wandanteile gibt, welche nicht bearbeitet wurden. Da nicht nur ein Wandkontakt von 0 %, sondern auch ein Wandkontakt von weniger als 25 % als akzeptabel eingestuft wurde, können alle drei Systeme empfohlen werden. Mit dem S5-System wurde zu 81 %, mit dem *Mtwo*-System zu 76 % und mit dem System ProTaper zu 72 % ein akzeptables Ergebnis erreicht.

### 6.2.4 Sauberkeit der Wurzelkanalwände

Die rasterelektronenmikroskopische Auswertung zeigt für die drei untersuchten Systeme eine deutliche Überlegenheit der als akzeptabel einzustufenden Resultate (S5: Smear Layer 85 %, Debris 57 %; *Mtwo*: Smear Layer 73 %, Debris 47 %; ProTaper: Smear Layer 78 %, Debris 60 %). Eine zufriedenstellende Sauberkeit wurde in der vorliegenden Untersuchung durch eine saubere glatte Wurzelkanalwand bis hin zu wenigen kleinen Debrisinseln

bewertet. Es sollte keine oder maximal eine dünne, homogene Schmierschicht mit einigen offenen Dentintubuli vorhanden sein.

In einer Studie von *Williamson et al. (2009)* wird ProTaper Universal mit zwei anderen Nickel-Titan-Systemen verglichen. Für die Debris-Bewertung wurde ebenfalls die Score-Verteilung genutzt. Mit einem durchschnittlichen Score von 3,4 schneidet ProTaper Universal in der beschriebenen Studie schlechter ab als im Rahmen der vorliegenden Untersuchung (durchschnittlicher Score 2,05). Die Reinigungswirkung der *Mtwo*-Feilen wurde von *Bürklein et al. (2011)* untersucht. Dabei wurden ebenfalls Score-Bewertungen für verbliebenen Debris und Smear-Layer vorgenommen. Im Vergleich zu den beiden anderen untersuchten Systemen konnte mit dem *Mtwo*-System eine bessere Reinigung der Wurzelkanalwände erzielt werden. Die Durchschnittswerte lagen für Debris bei 2,23 und für den Smear-Layer bei 2,95. In der vorliegenden Untersuchung ist das Ergebnis für verbliebenen Debris etwas schlechter (2,36). Der durchschnittliche Smear-Layer-Score liegt mit 1,86 höher, sodass hier eine bessere Entfernung erreicht werden konnte.

Für das dritte untersuchte Nickel-Titan-Systeme S5 liegen bisher noch keine Studien zur Bewertung der Sauberkeit vor. Da das System in der vorliegenden Untersuchung allerdings mit vergleichbar guten Ergebnissen abschneidet wie *Mtwo* und ProTaper Universal, können alle drei Systeme hinsichtlich der Reinigungswirkung für den klinischen Alltag angewendet werden.

#### 6.2.5 Zeitaufwand

Der Zeitaufwand für eine endodontische Behandlung ist im klinischen Alltag ein wichtiges Kriterium. Im Rahmen dieser Studie wurde für jedes Präparations-system eine mittlere Präparationszeit errechnet. Zusätzlich wurde eine durchschnittliche Spülzeit festgelegt, die in Kombination mit der Präparationszeit den Zeitaufwand für eine Wurzelkanalbehandlung widerspiegelt. Gemäß eines allgemein anerkannten Spülprotokolls soll neben der Abschlusspülung nach jedem verwendeten Instrument eine Zwischenspülung erfolgen. An dieser Stelle muss beachtet werden, dass Systeme, die aus mehreren Feilen bestehen, durch die dadurch entstehenden häufigeren Zwischenspülungen eine höhere durchschnittliche Spülzeit und damit verbunden einen etwas höheren Zeitaufwand vorweisen. Der Vergleich des Zeitaufwands spielte in der



vorliegenden Untersuchung im Gegensatz zu den anderen Parametern eine untergeordnete Rolle, jedoch muss hervorgehoben werden, dass genau dieser Parameter für die klinische Verwendung das entscheidende Kriterium darstellen kann.

Der Zeitaufwand für die Präparation des mesiolingualen Wurzelkanals war bei den drei Systemen sehr ähnlich (S5 339 sec., *Mtwo* 329 sec., ProTaper Universal 334 sec.). Für den mesiobukkalen Wurzelkanal weichen die Ergebnisse voneinander ab (S5 329 sec., *Mtwo* 293 sec., ProTaper Universal 369 sec.), sodass sich für diesen Wurzelkanal ein signifikanter Unterschied ergibt und das System *Mtwo* als das Beste der untersuchten Nickel-Titan-Systeme zu bewerten ist. Es bleibt jedoch darauf hinzuweisen, dass dieses System gleichzeitig die wenigsten Feilen in der verwendeten Sequenz aufweist. Bei Vergleichen des Zeitaufwandes für die Präparation mit den Systemen EasyShape, ProTaper und FlexMaster schnitt *Mtwo* ebenfalls signifikant besser ab (*Vahid et al. 2009, Bürklein et al. 2011*). *Vahid et al.* sehen das bessere Ergebnis in dem s-förmigen Instrumentenquerschnitt, den aggressiven Schneidekanten und dem positiven Spanwinkel begründet. Der Zeitaufwand für das ProTaper Universal-System liegt in der vorliegenden Studie bei 334 sec. beziehungsweise 369 sec. Im Vergleich zu einer anderen Untersuchung, in der die durchschnittliche Zeit bei 515 sec.  $\pm$  82 sec. liegt, konnte die Präparation folglich mit einem verminderten Zeitaufwand erfolgen (*Celik Ünal et al. 2009*).

Abschließend ist festzuhalten, dass das gute Ergebnis für die Versuchsgruppe *Mtwo* bereits in der Literatur fundiert ist. Der Zeitaufwand für ProTaper Universal sowie S5 ist ebenfalls als klinisch akzeptabel einzustufen, wobei weitere Untersuchungen zum S5-System noch fehlen, sodass dieses Ergebnis nicht als fundiert betrachtet werden kann.

