

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde
des Zentrums für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde des
Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf

Direktorin: Frau Prof. Dr. med. dent. Ursula Platzer

In vitro Untersuchung dreier Endodontiegeräte zur
maschinellen Aufbereitung mit integrierter
Apexlokalisation

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg vorgelegt von

Marc Cord Roderjan

aus Hamburg

Hamburg 2009

Angenommen von der Medizinischen Fakultät
der Universität Hamburg am: 15.9.2009
Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen
Fakultät der Universität Hamburg
Prüfungsausschuss: die Vorsitzende: Prof. Dr. U. Platzer
Prüfungsausschuss: 2. Gutachter: Prof. Dr. U. Schiffner
Prüfungsausschuss: 3. Gutachter: PD Dr. H. Seedorf

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|--|------------|
| 1 | Einleitung | 5 |
| 2 | Literaturübersicht | 7 |
| 2.1 | Röntgenologische Arbeitslängenbestimmung | 7 |
| 2.2 | Endometrische Arbeitslängenbestimmung | 14 |
| 2.3 | Aufbereitung des Wurzelkanalsystems | 28 |
| 2.4 | Kombination aus maschineller Aufbereitung und Endometrie | 39 |
| 3 | Ziel der Untersuchung | 47 |
| 4 | Material und Methoden | 48 |
| 4.1 | Materialien | 48 |
| 4.1.1 | Gerätebeschreibung Dentaport ZX | 48 |
| 4.1.2 | Gerätebeschreibung VDW.Gold | 51 |
| 4.1.3 | Gerätebeschreibung EndoPilot | 54 |
| 4.1.4 | Verwendete Feilen | 57 |
| 4.2 | Methoden | 60 |
| 4.2.1 | Übersicht über die praktische Vorgehensweise | 60 |
| 4.2.2 | Auswahl der Zähne | 61 |
| 4.2.3 | Fixierung der Zähne | 62 |
| 4.2.4 | Röntgenologische Arbeitslängenbestimmung | 64 |
| 4.2.5 | Aufbereitung | 68 |
| 4.2.6 | Kontrolle der Aufbereitung | 69 |
| 4.2.7 | Inhalt der Datentabelle | 72 |
| 4.2.8 | Statistische Auswertung | 73 |
| 5 | Ergebnisse | 75 |
| 5.1 | Zahnart und Kanalverlauf | 75 |
| 5.2 | Fotografische Dokumentation der apikalen Region | 77 |
| 5.3 | Lage des physiologischen Foramens | 80 |
| 5.4 | Röntgenologisch festgelegte Arbeitslänge | 81 |
| 5.4.1 | Abstand zum Foramen physiologicum | 81 |
| 5.4.2 | Abstand zum Foramen apicale | 84 |
| 5.5 | Endometrische Arbeitslängenbestimmung | 85 |
| 5.5.1 | Abstand zum Foramen physiologicum | 86 |
| 5.5.2 | Abstand zum Foramen apicale | 88 |
| 5.6 | Vergleich Röntgen / Endometrie | 91 |
| 5.7 | Auswertung der Ergebnisse | 92 |
| 5.7.1 | Deskriptive Statistik | 92 |
| 5.7.2 | Analytische Statistik | 93 |
| 6 | Diskussion | 99 |
| 6.1 | Methodenkritik | 99 |
| 6.1.1 | Modellkritik | 99 |
| 6.1.2 | Röntgenologische Arbeitslängenbestimmung | 101 |
| 6.1.3 | Aufbereitung | 104 |
| 6.1.4 | Auswertung des Aufbereitungsendes | 104 |
| 6.2 | Ergebniskritik | 106 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.2.1 | Röntgenologische Arbeitslängenbestimmung | 107 |
| 6.2.2 | Endometrisch kontrollierte Aufbereitung | 107 |
| 6.3 | Klinische Aspekte | 112 |
| 7 | Schlussfolgerungen | 115 |
| 8 | Zusammenfassung | 116 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 119 |
| 10 | Anhang | 125 |
| 11 | Danksagung | 129 |
| 12 | Lebenslauf | 130 |
| 12.1 | Persönliche Angaben | 130 |
| 12.2 | Werdegang | 130 |

1 Einleitung

Die Endodontie ist der Bereich der Zahnheilkunde, der sich mit Erkrankungen des Pulpa-Dentin-Komplexes und des periapikalen Zahngewebes beschäftigt.

Ziel der endodontischen Therapie ist es, den erkrankten Zahn zu erhalten und schädigende Auswirkungen auf den Gesamtorganismus, die von dem erkrankten Zahn ausgehen können, zu unterbinden.

Dieses Ziel wird durch die Entfernung des infizierten, nekrotischen Pulpagewebes, desinfizierende Spülung und eine anschließende Wurzelfüllung erreicht.

Eine erfolgreiche endodontische Behandlung setzt voraus, dass der Wurzelkanal vollständig aufbereitet wird. Voraussetzung dafür ist die exakte Ermittlung und Einhaltung der endodontischen Arbeitslänge.

Bei unvollständiger oder zu kurzer Aufbereitung kann durch eine zu hohe Menge verbliebener Bakterien eine Reinfektion resultieren. Bei Überinstrumentierung kann es zur Keimverschleppung und Verletzung der periapikalen Strukturen kommen. Außerdem besteht die Gefahr des Überstopfens von Wurzelfüllmaterial und der dadurch dauerhaften Reizung des periapikalen Gewebes.

Die Wurzelkanalaufbereitung sollte sich apikal bis zur natürlichen Konstriktion des Wurzelkanals, dem Foramen physiologicum, erstrecken.

Für die Ermittlung der Arbeitslänge, also der Findung des physiologischen Foramens, gibt es heute zwei übliche Verfahren, die sich gegenseitig auch ergänzen können: Die röntgenologische Methode und die elektrische Messung, die Endometrie.

Für die Aufbereitung der Wurzelkanäle etabliert sich zunehmend die maschinelle Aufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten. Sie sollen gegenüber den konventionellen Handinstrumenten bei runden, gebogenen Kanälen die

technische Durchführung erleichtern sowie das Risiko verringern, den Kanal zu begradigen und die Aufbereitungszeit verkürzen.

Die Endodontiegeräte der neuesten Generation versuchen, die Endometrie und die maschinelle Aufbereitung zu vereinigen, indem durch ein integriertes elektrisches Messverfahren der Mikromotor des Handstücks automatisch stoppt, sobald die Instrumentenspitze sich im Bereich der physiologischen Konstriktion befindet. Die Vorteile sollen in einer idealen Aufbereitungslänge und kürzerer Aufbereitungszeit liegen.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, festzustellen, ob sich mit den Geräten *in vitro* das apikale Aufbereitungsende kontrollieren lässt. Hierzu werden drei aktuelle Endodontiegeräte untereinander, sowie mit der röntgenologischen Arbeitslängenbestimmung verglichen.

Die Messreihen werden an extrahierten Zähnen durchgeführt. Nach der Aufbereitung werden die Zähne apikal aufgeschnitten und die Lage der Instrumentenspitze in Relation zum physiologischen und anatomischen Foramen beurteilt.

2 Literaturübersicht

2.1 Röntgenologische Arbeitslängenbestimmung

Ziel der Wurzelkanalaufbereitung ist die vollständige Entfernung des infizierten, nekrotischen Pulpagewebes und Schaffung einer geeigneten Form des Wurzelkanals zur Aufnahme des definitiven Füllmaterials (HÜLSMANN und SCHÄFER 2006).

Hierbei gilt der apikale Endpunkt der Wurzelkanalaufbereitung als wichtiger Faktor für den Behandlungserfolg (GULDENER und LANGELAND 1993).

Der adäquate apikale Endpunkt ergibt sich aus der Anatomie der Wurzelspitze (Abb. 1). Das Wurzelkanallumen verjüngt sich von koronal nach apikal. Die engste Stelle wird als physiologisches Foramen bezeichnet. Nach der Konstriktion erweitert sich der Kanal wieder (DUMMER 1984, KUTTLER 1955).

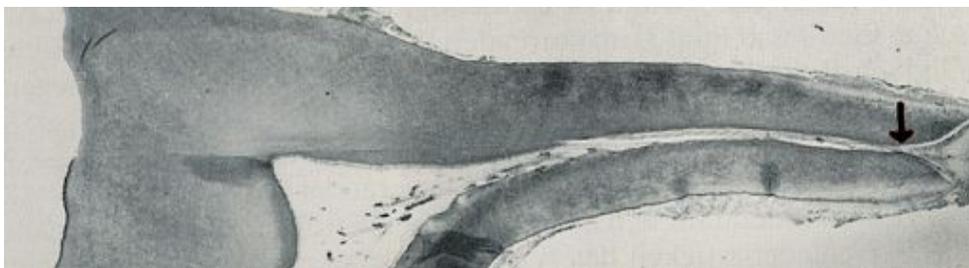


Abb. 1: Histologischer Schnitt durch einen 1. Molaren, das Foramen physiologicum ist durch einen Pfeil gekennzeichnet nach GULDENER und LANGELAND (1993)

Aus folgenden Überlegungen heraus wird empfohlen, nicht über das physiologische Foramen hinaus aufzubereiten:

- Es ist leichter möglich, einen apikalen Stopp für das Wurzelfüllmaterial zu schaffen und somit eine gute Voraussetzung für das Abfüllen des Kanals herzustellen. Das Risiko des Überstopfens wird minimiert (GULDENER und LANGELAND 1993).

- Das Risiko, beim Spülen die Spülflüssigkeit über das apikale Foramen hinaus zu transportieren wird vermindert. Der Transport der Spülflüssigkeit über das apikale Foramen hinaus kann das periapikale Gewebe irritieren und Symptome verursachen (HÜLSMANN und HAHN 2000).
- Je kleiner die Kontaktfläche zwischen Füllmaterial und dem periapikalen Gewebe gehalten wird, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer Irritation im Sinne einer immunologischen Reaktion (MERYON 1987).