#### 6.2.6 Arbeitssicherheit

Wie die zuvor diskutierten Parameter stellt auch die Arbeitssicherheit ein wichtiges Kriterium für die klinische Tauglichkeit dar. So ist der Zahnarzt darauf angewiesen, dass Zwischenfälle während der Wurzelkanalpräparation eine absolute Ausnahme bleiben. Für die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung präparierten Molaren wurde für jeden Wurzelkanal die Arbeitssicherheit dokumentiert. Als Zwischenfälle oder Misserfolge wurden beispielsweise eine

Instrumentenfraktur, eine apikale Blockade oder das Auftreten einer Stufe betrachtet. Von 117 Wurzelkanälen verlief die Präparation bei 111 komplikationslos (95%).

Viele Komplikationen können durch präventive Maßnahmen vermieden werden, so ist die gründliche und häufige Wurzelkanalspülung wichtig, um eine apikale Blockade zu vermeiden, die entsteht, wenn Dentinspäne nicht aus dem Wurzelkanal gespült, sondern nach apikal geschoben werden. Um die Gefahr einer Instrumentenfraktur zu vermeiden, sollte der Zahnarzt die Feilen nicht zu häufig verwenden und sich an die Vorgabe des Herstellers halten (*Putnam et al. 1998*). Im Gegensatz zu den Edelmetallinstrumenten, bei denen eine Verformung irreversibel und sofort sichtbar ist, verfügen die NiTi-Feilen über den „Memory-Shape-Effect“, es handelt sich um eine reversible Verformung. Die Beanspruchung des Materials und somit die Bruchgefahr ist für den Zahnarzt nicht zu erkennen.

Neuerdings existiert eine Nickel-Titan-Feile, welche vorgebogen werden kann und über eine plastische Verformung verfügt (Hyflex, Coltene/Whaledent AG, Altstätten, Schweiz). *Peters et al. (2012)* untersuchten die physikalischen Eigenschaften dieses Instruments. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass das Biegevermögen, die Flexibilität sowie das Torsionsverhalten ähnlich sind wie bei den herkömmlichen Nickel-Titan-Instrumenten. Jedoch war eine bessere Resistenz gegen eine Ermüdung nachzuweisen. Zusätzlich ist das Drehmoment während der Präparation reduziert. Es liegen jedoch noch nicht ausreichend viele Studien vor, um eine begründete Einschätzung über das Hyflex-System treffen zu können.

Während der Wurzelkanalpräparation im Rahmen der vorliegenden Studie frakturierte ein *Mtwo*-Instrument. Im Allgemeinen gelten die Nickel-Titan-Instrumente bedingt durch größere Konizitäten und Instrumentendurchmesser als frakturanfälliger. Diese Vermutung wird von *Markovic (2005)* unterstrichen. Bei dem frakturierten *Mtwo*-Instrument handelt es sich um eine Feile 10/.04, sodass die zuvor beschriebene Theorie in der vorliegenden Untersuchung aufgrund des geringen Instrumentendurchmessers nur zum Teil bestätigt werden kann. Zusätzlich trat die Fraktur bei der Präparation eines mesiolingualen Wurzelkanals auf, welcher wie zuvor beschrieben präoperativ in drei Segmente gesägt wurde. Aufgrund der niedrigen Komplikationsrate und weil kein

nachweisbarer signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsgruppen vorhanden ist, kann die Arbeitssicherheit der drei untersuchten Nickel-Titan-Systeme als gut bewertet werden, sodass sich alle für den klinischen Alltag empfehlen.

#### 6.2.7 Abschließende Bewertung

Der direkte Vergleich der drei maschinellen Nickel-Titan-Systeme S5, *Mtwo* und ProTaper Universal zeigt lediglich für den Parameter „Zeitaufwand“ für einen der beiden untersuchten Wurzelkanäle einen signifikanten Unterschied. Das System *Mtwo* ist hier den anderen beiden Systemen leicht überlegen. Der Vergleich der Parameter „Wurzelkanalbegradigung“, „Krümmungsradius“, „Materialabtrag“, „Wurzelkanalquerschnitt“, „Sauberkeit“ und „Arbeitssicherheit“ zeigt, dass die Systeme als gleichwertig einzustufen sind.

## 7. Zusammenfassung

Die Entwicklung von endodontischem Instrumentarium aus Nickel-Titan stellt einen wichtigen Fortschritt in der Endodontie dar. Inzwischen gibt es eine Vielzahl von Systemen, welche sich hinsichtlich des Instrumentendesigns unterscheiden. Die vorliegende Studie umfasste 60 UK-Molaren, mit einer Wurzelkanalkrümmung zwischen 20° und 40°. Die drei maschinellen Nickel-Titan-Systeme S5, *Mtwo* und ProTaper Universal wurden mithilfe des von *Hülsmann et al. (1998)* modifizierten standardisierten Versuchsaufbaus miteinander verglichen, sodass eine gleichzeitige Untersuchung folgender Parameter möglich war:

- Veränderung der Wurzelkanalkrümmung
  - Veränderung des Radius der Wurzelkanalkrümmung
  - Qualitative Querschnittsveränderung
  - Quantitative Querschnittsveränderung
  - Reinigungswirkung
  - Arbeitszeit
  - Arbeitssicherheit.
- 
- In Bezug auf eine Begradigung des Wurzelkanals lagen keine signifikanten Unterschiede vor. Mit allen Systemen gelang eine zufrieden stellende Formgebung ohne erkennbare stärkere Begradigungen der präparierten Wurzelkanäle. Die Begradigungen betragen im Mittel 1,1°, die Zunahme des Radius lag bei der Mehrheit der Wurzelkanäle bei weniger als 1 mm. Somit sind alle drei Systeme in der Lage, die ursprüngliche Wurzelkanalanatomie annähernd zu wahren.
  - Sowohl bei der qualitativen als auch bei der quantitativen Beurteilung des Wurzelkanalquerschnitts ergaben sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. Der Anteil der als akzeptabel eingestuftten Präparate überwiegt in allen Versuchsgruppen. Die guten Ergebnisse unterstreichen die Ergebnisse vieler anderer Studien, in denen eine Überlegenheit der Nickel-Titan-Systeme gegenüber der manuellen Wurzelkanalpräparation beschrieben wird.