Andererseits soll die apikale Extension der Wurzelkanalaufbereitung nicht zu kurz ausfallen.

Bei unvollständiger Kanalreinigung und Einschluss verbliebener Bakterien im Kanal können sich diese wieder vermehren (NAIR et al. 1990).

Als Standard hat sich deshalb etabliert, möglichst bis zum Foramen physiologicum aufzubereiten, so dass die natürliche Konstriktion belassen wird (GULDENER und LANGELAND 1993).

In der praktischen Anwendung wurde und wird mit verschiedenen Methoden versucht, dieses Ziel zu erreichen.

Bereits im Jahr 1860 erschien in der amerikanischen Zeitschrift „Dental Cosmos“ der Artikel „Filling nerve cavities“. Darin setzte sich der Autor mit der Frage auseinander, wie festgelegt werden könne, wie tief das seinerzeit verwendete Wurzelfüllungsmaterial Gold in den Kanal hinein zu stopfen sei. Einziges Kriterium war damals das Fingerspitzengefühl des Behandlers (HÜLSMANN und RÖDIG 2001).

SEIDBERG et al. (1975) geben an, dass die exakte Bestimmbarkeit der apikalen Konstriktion mittels taktiler Messung nur in 64% der Fälle möglich ist.

Das alleinige taktile Aufspüren der apikalen Konstriktion gilt heute als überholt. Durch die 1895 erfundene Röntgentechnik bot sich als Alternative zur taktilen Bestimmung der apikalen Konstriktion eine Möglichkeit, den klinisch nicht einsehbaren Bereich abzubilden.

KELLS fertigte 1899 die erste Röntgenaufnahme für endodontische Zwecke an. Bei der heute in den Lehrbüchern favorisierten und in der Praxis gebräuchlichsten Methode wird zunächst ein Ausgangsröntgenbild mittels Paralleltechnik und Langtubus angefertigt. Bei dieser Aufnahmetechnik sind Filmebene und Zahnachse möglichst parallel angeordnet, wobei der Zentralstrahl senkrecht darauf trifft (GULDENER und LANGELAND 1993, HELLWIG et al. 2003). Die nachfolgende Abbildung (Abb. 2) verdeutlicht das Prinzip.

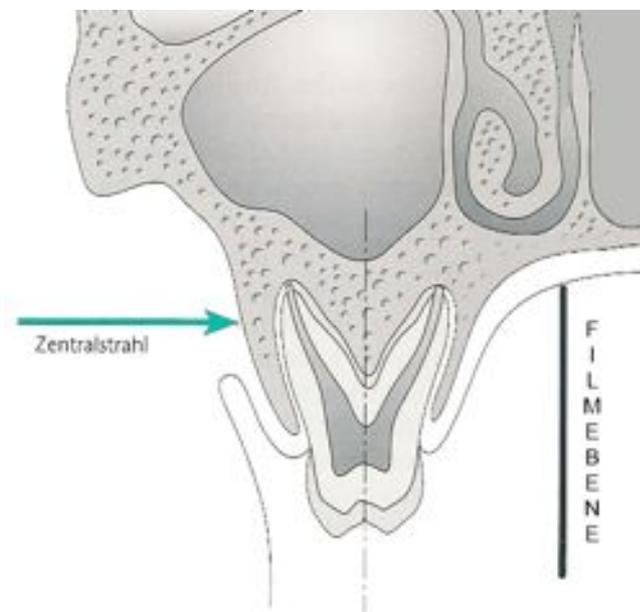


Abb. 2: Grundprinzip der Paralleltechnik nach ROTHER (2001)

Das Problem der Röntgendarstellung ist, dass weder das Foramen physiologicum noch das Foramen apikale eindeutig auf einem Röntgenbild erkennbar sind (GULDENER und LANGELAND 1993). Das, was sich radiologisch als Wurzelspitze darstellt, wird als röntgenologischer Apex bezeichnet. Die folgende Abbildung (Abb. 3) verdeutlicht, wie sich die Wurzelspitze röntgenologisch darstellt.

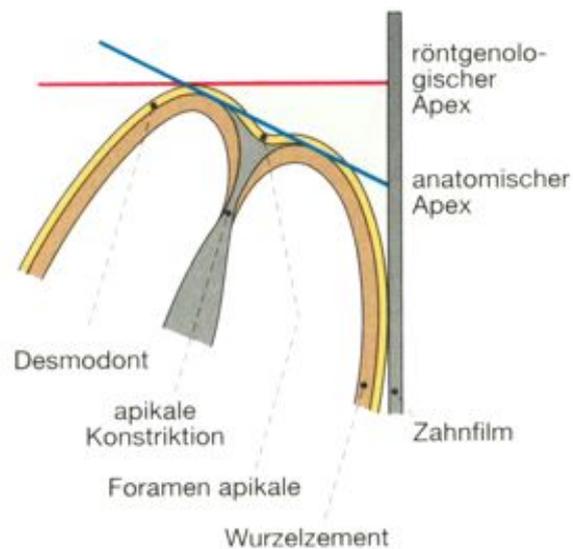


Abb. 3: Darstellung der Wurzelspitze bei der Röntgenaufnahme in Paralleltechnik nach HÖR (2006)

Folgende Strukturen aus der obigen Abbildung seien nachfolgend erläutert:

- Foramen physiologicum (engster Bezirk der apikalen Konstriktion)
- Foramen apicale (apikale Öffnung der Wurzel)
- Anatomischer Apex (apikales Ende der Wurzel, so wie es sich bei Betrachtung eines extrahierten Zahnes darstellt)
- Röntgenologischer Apex (apikales Ende der Wurzel, so wie es sich auf dem Röntgenbild darstellt)

Nach VANDE VOORDE und BJORND AHL (1969), DUMMER et al. (1984) und HELLWIG et al. (2003) beträgt die durchschnittliche Distanz zwischen röntgenologischem Apex und Foramen physiologicum etwa 1 mm.

Es hat sich deshalb durchgesetzt, mit der Aufbereitung etwa 1 mm vor dem röntgenologischen Apex zu enden (GULDENER und LANGELAND 1993, HELLWIG et al. 2003).

Um das klinisch nicht sichtbare apikale Aufbereitungsende beim Instrumentieren möglichst exakt zu treffen, muss sich der Behandler einer für ihn sichtbaren Hilfsstruktur bedienen, dem koronalen Referenzpunkt. Hierbei

handelt es sich um einen frei festzulegenden Punkt, beispielsweise eine Inzisalkante oder Höckerspitze. Die Länge zwischen dem koronalem Referenzpunkt und dem apikalen Aufbereitungsende wird als Arbeitslänge bezeichnet.

Theoretisch müsste diese Arbeitslänge gleich abgebildeter Zahnlänge minus 1 mm betragen, da, wie oben beschrieben, der röntgenologische Apex etwa 1 mm vom Foramen physiologicum entfernt liegt.

Als Problem dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Zahn trotz Verwendung der Rechtwinkel-Longtubustechnik auf dem Bild leicht vergrößert dargestellt wird.

Nach VANDE VOORDE und BJORND AHL (1969) beträgt die Vergrößerung bis zu 7%, was etwa 1,5 mm entspricht.

Wegen dieser röntgenologischen Vergrößerung und eventueller Verzerrungen im Röntgenbild empfehlen GULDENER und LANGELAND (1993), die dem Röntgenbild entnommene Länge je nach Zahn um 1-5 mm zu reduzieren. Die dadurch ermittelte Sicherheitslänge soll ein Überinstrumentieren verhindern. BARGHOLZ (2006) wählt wegen möglicher Projektionsfehler eine Sicherheitslänge von röntgenologischer Wurzellänge minus 2 mm.

Diese Länge wird am endodontischen Aufbereitungsinstrument als Strecke zwischen Instrumentenspitze und einem verschiebbaren Stopper fixiert. Sie wird als Messlänge bezeichnet (Abb. 4). Das auf Messlänge eingestellte Instrument wird so weit in den Kanal eingeführt, bis der Stopper den koronalen Referenzpunkt erreicht.

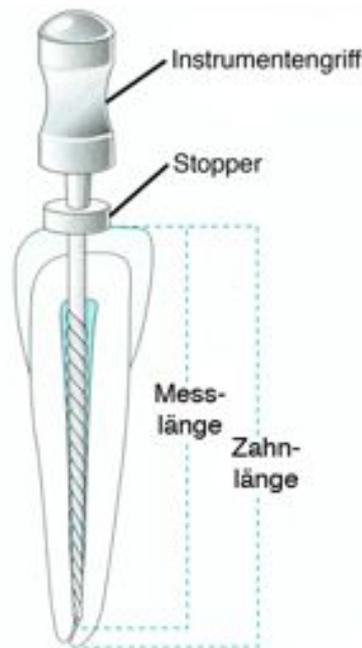


Abb. 4: Ein auf Messlänge eingebrachtes Aufbereitungsinstrument nach HELLWIG (2003)

Anschließend erfolgt die Anfertigung einer so genannten Röntgenmessaufnahme, auf der die Lage des Instruments im Wurzelkanal beurteilt werden kann.

Das Instrument für die Röntgenmessaufnahme soll bei Edelstahl-Instrumenten mindestens die ISO-Größe 15, bei Nickel-Titan-Instrumenten die ISO-Größe 20 und bei Silberstiften die ISO-Größe 8 aufweisen, da die Spitzen kleinerer Instrumente im Röntgenbild nicht eindeutig zu erkennen sind (HÖR 2006). Das Instrument sollte eine leichte Klemmpassung im Kanal haben, damit es bei der Aufnahme zur Überprüfung der gewählten Länge nicht verrutscht (GULDENER und LANGELAND 1993).