- In Bezug auf die Reinigungswirkung wurden die Parameter Debris und Smear-Layer bewertet. Hinsichtlich des Smear-Layer konnte eine große Mehrheit aller Proben als akzeptabel bewertet werden. Die Ergebnisse in Bezug auf verbleibenden Debris fallen nicht so eindeutig aus. Die Mehrheit der Proben in den Versuchsgruppen S5 und ProTaper Universal konnte als akzeptabel eingestuft werden, wohingegen in der *Mtwo*-Gruppe 53% der Proben keine ausreichend gereinigte Wurzelkanalwand aufwiesen. Insgesamt lässt sich allerdings kein signifikanter Unterschied zwischen den Systemen nachweisen.
- Der einzige signifikante Unterschied konnte bei der Auswertung des Zeitaufwands gefunden werden. Hier erzielte *Mtwo* signifikant bessere Ergebnisse, sodass mit diesem System die Wurzelkanalpräparation in kürzerer Zeit durchzuführen ist.
- Insgesamt erfolgte bei 95% der Wurzelkanäle eine komplikationslose Präparation, sodass alle drei untersuchten Präparationssysteme als sicher einzustufen sind.

Bei der Wertung aller vorliegenden Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die drei Systeme für die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle geeignet sind. Die Reinigungswirkung ist sicherlich verbesserungsfähig, allerdings überwiegt hier auch der Anteil akzeptabler Ergebnisse. Die wenigen vereinzelt Zwischenfälle unterstreichen die Sicherheit der Systeme. Der Vergleich mit anderen maschinellen Präparationssystemen aus anderen Studien zeigt, dass es häufig nur geringfügige Unterschiede zwischen den Systemen gibt.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der untersuchten Präparationssysteme den Resultaten anderer Studien ähneln, sodass die Systeme den aktuellen Anforderungen entsprechen.

## 8. Literaturverzeichnis

**Aguiar CM, Mendes DdA, Câmara AC, de Figueiredo JAP (2009):**

Assessment of canal walls after biomechanical preparation of root canals instrumented with ProTaper Universal rotary system  
J Appl Oral Sci 17, 590-5

**Akçay I, Yigit-Özer S, Adigüzel Ö, Kaya S (2011):**

Deformation of the self-adjusting file on simulated curved root canals: a time-dependent study  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 112, 12-7

**Alodeh MHA, Dummer PMH (1989):**

A comparison of the ability of K-files and Hedström files to shape simulated root canals in resin blocks  
Int Endod J 22, 226-35

**American Association of Endodontists (AAE)**

Glossary – Contemporary terminology for endodontics  
5<sup>th</sup> ed., AAE, Chicago 1994

**Andreasen GF, Hillemann TB (1971):**

An evaluation of 55-cobalt substituted Nitinol wire for use in orthodontics  
J Am Dent Assoc 82, 1373-5

**Bahr R:**

Vergleichende Untersuchung über den Effekt der manuellen Wurzelkanalaufbereitung und der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung mit dem Endoplaner-Winkelstück  
Med. Diss. Göttingen 1997

**Barthel CR, Gruber S, Roulet JF (1999):**

Aufbereitung von Wurzelkanälen mit drei verschiedenen Aufbereitungssystemen in vitro  
Dtsch Zahnärztl Z 54, 474-8

**Baumgartner JC, Martin H, Sabala CL, Strittmatter EJ, Wildey WL, Quigley NC (1992):**

Histomorphometric comparison of canals prepared by four techniques  
J Endod 18, 530-4

**Beer R, Gängler P (1989):**

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Wurzelkanalaufbereitung mit Ultraschall

Dtsch Zahnärztl Z 44, 334-9

**Bramante CM, Berbert A, Borges RP (1987):**

A methodology for evaluation of root canal instrumentation

J Endod 13, 243-5

**Briseno BM, Kremers L (1992):**

Der Einfluss verschiedener Wurzelkanal-Aufbereitungsmethoden und -systeme auf die sogenannte Schmierschicht

Zahnärztl Welt 101, 78-84

**Briseno BM, Sonnabend E, Detzer F (1989):**

Der Einfluss unterschiedlicher Handinstrumente auf die Form des Wurzelkanals

Dtsch Zahnärztl Z 44, 446-8

**Bürklein S, Schäfer E (2012):**

Apically extruded debris with reciprocating single-file and full-sequence rotary instrumentation systems

J Endod 38, 850-2

**Bürklein S, Hiller C, Duda M, Schäfer E (2011):**

Shaping ability and cleaning effectiveness of Mtwo versus coated and uncoated EasyShape instruments in severely curved root canals of extracted teeth

Int Endod J 44, 447-57

**Bürklein S, Hinschitza K, Dammaschke T, Schäfer E (2012):**

Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo und ProTaper

Int Endod J 45, 449-61

**Calhoun G, Montgomery S (1988):**

The effects of four instrumentation techniques on root canal shape

J Endod 14, 273-7

**Câmara AS, de Castro Martins R, Viana ACD, de Toledo Leonardo R, Buono VTL, de Azevedo Bahia MG (2009):**

Flexibility and Torsional Strength of ProTaper and ProTaper Universal Rotary Instruments Assessed by Mechanical Tests

J Endod 35, 113-6

**Campos JM, Del Rio CE (1990):**

Comparison of mechanical and standard hand instrumentation techniques in curved root canals  
J Endod 16, 230-4

**Camps JJ, Pertot WJ (1995):**

Torsional and stiffness properties of nickel-titanium K files  
Int Endod J 28, 239-43

**Celik Ünal G, Maden M, Saygat A, Orhan EO (2009):**

Comparative investigation of 2 rotary nickel-titanium instruments: protaper universal versus protaper  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 107, 886-92

**Chourasia HR, Meshram G, Warhadpande M, Dakshindras D (2012):**

Root Canal Morphology of Mandibular First Permanent Molars in an Indian Population  
Int J Dent 7, 451-2

**Civjan S, Huget EF, DeSimon LB (1975):**

Potential Applications of Certain Nickel-Titanium (Nitinol) Alloys  
J Dent Res 54, 89-96

**Clem WH (1969):**

Endodontics in the adolescent patient  
Dent Clin North Am 13, 483-6

**Coleman CL, Svec TA (1997):**

Analysis of Ni-Ti versus stainless steel instrumentation in resin simulated canals  
J Endod 23, 232-5