Muss die gewählte Messlänge um mehr als 2 mm korrigiert werden, um die gewünschte Arbeitslänge zu erhalten, sollte nach Korrektur der Länge eine zweite Messaufnahme angefertigt werden (VOSS 2004).

Der Vorteil der röntgenologischen Längenbestimmung liegt in der Tatsache, dass gleichzeitig Informationen über die Wurzelkrümmung und den Kanalverlauf entnommen werden können (GULDENER und LANGELAND 1993).

Durch die Zweidimensionalität ist es jedoch möglich, dass, je nach Strahlengang, z.B. eine vorhandene Wurzelkrümmung nicht abgebildet wird. Hierdurch kann der radiologisch angenommene Abstand zwischen röntgenologischem Apex und physiologischem Foramen nicht den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen. Auch eine Via falsa, also ein Abweichen mit dem Aufbereitungsinstrument vom natürlichen Kanalverlauf, kann unentdeckt bleiben.

Die nachstehende Röntgenaufnahme mit dem zugehörigen Foto der Region (Abb. 5) verdeutlicht die Problematik. Auf der Messlängenaufnahme stellt sich die Instrumentenspitze noch im Kanallumen dar. Tatsächlich hat sie aber lateral der Wurzel den Zahn nach außen verlassen.



Abb. 5: Obwohl das Röntgenbild vorgibt, dass sich die Feilenspitze noch innerhalb der Wurzel befindet, ist sie tatsächlich außerhalb des Zahnes nach WU (2001)

2.2 Endometrische Arbeitslängenbestimmung

Seit etwa 45 Jahren besteht die Möglichkeit, neben der Röntgenmessaufnahme und der taktilen Bestimmung der Arbeitslänge auch eine elektrische Widerstandsmessung zur Ergänzung oder als Alternative durchzuführen. Hierbei wird der elektrische Widerstand zwischen einem in den Wurzelkanal eingeführten Instrument und einer Gegenelektrode an der Mundschleimhaut bestimmt (HELLWIG 2003).

Das erste Gerät auf dem Markt, das Endometer, wurde 1962 von SUNADA entwickelt. Er nutzte die experimentellen Studien von SUZUKI, der 1942 an Hunden festgestellt hatte, dass der Gewebewiderstand zwischen Mundschleimhaut und Desmodont, unabhängig von der Zahnform und Zahnart, konstant $6,5 \text{ k}\Omega$ betragen würde (Abb. 6).

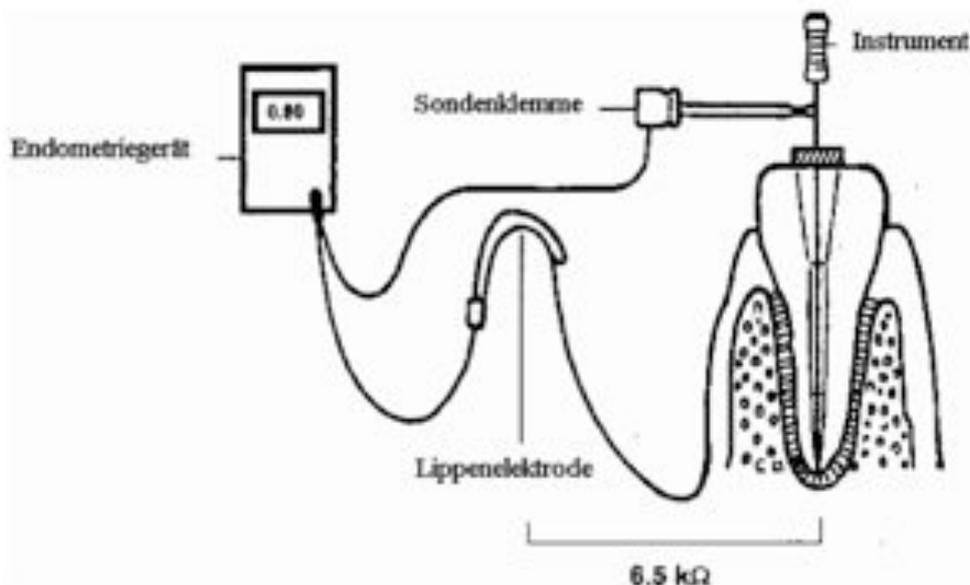


Abb. 6: Schaltbild des Gleichstromkreises des ersten Endometriegerätes nach GALLER 2002

Bei den Geräten der ersten Generation fungierte das Wurzelkanalinstrument in einem Gleichstromkreis entweder als Kathode oder als Anode. Der Kanal

musste für die Messung absolut trocken gelegt sein. Kam die Instrumentenspitze mit den am Foramen apicale inserierenden Fasern des Desmodonts in Berührung, wurde der Stromkreis geschlossen und die Arbeitslänge bestimmt (KOBAYASHI 1995).

Bei Flüssigkeit im Wurzelkanal war generell keine korrekte Messung möglich. Der Stromkreis wurde dann bereits über einen Kurzschlussstrom durch die Flüssigkeit geschlossen. Schon bevor die Instrumentenspitze die desmodontalen Fasern am Foramen apicale erreicht hatte, zeigte das Messgerät den Apex an. Die Arbeitslänge wurde dann zu kurz festgelegt.

Durch den verwendeten Gleichstrom war jedoch, selbst bei einer relativen Trockenlegung, keine präzise Messung des elektrischen Widerstandes möglich. Durch die trotz Trockenlegung vorhandene Flüssigkeit um die Messelektrodenspitze herum, kam es zur Polarisierung. Die sich ändernde Ionenkonzentration in der Flüssigkeit führte zu einem instabilen Stromfluss (HÖR und ATTIN 2005).

Um die Ungenauigkeiten durch die Polarisierung an der Messinstrumentenspitze zu beseitigen, ersetzte SUNADA (1969) die Gleich- durch eine Wechselstromquelle (2. Generation). Mit steigender Frequenz nimmt dabei der Einfluss der Polarisierungsprozesse an der Elektrode ab.

Im Wechselstromkreis tritt an die Stelle des elektrischen Widerstands die Impedanz (Z), welche sich aus ohmschem (R_{Ω}) und kapazitivem Widerstand ($X_c = \text{Scheinwiderstand}$) zusammensetzt:

$$Z = \sqrt{(R_{\Omega}^2 + X_c^2)}$$

Im Gegensatz zum ohmschen Widerstand ist der kapazitive Widerstand von der Frequenz abhängig, und zwar umgekehrt proportional. Er kann daher bei hohen Messfrequenzen vernachlässigt und der ohmsche Gewebewiderstand direkt abgelesen werden (BREUER 2000).

In Versuchsaufbauten konnten Geräte mit dieser Technik in trockenen Wurzelkanälen eine Treffsicherheit von 83-94% erzielen (BLANK et al. 1975, LECHNER et al. 1973, PLANT et al. 1976).

Jedoch führte auch bei den Geräten der zweiten Generation Flüssigkeit im Wurzelkanal, die als Ionenleiter wirkt, zu einer falsch festgelegten Arbeitslänge (HÖR und ATTIN 2001).

Denn im flüssigkeitsgefüllten Wurzelkanal baut sich im Wechselstromkreis beim Übergang von der Instrumentenspitze zu der sie umgebenden Flüssigkeit die so genannte Elektrodenimpedanz auf. Dabei handelt es sich um einen Wechselstromwiderstand zwischen metallischem und ionischem Leiter. Gemessen wird somit eine Gesamtimpedanz (Z), die sich aus der Elektrodenimpedanz (Z_E) und der Gewebeimpedanz (Z_G) zusammensetzt:

$$Z = Z_G + Z_F = \sqrt{(R\Omega G^2 + XCG^2)} + \sqrt{(R\Omega E^2 + XCE^2)}$$

Die gesuchte Gewebeimpedanz allein ist aus der Gesamtimpedanz nicht zu ermitteln (HÖR und ATTIN 2001).

Sind die desmodontalen Fasern auf Grund von pathologischen Veränderungen an der Wurzelspitze zerstört oder ist das Wurzelwachstum noch nicht abgeschlossen, sind nach den oben beschriebenen Verfahren der 1. und 2. Generation generell keine Messungen möglich (HELLWIG et al. 2003).

Auf Grund der meist schwer zu eliminierenden Feuchtigkeit im Kanal waren die Geräte nach dem Ansatz von SUNADA (1962) nur selten für den praktischen Einsatz nutzbar. Deshalb wurden auf Grundlage der bisher gewonnenen Erkenntnisse die Geräte der dritten Generation entwickelt. Das Messprinzip beruht hierbei nicht mehr auf dem Kontakt der Instrumentenspitze mit dem Desmodont, sondern auf der sich an der Instrumentenspitze ändernden

Elektrodenimpedanz beim Passieren der natürlichen Konstriktion (VOSS und SIEBENKEES 1994).

Der Vorteil gegenüber der zweiten Generation liegt darin, dass Flüssigkeit bei der Messung kein Problem mehr darstellt, ja Flüssigkeit als Elektrolyt sogar notwendig ist.

Das Messprinzip basiert auf der Tatsache, dass bei zwei verschiedenen Frequenzen (f_1 , f_2) auf Grund der Frequenzabhängigkeit der kapazitiven Komponenten (R_{CG} und R_{CE}) zwei verschiedene absolute Gesamtimpedanzen (Z_1 , Z_2) gemessen werden können. Die Elektrodenimpedanz ist stärker von der Frequenz der Wechselstromquelle abhängig als die Gewebeimpedanz. Die zwei gemessenen Gesamtimpedanzen (Z_1 , Z_2) werden mittels Differenzbildung oder Quotientenbildung in Relation gestellt, um die Elektrodenimpedanz (Z_E) zu berechnen (HÖR und ATTIN 2001).