**Coleman CL, Svec TA, Rieger MR, Suchina JA, Wang M, Glickman GN (1996):**

Analysis of Nickel-Titanium Versus Stainless Steel Instrumentation by Means of Direct Digital Imaging  
J Endod 22, 603 -7

**Cunningham CJ, Senia ES (1992):**

A Three-Dimensional Study of Canal Curvatures in the Mesial Roots of Mandibular Molars  
J Endod 18, 294-300

**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, 642-8



**De-Deus G, Garcia-Filho P (2009):**

Influence of the NiTi rotary system on the debridement quality of the root canal space

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 108, e71-6

**Drebenstedt S:**

Desinfektion des Wurzelkanalsystems

In: Rödiger T, Hülsmann M, Nordmeyer S, Drebenstedt S

Grundlagen der modernen Endodontie

Spitta Verlag, Balingen **2009**

Seite 175 – 193

**Dummer PMH, Alodeh MHA, Doller R (1989):**

Shaping of simulated root canals in resin blocks using files activated by a sonic handpiece

Int Endod J 22, 211-25

**Ebeleseder KA, Glockner K, Städtler P:**

Eine Klassifikation von Untersuchungen zur Wurzelkanalaufbereitung.

2. Endodontischer Weltkongress der I.F.E.U., Rom 1995

Zusammenfassung der Autorenreferate, o. Hrsg., o. Verl. o. Ort **1995**, 1-4

**El Ayouti A, Chu AL, Kimionis I, Klein C, Weiger R, Löst C (2008):**

Efficacy of rotary instruments with greater taper in preparing oval root canals

Int Endod J 41, 1088-92

**El Batouty KM, Elmallah WE (2011):**

Comparison of Canal Transportation and Changes in Canal Curvature of Two Nickel-Titanium Rotary Instruments

J Endod 37, 1290-2

**Elliot LM, Curtis RV, Pitt Ford TR (1998):**

Cutting pattern of nickel-titanium files using two preparation techniques

Endod Dent Traumatol 14, 10-5

**Esposito PT, Cunningham CJ (1995):**

A comparison of canal preparation with Nickel-Titanium and stainless steel instruments

J Endod 21, 173-6

**Europäische Gesellschaft für Endodontologie (2006):**

Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung

Endodontie 15, 387-401

**Fischer C (1907):**

Über die feinere Anatomie der Wurzelkanäle  
Dtsch Monatsschr Zahnheilkd 25, 544-52

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

SEM evaluation of canal wall dentine following use of Mtwo and ProTaper NiTi rotary instruments  
Int Endod J 37, 832-9

**Fromme HG, Guttzeit R, Riedel H (1970):**

Experimental studies on the question of mechanical and chemical root canal preparation and on the adhesiveness of root canal filling materials  
Dtsch Zahnärztl Z 25, 865-76

**Gambal A:**

Die maschinelle Aufbereitung des Wurzelkanals mit dem Excalibur-System. Eine In-vitro-Untersuchung mit Hilfe eines neuentwickelten Untersuchungsmodells.  
Med. Diss. Göttingen **1997**

**Gambill JM, Alder M, Del Rio CE (1996):**

Comparison of NiTi and stainless steel hand files using computed tomography  
Int Endod J 22, 369-75

**Geurtsen W (1990):**

Die Wurzelkanalaufbereitung  
Phillip J 7, 23-30

**Giovannone T, Migliau G, Bedini R, Ferrari M Galottini L (2008):**

Shaping outcomes using two Ni-Ti rotary instruments in simulated canals  
Minerva Stomatol 57, 143-54

**Glosson CR, Haller, RH, Dove RB, Del Rio CE (1995):**

A comparison of root canal preparations using Ni-Ti Hand, Ni-Ti engine-driven, and K-flex endodontics instruments  
J Endod 21, 146-51

**Gressmann G:**

Eine vergleichende In-vitro-Studie zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung mit den Nickel-Titan-Systemen HERO 642 und FlexMaster  
Med. Diss. Göttingen **2001**

**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, 1341-6

**Gutierrez JH, Garcia J (1968):**

Microscopic and macroscopic investigation on results of mechanical preparation of root canals.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 25, 108-16

**Harlan AL, Nicholls JI, Steiner JC (1996):**

A comparison of curved canal instrumentation using nickel-titanium or stainless steel files with the balanced-force technique  
J Endod 22, 410-3

**Hellwig E, Klimek J, Attin T:**

Einführung in die Zahnerhaltung  
5. überarbeitete und erweiterte Auflage  
Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln **2009**

**Herbst U:**

Eine vergleichende In-vitro-Studie zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung mit den Nickel-Titan-Systemen LightSpeed and Quantec SC  
Med. Diss. Göttingen **2002**

**Hermann HW (2005):**

Moderne Endodontie – Eine Standortbestimmung (I)  
Der Freie Zahnarzt 5, 50-5

**Himel VT, Moore RE, Hicks VE (1994):**

The effects which three endodontic files have on canal shape.  
J Endod 20, 204 (AAE-abstract RS 65)

**Hülsmann M:**

Die Wurzelkanalaufbereitung mit dem Canal-Finder-System nach LEVY.  
Raster-Elektronenmikroskopische Untersuchungen und klinische Erfahrungen.  
Med. Diss. Göttingen **1987**

**Hülsmann M:**

Entwicklung einer Methodik zur standardisierten Überprüfung verschiedener Aufbereitungsparameter und vergleichende In-vitro-Untersuchung unterschiedlicher Systeme zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung  
Med. Habil-Schr. Göttingen **1998**

**Hülsmann M (2006):**

Die Desinfektion des endodontischen Systems  
Endodontie 15, 147-68

**Hülsmann M:**

Endodontie  
Georg Thieme Verlag Stuttgart – New York **2008**

**Hülsmann M, Bertzbach F (1989):**

Die Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle mit Handinstrumenten und  
maschinellen Aufbereitungshilfen  
Dtsch Zahnärztl Z 44, 448-51

**Hülsmann M, Stryga S (1993):**

Comparison of Root Canal Preparation Using Different Automated Devices and  
Hand Instrumentation  
J Endod 19, 141-5

**Hülsmann M, Meyer G, Bertzbach F, Großbernd E (1988):**

Untersuchungen zur Wurzelkanalaufbereitung mit dem maschinellen Canal-  
Finder- System.  
Dtsch Zahnärztl Z 43, 784-788

**Hülsmann M, Gambal A, Bahr R (1998):**

An improved technique for the evaluation of root canal preparation  
J Endod 25, 599-602

**Hülsmann M, Herbst U, Schäfers F (2003):**

Comparative Study of root-canal preparation using Lightspeed and Quantec SC  
rotary NiTi instruments  
Int Endod J 36, 748-56

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

Mechanical Preparation of root canals: shaping goals, techniques and means  
Endodontic Topics 10, 30-76

**Ingle JI (1961):**

A standardized endodontic technique using newly designed instruments and  
filling materials  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 14, 83-91

**Kahlmeier C:**

Eine vergleichende In-vitro-Studie zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung mit  
den Nickel-Titan-Systemen ProFile .04 und GT Rotary  
Med. Diss. Göttingen **2002**

***Kazemi RB, Stenman E, Spanberg LSW (1996):***

Machining efficiency and wear resistance of nickel-titanium endodontic files  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 81, 596-602

***Kim HC, Kwak SW, Cheung GS, Ko DH, Chung SM, Lee W (2012):***

Cyclic fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne  
J Endod 38, 541-4

***Kröncke A (1981):***

Root canal preparation as a prerequisite for applying filling material  
Dtsch Zahnärztl Z 36, 201-7

***Kuhn G, Tavernier B, Jordan L (2001):***

Influence of Structure on Nickel-Titanium Endodontic Instruments Failure  
J Endod 27, 516-20

***Kuhn WG, Carnes DL, Clement DJ, Walker WA (1997):***

Effect of Tip Design of Nickel-Titanium and Stainless Steel Files in Root Canal Preparation  
J Endod 23, 735-8

***Kunert GG, Fontanella VRC, Maranhao de Moura AA, Barletta FB (2010):***

Analysis of Apical Root Transportation Associated with ProTaper Universal F3 and F4 Instruments by Using Digital Subtraction Radiography  
J Endod 36, 1052-5

***Kuzekanani M, Walsh LJ, Yousefi MA (2009):***

Cleaning and shaping curved root canals: Mtwo vs ProTaper instruments, a lab comparison  
Indian J Dent Res 20, 268-70

***Lim KC, Webber J (1985):***

The validity of simulated root canals for the investigation of the prepared root canal shape  
Int Endod J 18, 240-6

***Lim KC, McCae JG, Johnson MR (1987):***

SEM evaluation of sonic and ultrasonic devices for root canal preparation  
Quintessence Int 18, 793-7

***Loushine RJ, Weller RN, Hartwell GR (1989):***

Stereomicroscopic evaluation of canal shape following hand, sonic, and ultrasonic instrumentation  
J Endod 15, 417-21

**Luiten DJ, Morgan LA, Baumgartner JC, Marshall JG (1995):**

A comparison of four instrumentation techniques on apical canal transportation  
J Endod 21, 26-32

**Markovic L (2005):**

Das Frakturverhalten von vier Nickel-Titan-Systemen in unterschiedlich gekrümmten Wurzelkanälen – eine In-vitro-Studie  
Endodontie 15, 43-9

**McCann JT, Keller DL, La Bounty GL (1990):**

A modification of the muffle model system to study root canal morphology  
J Endod 16, 114-5

**Merte K (2002):**

Die Wurzelkanalaufbereitung – handinstrumentell oder maschinell  
Teil II – Nickel-Titan-Instrumente  
ZMK 18, 863-8

**Meyer G (1991):**

Die Aufbereitung des Wurzelkanals  
Zahnärztl Mitt 81, 864-70

**Meyer W (1970):**

Die Anatomie der Wurzelkanäle, dargestellt an mikroskopischen Rekonstruktionsmodellen  
Dtsch Zahnärztl T 25, 1064-77

**Miserendino LJ, Miserendino CA, Moser JB, Heuer MA, Osetek EM (1988):**

Cutting efficiency of endodontic instruments. Part 3: Comparison of sonic and ultrasonic instrument systems  
J Endod 14, 24-30

**Morgan LF, Montgomery S (1984):**

An Evaluation of the Crown-down Pressureless Technique  
J Endod 10, 491-8

**Musch U:**

Eine vergleichende In-vitro-Studie zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung mit den Nickel-Titan-Systemen ProTaper und RaCe  
Med. Diss. Göttingen **2002**

**Nordmeyer S, Schnell V, Hülsmann M (2011):**

Comparison of root canal preparation using Flex Master Ni-Ti and Endo-Eze AET stainless steel instruments  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 111, 251-9

**O'Connell DT, Brayton SM (1975):**

Evaluation of root canal preparation with two automated endodontic handpieces  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 39, 298-303

**Paqué F, Musch U, Hülsmann M (2005):**

Comparison of root canal preparation using RaCe and ProTaper rotary Ni-Ti instruments  
Int Endod J 38, 8-16

**Perez F, Schoumacher M, Peli JF (2005):**

Shaping ability of two rotary instruments in simulated canals: stainless steel ENDOflash and nickel-titanium HEROShaper  
Int Endod J 38, 637-44

**Peters OA (2004):**

Current challenges and Concepts in the Preparation of Root Canal Systems: A Review  
J Endod 30, 559-67

**Peters OA, Gluskin AK, Weiss RA, Han JT (2012):**

An in vitro assessment of the physical properties of novel Hyflex nickel-titanium rotary instruments  
Int Endod J 2012 Apr 17. doi: 10.1111/j.1365-2591.2012.02067

**Pettiette MT, Metzger Z, Phillips C, Trope M (1999):**

Endodontic complications of root-canal therapy performed by dental students with stainless-steel K-files and nickel-titanium hand files  
J Endod 25, 230-4

**Pineda F, Kuttler Y (1972):**

Mesiodistal and buccolingual roentgenographic investigation of 7,275 root canals  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 33, 101-10

**Plotino G, Grande M, Falanga A, Di Guisepe L, Lamorgese V, Somma F (2007):**

Dentine removal in the coronal portion of root canals following two preparation techniques  
Int Endod J 40, 852-8