Die errechnete Elektrodenimpedanz gilt auf Grund folgender Überlegungen zu den elektrophysikalischen Vorgängen an der Instrumentenspitze als Messgröße zur Ermittlung der Arbeitslänge:

Intrakanalär ist die Elektrodenimpedanz wegen der Isolation durch die Kanalwand groß und abhängig von der Wurzelkanalquerschnittsfläche. Ein Stromfluss in den periapikalen Raum ist nur durch die Querschnittsfläche des Wurzelkanals über die im Kanal befindliche Flüssigkeit möglich.

Die Elektrodenimpedanz wird hierbei stark durch die apikale Konstriktion beeinflusst. Der kleinste Wurzelkanalquerschnitt bedingt hier den größten ohmschen und kapazitiven Widerstand. Mit zunehmendem Vorschub wird sie dann schlagartig kleiner. Nach der apikalen Konstriktion vergrößert sich nämlich die aktive Elektrodenoberfläche, weil jetzt die Isolation durch die Kanalwand fehlt (HÖR und ATTIN 2001).

Das Dentin der Kanalwand stellt keinen absoluten Isolator dar. Deshalb ist nach VOSS und SIEBENKEES (1994) mit den Geräten dieses Messverfahrens lediglich ein Punkt im Bereich zwischen Foramen physiologicum und Foramen

apicale bestimmbar. Je leitfähiger die Kanalwand, desto weiter liegt dieser Punkt in Richtung Foramen apicale.

Stellvertretend für die Endodontiegeräte der dritten Generation ist das von YAMAOKA (1989) entwickelte Apit (Osada Electronics, Tokyo, Japan) zu nennen, das die Differenz aus den gemessenen Impedanzen errechnete. Der Nachteil des Gerätes lag darin, dass es einige Millimeter vor dem Apex im Kanal kalibriert werden musste.

Diese Kalibrierung entfällt bei den Geräten der vierten Generation durch die Verwendung von Mikroprozessoren zur Berechnung der ermittelten Werte. Außerdem arbeiten diese Geräte mit der Ermittlung des Impedanzenquotienten nach KOBAYASHI (1992). Als Beispiel sei hier das Root ZX (J.Morita Corporation, Tokyo, Japan) zu nennen.

Da das Desmodont nicht mehr als Referenzgewebe zur Widerstandsmessung dient, können auch Zähne mit entzündlichen apikalen Veränderungen bzw. noch nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum endometrisch vermessen werden (HÖR und ATTIN 2001).

Allerdings liegen auch hier eindeutige Werte stets in einem Bereich zwischen der apikalen Konstriktion (Foramen physiologicum) und dem Foramen apikale. Eine weitere Verbesserung der Messgenauigkeit kann nach HÖR (2005) nur noch empirisch über eine Kalibrierung der Geräteanzeige an einer großen Anzahl extrahierter Zähne in vitro erfolgen. Eine entsprechende Kalibrierung wurde für das Messgerät Raypex 5 (VDW, München, Deutschland) an über 300 Wurzelkanälen vorgenommen.

Eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Endometrie ist im Gerät EndoPilot (Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt, Deutschland) realisiert. Das Gerät nutzt zur endometrischen Messung weder das Impedanzdifferenz- noch das Impedanzquotienten-Verfahren, sondern eine Spannungssprungfunktion.

Dem Messverfahren liegt die Auswertung eines Sprungsignals zugrunde. Ein rechteckiges Eingangssignal wird beim Einführen des Instruments in den Kanal

verformt (Abb. 7). Das Maß der Verformung wird als Annäherung an den Apex aufgefasst (HERSTELLERANGABEN 2008).

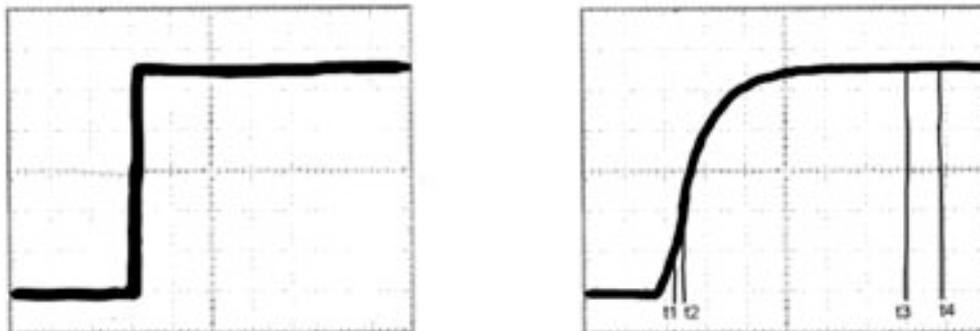


Abb. 7: „Rechteckiges“ und „Verformtes“ Eingangssignal (Herstellerabbildung 2008)

Das Messverfahren wurde 2006 zum Patent angemeldet. Es liegen noch keine veröffentlichten Studien vor.

Die nachfolgende Grafik (Abb. 8) zeigt die schon im Text beschriebene Entwicklung der Endometriegeräte bis zur fünften Generation.

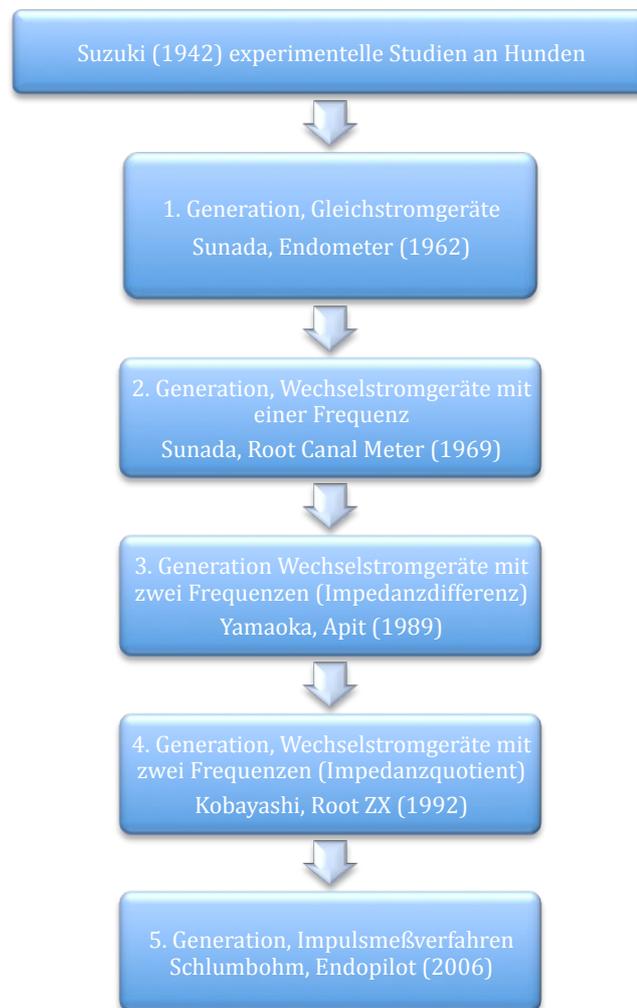


Abb. 8: Übersicht über die Entwicklung der Endometriegeräte

Mögliche Fehlerquellen bei der Messung stellen Seitenkanäle dar, die vom Gerät als Foramen apikale interpretiert werden können (Kurzschlussstrom). Die Aufbereitung würde dann zu weit koronal enden. Ein Kurzschlussstrom kann auch durch eine Metallfüllung oder ionische Flüssigkeit entstehen, wenn diese eine leitende Verbindung zwischen Pulpenkavum und Mundschleimhaut schafft. Die Verwendung eines Kofferdams mindert das Risiko (HÖR und ATTIN 2001).

GALLER (2002) führte eine in vivo Studie durch, welche die Messgenauigkeit der vierten Generation endometrischer Messgeräte unter Praxisbedingungen klären sollte. Zur Extraktion vorgesehene Zähne wurden endometrisch vermessen, bis die Geräte die apikale Konstriktion anzeigten. Nach der

Extraktion wurde der apikale Teil des Wurzelkanals mit einer Trennscheibe eröffnet, das Messinstrument reponiert und die Lage der Instrumentenspitze mit der tatsächlichen Lokalisation der apikalen Konstriktion verglichen (Abb. 9). Die Strecken wurden mit einer Genauigkeit von 0,5 mm gemessen (GALLER 2002).



Abb. 9: Der apikale Teil des Wurzelkanals ist eröffnet. Links ohne, rechts mit reponiertem Messinstrument nach GALLER (2002)

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 1) gibt einen Aufschluss über die erzielten Ergebnisse.

| | Root ZX n = 34 | Endy n = 31 | Justy II n = 35 |
|------|---------------------------|------------------------|----------------------------|
| <=-2 | 0,00% | 0,00% | 2,90% |
| -1,5 | 0,00% | 0,00% | 2,90% |
| -1 | 0,00% | 3,20% | 8,60% |
| -0,5 | 14,70% | 16,10% | 25,70% |
| 0 | 47,10% | 19,40% | 48,50% |
| 0,5 | 14,70% | 45,20% | 5,70% |
| 1 | 17,70% | 3,20% | 0,00% |
| 1,5 | 2,90% | 9,70% | 5,70% |
| >=2 | 2,90% | 3,20% | 0,00% |

Tab. 1: Differenzen zwischen endometrisch bestimmter und tatsächlicher Länge vom koronalen Referenzpunkt zur apikalen Konstriktion nach GALLER (2002)

Wertet man nur die Messungen als erfolgreich, die den physiologischen Apex direkt lokalisiert haben, so ergeben sich für das Root ZX (J.Morita Corporation, Tokyo, Japan) 47 %, für Endy (Fa. Loser, Leverkusen, Deutschland) 19 % und für Justy II (Hager und Werken, Duisburg, Deutschland) 49 % als Erfolgsquote.