**Poorni S, Kumar RA, Indira R (2009):**

Canal complexity of a mandibular first molar  
J Conserv Dent 12, 37-40

**Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL Jr (1997):**

Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments  
J Endod 23, 77-85

**Putnam BW, Brown CE, Legan JJ (1998):**

Evaluation of distortion and breakage of nickel-titanium endodontic instruments  
J Endod 24, 274 (Abstract OR 13)

**Rapisarda E, Bonaccorso A, Tripi TR, Condorelli GG, Torrisi L (2001):**

Wear of Nickel-Titanium Endodontic Instruments Evaluated by Scanning Electron Microscopy: Effect of Ion Implantation  
J Endod 27, 588-92

**Roane JB, Sabala CL, Duncanson MG (1985):**

The „Balanced Force“ Concept for Instrumentation of Curved Canals  
J Endod 11, 203-11

**Rödig T:**

Die Wurzelkanalpräparation  
In: Rödig T, Hülsmann M, Nordmeyer S, Drebenstedt S  
Grundlagen der modernen Endodontie  
Spitta Verlag, Balingen **2009**  
Seite 123 - 174

**Rödig T, Hülsmann M, Kahlmeier C (2007):**

Comparison of root canal preparation with two rotary NiTi instruments: ProFile .04 and GT Rotary  
Int Endod J 40, 553-62

**Rowan MB, Nicholls JI, Steiner J (1996):**

Torsional Properties of Stainless Steel and Nickel-Titanium Endodontic Files  
J Endod 22, 341-5

**Ruddle CJ (2012):**

Canal preparation: single-file shaping technique  
Dentistry Today 31, 126-9

**Sadeghi S (2011):**

Shaping ability of NiTi rotary versus stainless steel hand instruments in simulated curved canals  
Med Oral Patol Oral Cir Bucal 3, 454-8



**Samyn JA, Nicholls JI, Steiner J (1996):**

Comparison of stainless steel and nickel-titanium instruments in molar root canal preparation

J Endod 22, 177-81

**Schade M:**

Eine vergleichende Studie der maschinellen Wurzelkanalpräparation mit den Nickel-Titan-Aufbereitungssystemen Quantec Series 2000 und HERO 642

Med. Diss. Göttingen **1999**

**Schäfer E (2002a):**

Effect of Physical Vapor Deposition on Cutting Efficiency of Nickel-Titanium Files

J Endod 28, 800-2

**Schäfer E (2002b):**

Effect of sterilization on the cutting efficiency of PVD-coated nickel-titanium endodontic instruments

Int Endod J 35, 867-72

**Schäfer E (2010):**

Letter to the Editor: Root canal curvature

Int Endod J 43, 616-21

**Schäfer E, Zapke K (2000):**

Effizienz maschineller Wurzelkanalaufbereitungssysteme im Vergleich zur manuellen Instrumentierung

Quintessenz 51, 115-24

**Schäfer E, Lohmann D (2002a):**

Efficiency of rotary nickel titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile-Part 1. Shaping ability in simulated curved canals

Int Endod J 35, 505-13

**Schäfer E, Lohmann D (2002b):**

Efficiency of rotary nickel titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile-Part 2. Cleaning effectiveness and instrumentation results in severely curved root canals of extracted teeth

Int Endod J 35, 514-21

**Schäfer E, Tepel J, Hoppe W (1994a):**

Wurzelkanalinstrumente aus Nickel-Titan-Legierungen zur Wurzelkanalaufbereitung

ZWR 103, 90-6

**Schäfer E, Tepel J, Hoppe W (1994b):**

Vergleichende Untersuchung von Wurzelkanalinstrumenten aus herkömmlichem Stahl und Nickel-Titan-Legierungen  
Endodontie 3, 185-97

**Schäfer E, Hickel R, Geurtsen W, Heidemann D, Löst C, Petschelt A, Raab W (2000):**

Offizielles endodontisches Lexikon der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung  
Endodontie 9, 129-60

**Schäfer E, Diez C, Hoppe W, Tepel J (2002):**

Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth  
J Endod 28, 211-6

**Schäfer E, Dzepina A, Danesh G (2003):**

Bending properties of rotary nickel-titanium instruments  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 96, 757-63

**Schäfer E, Erler M, Dammaschke T (2006a):**

Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part1. Shaping ability in simulated curved canals  
Int Endod J 39, 196-202

**Schäfer E, Erler M, Dammaschke T (2006b):**

Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth  
Int Endod J 39, 203-12

**Schilder H (1974):**

Cleaning and shaping the root canal  
Dent Clin North Am 18, 269-96

**Schneider SW (1971):**

A comparison of canal preparations in straight and curved root canals  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 32, 271-5

**Schnell V:**

Eine vergleichende In-vitro-Studie zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung mit dem Nickel-Titan-System FlexMaster und dem Stahl-System AET  
Med. Diss. Göttingen **2007**

**Sonntag D, Ott M, Kook K, Stachniss V (2007):**

Root canal preparation with the NiTi systems K3, Mtwo and ProTaper  
Aust Endod J 33, 73-81

**Stadler LE, Wennberg A, Olgart L (1986):**

Instrumentation of the curved root canal using filing or reaming technique – a clinical study of technical complications  
Swed Dent J 10, 37-43

**Stewart GG (1955):**

The importance of chemomechanical preparation of the root canal  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 8, 993-7

**Sydney GB, Batista A, DeMelo LL (1991):**

The radiographic platform: a new method to evaluate root canal preparation in vitro  
J Endod 17, 570-2

**Tharuni SL, Parameswaran A, Sukumaran VG (1996):**

A comparison of canal preparation using K-file and LightSpeed in resin blocks  
J Endod 22, 474-6

**Thompson SA (2000):**

An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry  
Int Endod J 33, 297-300

**Vahid A, Roohi N, Zayeri F (2009):**

A comparative study of four rotary NiTi instruments in preserving canal curvature, preparation time and change of working length  
Aust Endod J 35, 93-7

**Veltri M, Mollo A, Mantovani L, Pini P, Balleri P, Grandini S (2005):**

A comparative study of Endoflare-Hero shaper and Mtwo NiTi instruments in the preparation of curved root canals  
Int Endod J 38, 610-6

**Versümer J:**

Eine vergleichende Untersuchung der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung mit dem Lightspeed- und dem ProFile .04-System  
Med. Diss. Göttingen **1999**

**Vertucci FJ (1984):**

Root canal anatomy of the human permanent teeth  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 58, 589-99