Auf Grund der Erfolgsraten von teilweise über 90% (GULDNER und LANGELAND 1993, INGLE 1957) in der Endodontie wird von einigen Autoren angenommen, dass sich ein leichtes Abweichen von der idealen Arbeitslänge wegen der Regenerationsfähigkeit der apikalen Region klinisch nicht unbedingt auswirken muss. Da es allerdings durch Über- oder Unterinstrumentierung auch zu Folgeschäden kommen kann, erscheint einigen Autoren eine Akzeptanz des Grenzbereiches von +/- 0.5 mm um das physiologische Foramen sinnvoll (KIM und LEE 2004, WRBAS 2007). So befindet sich für das Root ZX ein prozentualer Anteil von 77 %, das Endy zeigt 81 % und das Justy II 80 % im Erfolg versprechenden Bereich (GALLER 2002).

HÖR et al. (2005) führten eine in vitro Studie an 193 Wurzelkanälen durch. Sie verglichen das Gerät Justy II (Hager und Werken, Duisburg, Deutschland) mit dem Raypex 4 (VDW, München, Deutschland). Untersucht wurde jeweils die Lage der Instrumentenspitze bei der Geräteanzeige „1 vor Apex“ „0,5 vor Apex“ und „Apex“. Sie spannten die Zähne in eine eigens dafür konstruierte Apparatur ein, die es ermöglichte, bei einer endometrischen Messung das Instrument in den Kanal einzuführen und dabei gleichzeitig die Eindringtiefe zu registrieren (Abb. 10). Eine Umdrehung des Drehrades für die Instrumentenabsenkung entsprach 1mm Absenkung. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau (HÖR et al. 2005).

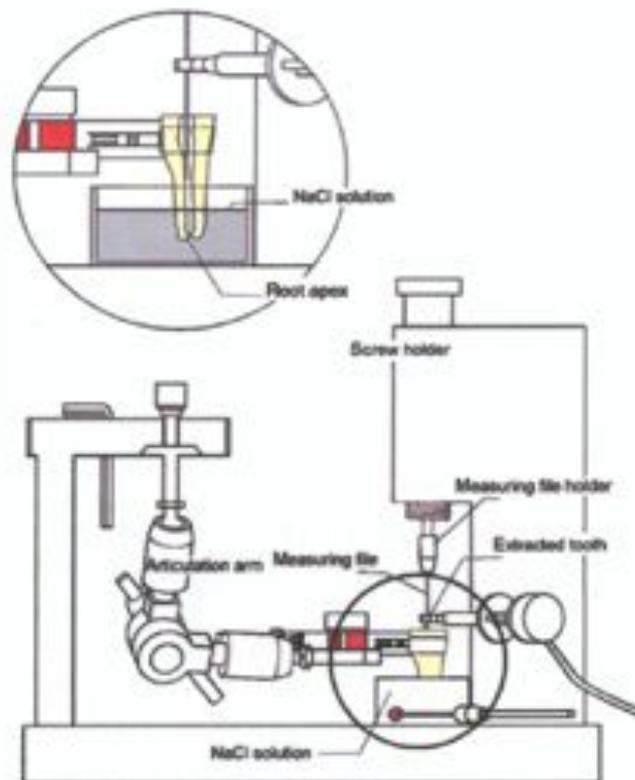


Abb. 10: Messapparatur zur endometrischen Längenbestimmung bei gleichzeitiger Registrierungsmöglichkeit für die Eindringtiefe des Aufbereitungsinstruments nach HÖR et al. (2005)

193 Wurzelkanäle wurden nacheinander mit den beiden Geräten endometrisch vermessen. Notiert wurden jeweils die Eindringtiefen bei den verschiedenen Geräteanzeigen („1 vor Apex“ „0,5 vor Apex“ und „Apex“). Bei der jeweils letzten Messung einer Messreihe wurde die Feile im Wurzelkanal mit Kunststoff fixiert. Die tatsächliche Position der Feilenspitze bei der letzten Messung wurde dann, nach dem Freilegen des apikalen Wurzelkanalanteils, unter dem Mikroskop ermittelt.

Aus den Relationen zwischen den Eindringtiefen bei den vorangegangenen Messungen ließ sich dann die Lage der Feilenspitze bei allen Messungen einer Messreihe errechnen.

Zwei Kriterien wurden ausgewertet und in die Kategorien „Erfolg“ und „kein Erfolg“ eingeteilt:

- Erstens die Position der Feilenspitze in Relation zum Foramen physiologicum. Als Erfolg wurde gewertet, wenn das Foramen physiologicum exakt ermittelt wurde.
- Zweitens die Position der Feilenspitze im Intervall zwischen dem Foramen physiologicum und dem Foramen apicale. Befand sich die Instrumentenspitze im entsprechenden Intervall, galt dies als erfolgreiche Messung.

Die zwei nachfolgenden Diagramme (Abb. 11 und Abb. 12) zeigen die Ergebnisse der Auswertung.

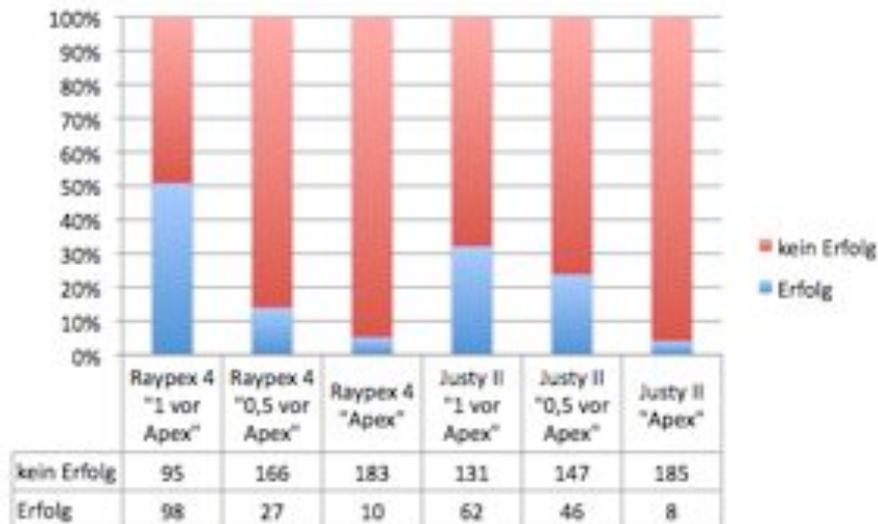


Abb. 11: Position der Feilenspitze zum physiologischen Foramen nach HÖR et al. (2005)

Die Autoren sahen ihre These bestätigt, dass die exakte Position des Foramen physiologicum, gleichgültig welcher Geräteanzeige, in einer hohen Prozentzahl nicht exakt ermittelt werden kann.

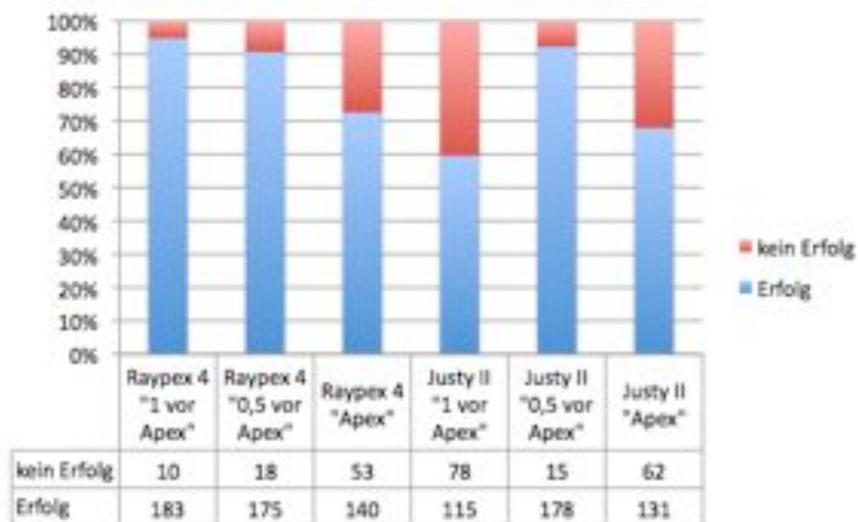


Abb. 12: Position der Feilenspitze zwischen physiologischem und anatomischem Foramen nach HÖR et al. (2005)

Zeigte das Gerät Raypex 4 den Wert „1 vor Apex“ an, befand sich die Instrumentenspitze in 95% der Fälle im Bereich zwischen Foramen physiologicum und Foramen apicale. Die Instrumentenspitze lag bei dieser Anzeige in keinem Fall hinter dem Foramen apicale, also außerhalb des Zahnes. Wenn das Gerät Justy II „0,5 vor Apex“ anzeigte, befand sich die Instrumentenspitze in 92% der Fälle im definierten Intervall. Allerdings lag die Instrumentenspitze auch in 2 Fällen außerhalb des Zahnes.

Die Autoren zogen das Fazit, dass mit den modernen Endometriegeräten zuverlässig eine Position zwischen Foramen physiologicum und Foramen apicale gefunden werden kann (HÖR et al. 2005).