**Viana ACD, de Melo MCC, de Azevedo Bahia MG, Buono VDL (2010):**

Relationship between flexibility and physical, chemical, and geometric characteristics of rotary nickel-titanium instruments

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 110, 527-33

**Voss A:**

Die Aufbereitung des gekrümmten Wurzelkanals

Dtsch. Zahnärztekalendar, Hanser Verlag, München 1995

S. 79-114

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

An Initial Investigation of the Bending and torsional Properties of nitinol Root Canal Files

J Endod 14, 346-51

**Walker RT (1986):**

Device for the radiographic examination of teeth in vitro

Int Endod J 19, 315-7

**Weine FS, Kelly RF, Lio PJ (1975):**

The effect of preparation procedures on original canal shape and on apical foramen shape

J Endod 1, 255-62

**Weine FS, Kelly RF, Bray K (1976):**

Effect of preparation with endodontic handpieces on original canal shape

J Endod 2, 298-303

**Williamson AE, Sandor AJ, Justman BC (2009):**

A Comparison of Three Nickel Titanium Rotary Systems, EndoSequence, ProTaper Universal, and Profile GT, for Canal-cleaning Ability

J Endod 35, 107-9

**Wolcott J, Himel T (1997):**

Torsional Properties of Nickel-Titanium versus Stainless Steel Endodontic Files

J Endod 23, 217-20

**Yang G, Yuan G, Yun X, Zhou X, Liu B, Wu H (2011):**

Effects of Two Nickel-Titanium Instrument Systems, Mtwo versus ProTaper Universal, on Root Canal Geometry Assessed by Micro-Computed Tomography

J Endod 37, 1412-6

**Yared G (2008):**

Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations

Int Endod J 41, 339-44

**Yigit Özer S (2011):**

Comparison of root canal transportation induced by three rotary systems with noncutting tips using computed tomography

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 111, 244-50

**Zhang R & Hu T (2010):**

Root Canal Curvature (Letters to the Editor)

Int Endod J 43, 616-21

## 9. Anhang

## 9.1 Verwendete Geräte und Materialien

<i>Aluminiumnieten</i>	DN 661, 3,0 mm x 12,0 mm, Fa. Gesipa, Waldorf
<i>Bildanalysesoftware</i>	ImageJ, Research Services Branch, National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA
<i>Diamantierte Trennscheibe</i>	Hopf, Ringeleb und Co., Berlin
<i>Diamantschleifer (torpedoförmig)</i>	Komet, Gebr. Brasseler, Lemgo
<i>Digitaler Röntgensensor</i>	CDR1, CoSi Elektronik GmbH, Eching, Format 2x3cm
<i>EDTA</i>	Calcinase EDTA-Lösung, Ige artis Pharma GmbH + Co. KG, Dettenhausen
<i>Endomotor</i>	Endo IT professional, VDW GmbH, München
<i>Exsikkator</i>	Exsikkator novus, Fa. W. Kranich, Göttingen
<i>Gates-Bohrer</i>	Komet, Gebr. Brasseler, Lemgo
<i>Heidemannspatel</i>	HuFriedy, Leimen
<i>Kamera</i>	Nikon D7000, Nikon GmbH, Düsseldorf
<i>Kameraobjektiv</i>	Nikon AF-S Mikro-Nikkor 105mm 1:2,8 GED
<i>Kamera-Ringlicht</i>	Doctorseyes PLC4 mit Winglights, Doctorseyes GmbH, Oberhausen
<i>Küvettenystem</i>	Wissenschaftliche Werkstätten der Universitätsmedizin Göttingen
<i>Kunststoff</i>	Paladur Autopolymerisat, Heraeus Kulzer GmbH, Hanau
<i>Mtwo</i>	VDW GmbH, München
<i>Natriumhypochlorit</i>	NaOCl 3%, Apotheke des Klinikums Göttingen

---

<i>Papierspitzen</i>	ISO 25, Alfred Becht GmbH, Offenburg
<i>Peripheriewachs</i>	Heraeus Kulzer GmbH, Hanau
<i>Präzisions-Trennschleifsystem</i>	Exakt Apparatebau GmbH & Co. KG, Norderstedt
<i>ProTaper Universal</i>	Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz
<i>Rasterelektronenmikroskop</i>	Digital Scanning Microscope DSM 960, Fa. Zeiss, Oberkochen
<i>Reamer</i>	VDW Antaeos, München
<i>Röntgenfilm</i>	Agfa Dentus M2, Fa. Agfa, Leverkusen
<i>Röntgengerät</i>	Heliodent DS, Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim
<i>Röntgengerät (digital)</i>	Elitys, Trophy Radiologie, Washington, USA
<i>Rosenbohrer</i>	Komet, Gebr. Brasseler, Lemgo
<i>S5</i>	Sendoline, Täby, Schweden
<i>Scanner</i>	HP Photosmart C3180, Fa. Hewlett- Packard, Böblingen
<i>Sekundenkleber</i>	Distr, Herlitz PSB AG, Berlin
<i>Spülkanüle</i>	BD Mikrolance 3, 0,4 x 19 mm, BD Drogheda, Irland
<i>Sputter-Coater</i>	SC 51, Fissons Instruments, Uckfield, Großbritannien
<i>Vaseline</i>	Vaseline weiß DAB10, Winthrop Arzneimittel GmbH, Mülheim-Kärlich
<i>Winkelstück</i>	W&H Wehadent Dentalwaren, Übersetzung 4:1, Salzburg, Österreich