WRBAS et al. (2007) untersuchten in vivo das Nachfolgemodell von VDW, das Gerät Raypex 5 (VDW, München, Deutschland), und das Root ZX (J.Morita Corporation, Tokyo, Japan). Bei 15 unterschiedlichen Patienten wurden 20 einwurzelige Zähne endometrisch vermessen, bis das Gerät jeweils die apikale Konstriktion anzeigte. Die Messungen mit den beiden Geräten erfolgten hintereinander an den gleichen Zähnen. Nach der Messung wurde die Feile jeweils in der ermittelten Position mit Kunststoff fixiert, so dass die Feile samt Kunststoff wieder aus dem Zahn entfernt und später wieder reponiert werden konnte. Im nächsten Schritt wurden die Zähne extrahiert und die apikalen 4 mm

des Wurzelkanals mit diamantierten Schleifkörpern und einem Skalpell freigelegt. Die Feilen der Messreihen wurden reponiert und jeweils die eröffnete apikale Region durch ein Lichtmikroskop fotografiert. Die digitalen Bilder wurden am Computer vermessen. Es wurden zwei Kriterien ausgewertet:

- Die Lage der Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum
- Die Lage der Instrumentenspitze zum Foramen apicale

Die zwei nachfolgenden Diagramme (Abb. 13 und Abb. 14) zeigen die Ergebnisse zu den beiden untersuchten Kriterien. Negative Werte entsprechen einer Feilenspitzenposition vor der entsprechenden anatomischen Struktur, positive Werte einer Position dahinter.

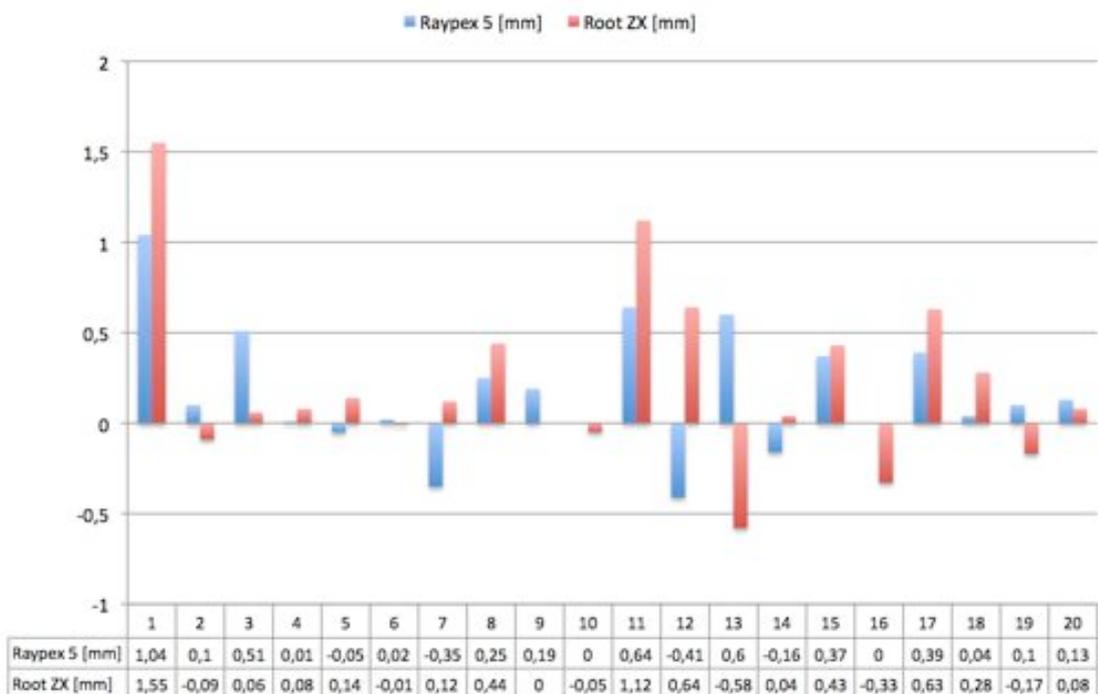


Abb. 13: Entfernung der Feilenspitze zum Foramen physiologicum nach WRBAS et al. (2007)

Die mittlere Distanz zwischen Feilenspitze und Foramen physiologicum betrug beim Raypex 5 $+0,17 \pm 0,35$ mm und beim Root ZX $+0,22 \pm 0,49$ mm, d.h. im Mittel in einer Position hinter dem physiologischen Foramen.

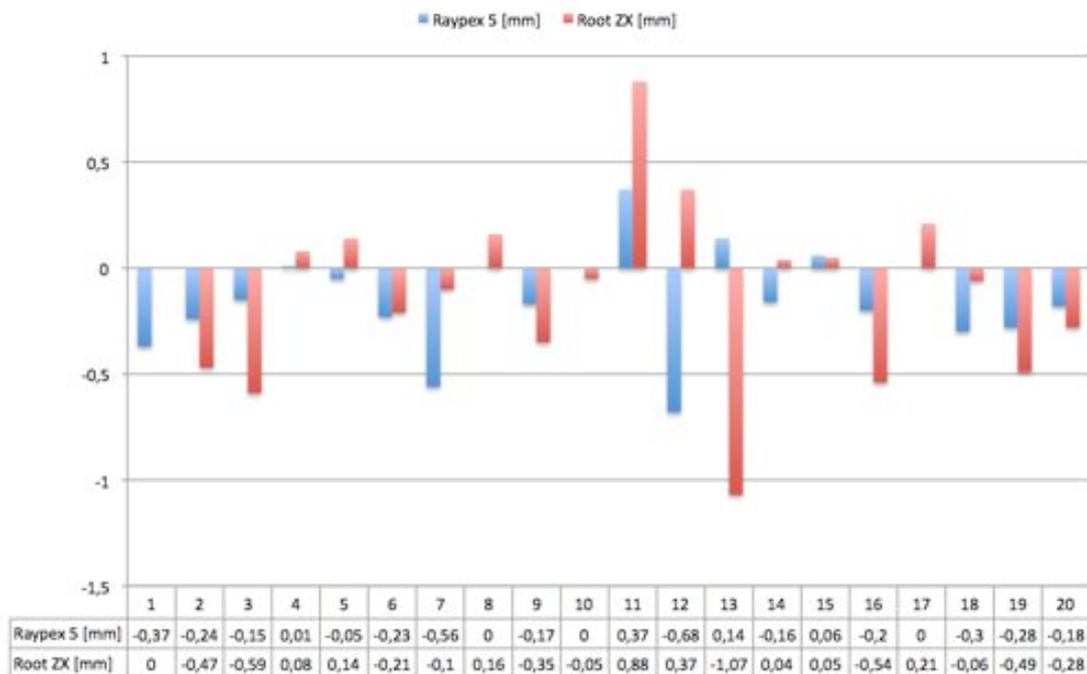


Abb. 14: Entfernung der Feilenspitze zum Foramen apicale nach WRBAS et al. (2007)

Die mittlere Distanz zwischen Feilenspitze und Foramen apicale betrug beim Raypex 5 $-0,15 \pm 0,24$ mm und beim Root ZX $-0,12 \pm 0,41$ mm, also einer Position kurz vor dem Foramen apikale.

In acht Fällen beim Root ZX und in vier Fällen beim Raypex 5 passierte jedoch die Feilenspitze das Foramen apicale, befand sich also außerhalb des Zahnes. Bis auf eine Ausnahme beim Root ZX lagen die Überschreitungen im Bereich von weniger als 0,5 mm.

Nach beiden untersuchten Kriterien konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geräten nachgewiesen werden.

Die Autoren empfahlen nach ihren Beobachtungen in der klinischen Anwendung von der bestimmten Arbeitslänge 0,5 mm abzuziehen, um ein Überinstrumentieren zu verhindern (WRBAS et al. 2007).

Trotz der Fortschritte in der Endometrie behält die Röntgentechnik weiterhin ihren Stellenwert. Durch die kombinierte Anwendung beider Techniken kann eine genauere Annäherung an den apikalen Endpunkt der

Wurzelkanalbehandlung erzielt werden (GALLER 2002, HÖR 2006, LUCK 1999).

BARGHOLZ (2006) empfiehlt eine endometrische Arbeitslängenbestimmung durchzuführen und anschließend die ermittelte Länge durch eine Röntgenmessaufnahme zu kontrollieren. Seiner Meinung nach stellt die Endometrie derzeit die sicherste Methode der Arbeitslängenbestimmung dar. Allerdings sollte auf die Zusatzinformationen der Röntgenaufnahme nicht verzichtet werden.

2.3 Aufbereitung des Wurzelkanalsystems

Der von der Pulpa eingenommene Raum ist ein Wurzelkanalsystem. Besonders im apikalen Bereich erhöht sich die Anzahl der vom Hauptkanal abgehenden Seitenkanälchen. Auf Grund von Lage, Verlauf und Durchmesser ist es nicht möglich, alle verzweigten Seitenkanälchen instrumentell aufzubereiten (GULDENER und LANGELAND 1993).

Der Beirat „Endodontologie“ der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ) definierte 2006 in einer Stellungnahme - im Einklang mit den Qualitätsrichtlinien der Europäischen Gesellschaft für Endodontologie (ESE) - folgende Ziele für die Aufbereitung der Wurzelkanäle:

- Entfernung des vitalen oder nekrotischen pulpalen Weichgewebes sowie des infizierten Wurzelkanalodontins,
- Gewährleistung einer intensiven chemischen Desinfektion (Wurzelkanalspülung) des endodontischen Systems,
- Präparation einer geeigneten Form des Wurzelkanals zur Aufnahme des definitiven Füllmaterials,
- Vermeidung der Schädigung oder Kontamination des periradikulären Gewebes (Überinstrumentierung).

Die zum Erreichen dieser Ziele unerlässliche mechanische Wurzelkanalaufbereitung kann sowohl mit hand- als teilweise auch mit maschinengetriebenen Instrumenten erreicht werden.

Die ersten Wurzelkanalaufbereitungsinstrumente wurden Mitte des 19. Jahrhunderts von Edward Maynard (1813-1891) entwickelt. Er feilte sie aus Uhrfedern aus ungetempertem Stahl (BAUMANN 2002). Die Serienproduktion von Endodontieinstrumenten zur Kanalaufbereitung begann um 1870, wobei Gold- und Klavierdraht und später, etwa bis 1960, Kohlenstoff-Stähle verwendet wurden (MARHEINE 2006).