## 9.2 Arbeitsbögen

Arbeitsbogen der S5-Gruppe

<i>Arbeitsschritt</i>	<i>Nr.</i>		<i>Auswertung</i>	
Sondieren (Reamer ISO 15)			<u>1.) Summe Arbeitszeit</u>	
Spülung 2ml NaOCl (3%)				
Endo S5 File no.1		Zeit:	<u>2.) Krümmungswinkel</u>	
Spülung 2ml NaOCl (3%)			a) präoperativ	
Rekapitulation Reamer ISO 10			c) postoperativ	
S5 File no.2 ( $\frac{1}{3}$ - $\frac{1}{2}$ des WK)		Zeit:	c) Winkeldifferenz	
Spülung 2ml NaOCl (3%)				
Rekapitulation Reamer ISO 10			<u>3.) Krümmungsradius</u>	
Endo S5 File no.3		Zeit:	a) präoperativ	
Spülung 2ml NaOCl (3%)			b) postoperativ	
Rekapitulation Reamer ISO 10			c) Differenz	
Endo S5 File no.4 (auf AL)		Zeit:		
Spülung 2ml NaOCl (3%)			<u>4. Gängigkeit</u>	
Rekapitulation Reamer ISO 10			a) Verblockung ab	
Endo S5 File no.5 (auf AL)		Zeit:		
Spülung 2ml NaOCl (3%)			<u>5. AL-Verlust</u>	
Rekapitulation Reamer ISO 10			a) bei ISO / in mm	
<u>Apikale Präparation</u>				
Endo S5 File no.4 (auf AL)		Zeit:	<u>6.) Fraktur bei ISO</u>	
Spülung 2ml NaOCl (3%)				
Rekapitulation Reamer ISO 10			<u>7. Perforation</u>	
Endo S5 File no.3 (auf AL)		Zeit:	a) wann festgestellt?	
Spülung 2ml NaOCl (3%)				
Rekapitulation Reamer ISO 10			<u>8. Sauberkeit</u>	
Endo S5 File no.2 (auf AL)		Zeit:	a) <i>Debris</i> koronal	
Spülung 2ml NaOCl (3%)			medial	
Rekapitulation Reamer ISO 10			apikal	
<u>Abschlussspülung</u>			b) <i>Smear-Layer</i> koronal	
5ml EDTA			mesial	
5ml NaOCl			apikal	
<u>RÖNTGEN REAMER ISO 25</u>				
			<u>9.) Querschnitt</u>	
			koronal	
			medial	
			apikal	



Arbeitsbogen der Mtwo-Gruppe

<i>Arbeitsschritt</i>	<i>Nr.</i>		<i>Auswertung</i>	
Sondieren (Reamer ISO10)			<u>1.) Summe Arbeitszeit</u>	
Spülung 2ml NaOCl (3%)				
10/04 violett (auf AL)		Zeit:	<u>2.) Krümmungswinkel</u>	
Spülung 2ml NaOCl (3%)			a) präoperativ	
Rekapitulation Reamer ISO 10			b) postoperativ	
15/05 weiß (auf AL)		Zeit:	c) Winkeldifferenz	
Spülung 2ml NaOCl (3%)				
Rekapitulation Reamer ISO 10			<u>3. Krümmungsradius</u>	
20/06 gelb (auf AL)		Zeit:	a) präoperativ	
Spülung 2ml NaOCl (3%)			b) postoperativ	
Rekapitulation Reamer ISO 10			c) Differenz	
25/06 rot (auf AL)		Zeit:		
Spülung 2ml NaOCl (3%)			<u>4. Gängigkeit</u>	
Rekapitulation Reamer ISO 10			a) Verblockung ab	
30/05 blau (auf AL)		Zeit:		
Spülung 2ml NaOCl (3%)			<u>5. AL-Verlust</u>	
Rekapitulation Reamer ISO 10			a) bei ISO / in mm	
<u>Abschlusspülung:</u>				
5ml EDTA			<u>6.) Fraktur bei ISO</u>	
5ml NaOCl				
<u>RÖNTGEN REAMER ISO 25</u>			<u>7.) Perforation</u>	
			a) wann festgestellt?	
			<u>8. Sauberkeit</u>	
			a) <i>Debris</i> koronal	
			medial	
			apikal	
			b) <i>Smear-Layer</i> koronal	
			mesial	
			apikal	
			<u>9. Querschnitt</u>	
			koronal	
			medial	
			apikal	

Arbeitsbogen der ProTaper Universal-Gruppe

<i>Arbeitsschritt</i>	<i>Nr.</i>		<i>Auswertung</i>	
Sondieren (Reamer ISO 10)			<b>1. Summe Arbeitszeit</b>	
Spülung 2ml NaOCl (3%)				
S1 violett (¼ des WK)		Zeit:	<b>2. Krümmungswinkel</b>	
Spülung 2ml NaOCl (3%)			a) präoperativ	
Rekapitulation Reamer ISO 10			b) postoperativ	
SX farblos (bis zum Widerstand)		Zeit:	c) Winkeldifferenz	
Spülung 2ml NaOCl (3%)				
Rekapitulation Reamer ISO 10			<b>3. Krümmungsradius</b>	
S1 violett (ohne Druck, auf AL)		Zeit:	a) präoperativ	
Spülung 2ml NaOCl (3%)			b) postoperativ	
Rekapitulation Reamer ISO 10			c) Differenz	
S2 weiß (auf AL)		Zeit:		
Spülung 2ml NaOCl (3%)			<b>4. Gängigkeit</b>	
Rekapitulation Reamer ISO 10			a) Verblockung ab	
F1 gelb (auf AL)		Zeit:		
Spülung 2ml NaOCl (3%)			<b>5. AL-Verlust</b>	
Rekapitulation Reamer ISO 10			a) bei ISO / in mm	
F2 rot (auf AL)		Zeit:		
Spülung 2ml NaOCl (3%)			<b>6. Fraktur bei ISO</b>	
Rekapitulation Reamer ISO 10				
F3 blau (auf AL)		Zeit:	<b>7. Perforation</b>	
Spülung 2ml NaOCl (3%)			a) wann festgestellt?	
Rekapitulation Reamer ISO 10				
<u>Abschlussspülung:</u>			<b>8. Sauberkeit</b>	
5ml EDTA			a) <i>Debris</i> koronal	
5ml NaOCl			medial	
<u>RÖNTGEN REAMER ISO 25</u>			apikal	
			b) <i>Smear-Layer</i> koronal	
			medial	
			apikal	
			<b>9. Querschnitt</b>	
			koronal	
			medial	
			apikal	

## Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Hülsmann für das Überlassen des Dissertationsthemas sowie die hervorragende Betreuung. Die engagierte Unterstützung hat entscheidend zum Gelingen der Dissertation beigetragen.

Für die Betreuung bei der Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen danke ich Herrn Dr. med. dent. Christian Holscher und Herrn Hans-Georg Sydow.

Herrn Hans-Joachim Helms bin ich für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse sehr dankbar.