Seit 1974 unterliegen die Handinstrumente einer ISO-Normierung; diese legt Symbole, Farben, Form, Durchmesser und Konus für verschiedene Instrumente fest (Abb. 15). Der schneidfähige Bereich ist nach ISO-Standard stets 16 mm lang. Die ISO-Größe bezeichnet den Durchmesser an der Spitze eines Instruments. Ein Instrument der ISO-Größe 35 hat an der Spitze einen Durchmesser von 0,35 mm (GULDENER und LANGELAND 1993).

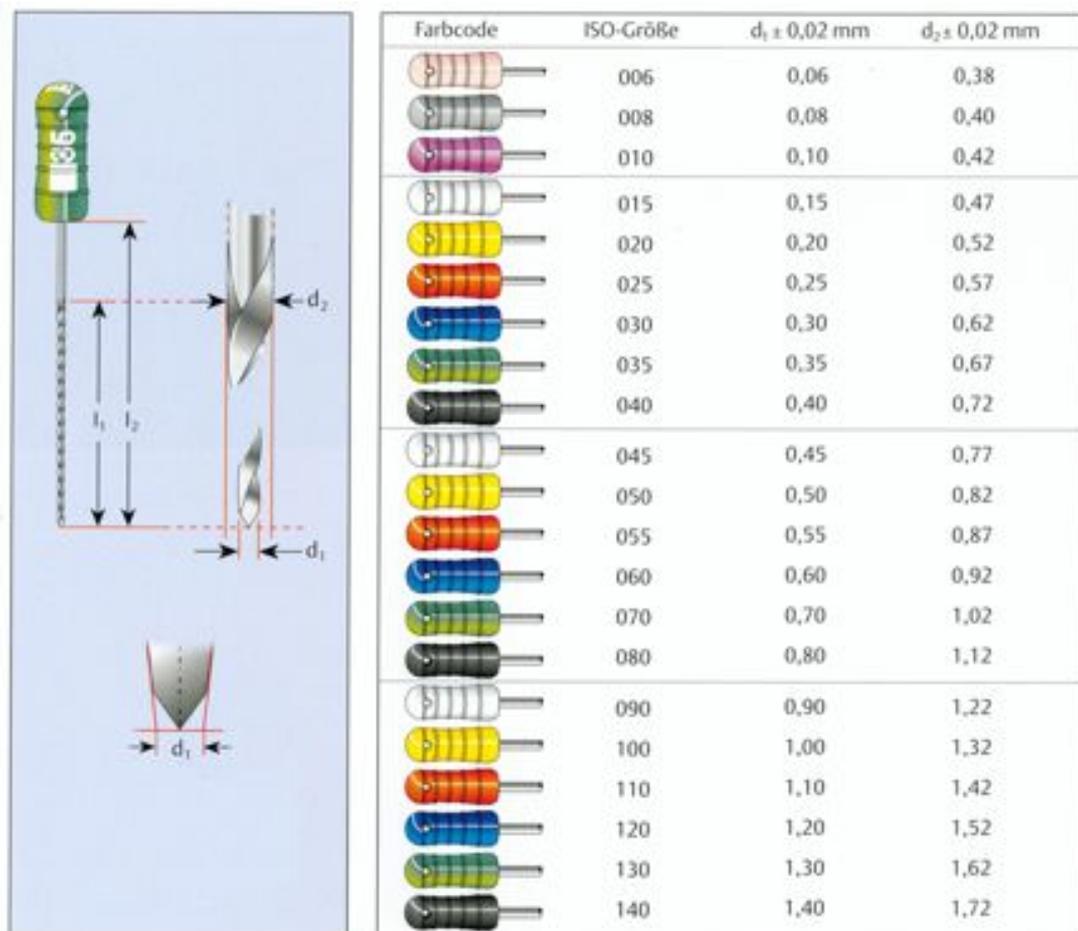


Abb. 15: Übersicht über die ISO-Standardisierung bei Handinstrumenten. Der schneidfähige Bereich (l_1) ist stets 16 mm lang, die Gesamtlänge (l_2) von der Spitze bis zum Griff variiert. Angegeben ist der Durchmesser an der Spitze (d_1) und am Ende des Arbeitsteils (d_2) nach WOLF (2007)

Heute werden als Werkstoffe für Endodontieinstrumente Edelstahl und Nickel-Titan-Legierungen verwendet. Nickel-Titan-Legierungen wurden 1988 durch WALIA für die rotierende Aufbereitung gekrümmter Kanäle eingeführt. Sie werden mittlerweile auch zunehmend für die Herstellung von Handinstrumenten verwendet (BARGHOLZ 2006). Die Legierung besteht zu ungefähr gleichen Teilen aus Nickel und Titan. Die Schneidleistung von Handinstrumenten aus Nickel-Titan wird von TEPEL und SCHÄFER (1996) mit 40% geringer angegeben als die von Edelstahlinstrumenten. Begründet wird dies durch eine geringere Härte.

Zu den klassischen Formen der Handinstrumente (Abb. 16) gehören Kerr-Reamer (1), Kerr-Feile (2) und Hedström-Feile (3).

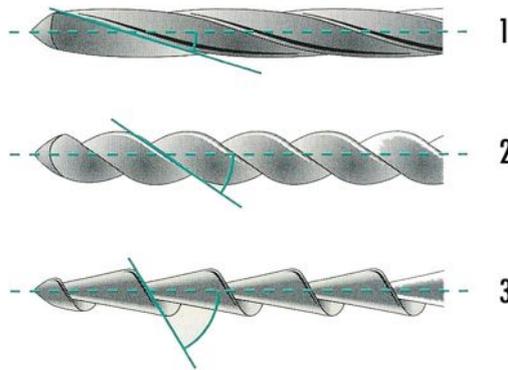


Abb. 16: Grundformen der Handinstrumente nach HELLWIG (2003)

Die Arbeitsweise der Instrumente ergibt sich aus dem jeweiligen Tangentialwinkel, dem Winkel zwischen Längsachse und Schneidkante: Der Kerr-Reamer (10° - 30°) wird drehend, die Kerr-Feile (25° - 40°) drehend und schabend, die Hedström-Feile (60° - 65°) ausschließlich schabend eingesetzt (HELLWIG 2003).

Kerr-Reamer und Kerr-Feile weisen einen drei- oder viereckigen Querschnitt auf und unterscheiden sich in der Anzahl der Windungen pro Längeneinheit: Reamer haben 1- 2 Windungen pro 1 mm Instrumentenlänge, Kerr-Feilen dagegen 2,5 (BARGHOLZ 2006). Dreikantige Instrumente weisen eine höhere Schneidleistung, einen größeren Spanraum und eine höhere Flexibilität auf, wohingegen vierkantige Instrumente bruchsicherer sind (HELLWIG 2003).

Unter den drei Grundtypen haben Hedström-Feilen die größte Schneidleistung und den größten Spanraum, aber auch den kleinsten Kerndurchmesser, was zu einer höheren Bruchanfälligkeit führt (BARGHOLZ 2006).

Die Fertigung der Handinstrumente kann einerseits durch Verdrillung eines entsprechenden Profils, andererseits durch Fräsung aus einem Rohling erfolgen.

Reamer und Kerr-Feilen aus Edelstahl lassen sich auf beide Arten herstellen, wobei die gedrehten Instrumente eine höhere Flexibilität und eine geringere Bruchneigung aufweisen. Sie sind deshalb als qualitativ hochwertiger anzusehen (BARGHOLZ 2006).

Edelstahl Hedström-Feilen und alle Nickel-Titan-Instrumente lassen sich nur durch Fräsung herstellen. Dies ist bei den Hedström-Feilen durch die Form bedingt. Bei Nickel-Titan-Werkzeugen liegt es am Memory-Effekt des Materials: Das Metall ist in der Lage, eine auf Kristallgitterumwandlung beruhende plastische Deformation durch Rückumwandlung der Kristallstruktur aufzuheben (BARGHOLZ 2006). Deshalb ist eine Verdrillung, wie sie bei Edelstahlinstrumenten angewandt werden kann, bei Nickel-Titan-Instrumenten nicht zu erzielen.

Das Verhalten, das diesem Werkstoff den Memory-Effekt ermöglicht, wird als Pseudoelastizität bezeichnet. Beim Erreichen einer geringen Elastizitätsgrenze wandelt sich die Kristallgitterstruktur von der Austenit- zur Martensit-Phase um. Da während der Umwandlung jedes Atom sein Nachbaratom beibehält, spricht man auch von einer diffusionslosen Phasenumwandlung. In dieser sogenannten Transformationsphase kann bei fast konstanter Belastung eine deutliche Dehnung des Metalls erfolgen (BARGHOLZ 2006). Anschließend ist eine Rückstellung in die Ausgangsform ohne sichtbare Deformation möglich (GRESSMANN und HÜLSMANN 2001).

Die gleichmäßige, schwach elastische Rückstellkraft des Materials erleichtert die Einhaltung des ursprünglichen Kanalverlaufs bei der Bearbeitung gekrümmter Kanäle (BARGHOLZ 2006, GAMBEL und HÜLSMANN 2003).

Diese Eigenschaft führte ab 1988 zur Etablierung von Nickel-Titan bei maschinellen Aufbereitungssystemen.

Edelstahlinstrumente hatten sich für die maschinelle Aufbereitung nicht bewährt, da es wegen des hohen Elastizitätsmoduls häufig zu Aufbereitungsfehlern im Sinne eines Trichters („zip“), eines Isthmus („elbow“),

einer Stufe („ledge“) und / oder einer Kanalverlagerung („transportation“) kam (siehe Abb. 17) (BARGHOLZ 2006, GRESSMANN und HÜLSMANN 2001, GULDENER und LANGELAND 1993). Das Elastizitätsmodul - das Verhältnis zwischen mechanischer Spannung und elastischer Verformung, somit ein direktes Maß für den Widerstand gegen elastische Verformung (MASCHINSKI 2000) beträgt für Nickel-Titan nach WALIA ein Fünftel des Wertes für Chrom-Nickel-Stahlinstrumente (GRESSMANN und HÜLSMANN 2001).

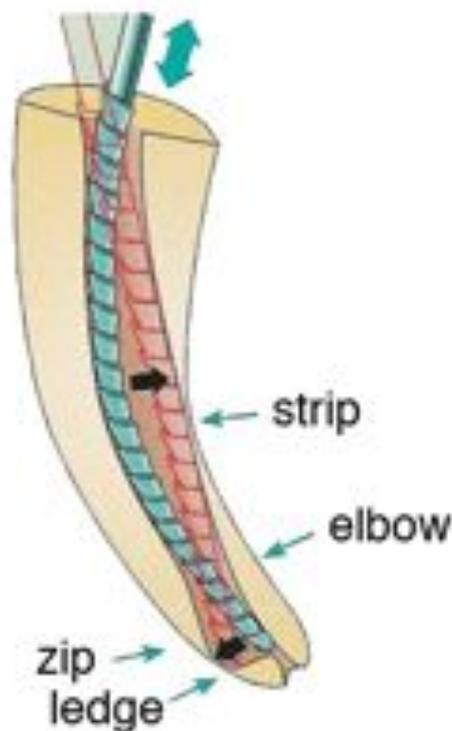


Abb. 17: Die ursprüngliche Kanalkrümmung wird durch die Aufbereitung begradigt. Der Kanal wird mit der Gefahr einer Perforation gestrippt („strip“). Apikal findet eine interne Verlagerung des Kanals mit entsprechender Stufenbildung statt („zip“ mit „ledge“). Am Scheitelpunkt entsteht eine Verengung („elbow“) (nach BARGHOLZ 2006)

Durch die Einführung von Nickel-Titan war die Entwicklung vollrotierender maschineller Systeme möglich.

Die dafür verwendeten Feilensysteme unterscheiden sich in Länge des Arbeitsteils, Konizität und Querschnitt (HELLWIG et al. 2003).

Nach BARGHOLZ (2006) existieren für vollrotierende Instrumente derzeit drei Querschnittsgrundformen (Abb. 18).

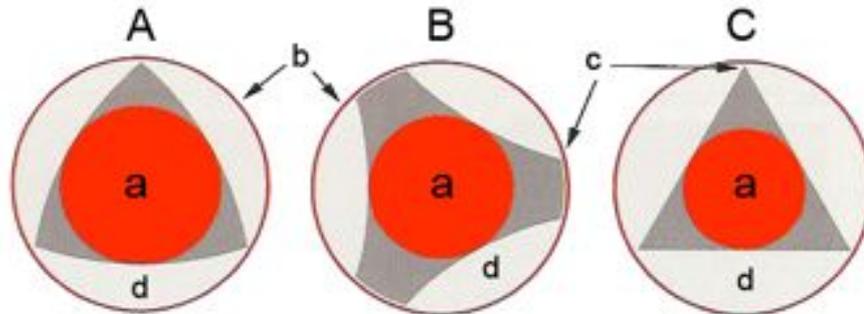


Abb. 18: Grundformen der Querschnitte vollrotierender Instrumente: konvex (A), radial land (B) und Dreieck (C) nach BARGHOLZ (2006)

Die Eigenschaften ergeben sich aus den Parametern Instrumentenkern (a), Arbeitsdurchmesser (b), Schneidekantenwinkel und -anordnung (c) sowie der Größe des Spanraums (d). Der Begriff 'radial lands' bezeichnet Schneidekanten, die als Führungsfläche gestaltet sind (BARGHOLZ 2006).

Alle Systeme haben eine nicht schneidende Führungsspitze. Somit soll ein sicheres, geführtes Erweitern der Wurzelkanäle ermöglicht werden (BARGHOLZ 2006, HELLWIG et al. 2003).

Nach HÖR und ZIRKEL (2006) gibt es bis dato kein Instrumentendesign, welches alle wünschenswerten Eigenschaften besitzt. Jede Form hat ihre individuellen Vor- und Nachteile. Je dicker der Instrumentenquerschnitt (a im Bild oben), desto unanfälliger ist das Instrument gegen eine Torsionsfraktur (Torsion= Verdrehung um die eigene Längsachse). Dafür müssen jedoch ein kleinerer Spanraum und eine geringere Flexibilität in Kauf genommen werden.

Scharfe Schneidekanten ermöglichen einen starken Abtrag, erhöhen aber auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Instrument im Kanal festsetzt. Ungleichmäßig über den Arbeitsteil verlaufende Schneiden (siehe folgende Abbildung) verhindern ein Einschrauben des Instruments in den Kanal, allerdings erlauben sie keinen Abtransport von Spänen während der Aufbereitung. Wird die Schneidekante als Führungsfläche gestaltet (radial

lands), so resultiert eine zentrische Führung des Instruments im Wurzelkanal. Durch die vergrößerten Reibungsflächen kann es jedoch eher zu einer Verklemmung im Kanal kommen (BARGHOLZ 2006).

Stellvertretend für die verschiedenen Gestaltungsformen der Feilen seien drei Feilen unterschiedlicher maschineller Aufbereitungssysteme abgebildet (Abb. 19)

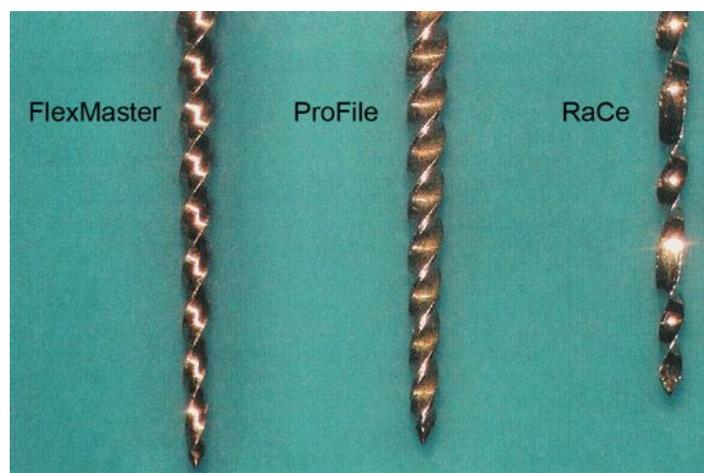


Abb. 19: Instrumente als Beispiel für die drei verschiedenen Querschnittstypen: FlexMaster (konvex), ProFile (radial land) und RaCe (Dreieck) nach BARGHOLZ (2006)

Angetrieben werden die Feilen überwiegend von speziellen Endodontiemotoren. Sie wurden entwickelt, weil es bei den früher verwendeten Mikromotoren mit untersetzten Winkelstücken sehr häufig zu Instrumentenbrüchen durch eine zu hohe Torsionsbelastung kam (GAMBEL und HÜLSMANN 2003).

Die heutigen Endodontiemotoren bieten deshalb, zusätzlich zur Drehzahlkontrolle, die Möglichkeit einer Drehmomentbegrenzung. Damit soll ein Bruch verhindert werden, indem der Antriebsmotor stoppt, sobald ein eingestelltes maximales Drehmoment an der Feile überschritten wird. Einige Geräte zeigen auch mittels Leuchtdioden oder akustischen Signalen an, dass das Lastmoment sich einem kritischen Bereich nähert. Automatisches Umschalten auf Linkslauf oder Rüttelbewegungen (kombinierter Rechts-

Linkslauf) beim Erreichen des vorgegebenen Drehmoments sind Funktionen, die helfen sollen das Festklemmen einer Feile zu verhindern oder eine festgeklemmte Feile wieder zu lösen (BARGHOLZ 2006, HELLWIG et al. 2003).

Einige Geräte bieten zusätzlich die Funktion der Drehmomentreduzierung bei Apex Annäherung. Sie begrenzt die Abriebleistung der Feile und soll somit ein Festsetzen verhindern.

Da die Belastungsparameter, wie oben erläutert, bei den unterschiedlichen Feilenarchitekturen stark variieren, müssen die Geräte individuell auf das verwendete System und die Feilengröße abgestimmt werden. Bei einigen Geräten sind die Kenngrößen für die unterschiedlichen Feilen bereits hinterlegt. Bei anderen Geräten müssen die Werte manuell eingegeben werden.

Um die Bruchgefahr herabzusetzen, wird die Mehrzahl der Nickel-Titan-Systeme außerdem nach dem Crown-down-Verfahren eingesetzt. Im Vergleich zur klassischen Methode nach INGLE (1961), bei der der Wurzelkanal in voller Arbeitslänge mit Instrumenten aufsteigender Größe bearbeitet wird (GULDENER und LANGELAND 1993), erfolgt die Aufbereitung bei dieser Technik zunächst koronal, dann apikal. Weil jeweils nur ein Teil der Kanalwand bearbeitet wird, ergibt sich eine geringere Belastung der Instrumente (GRESSMANN und HÜLSMANN 2001).

“Die Aufbereitung des Wurzelkanals ist durch die Ablösung des etwa ein Jahrhundert bevorzugten Werkstoffs Edelstahl für Wurzelkanalinstrumente durch Nickel-Titan (...) revolutioniert worden und hat weltweit für einen qualitativen Schub auf breiter Basis gesorgt. Die Aufbereitung auch ehemals schwieriger Kanalkrümmungen ist vorhersagbar besser, sauberer und effektiver geworden.” (BAUMANN 2002)

Studien über den Einsatz von Nickel-Titan-Systemen bei der maschinellen Aufbereitung mit 360° rotierenden Instrumenten ergaben, dass sich eine formgetreue Erweiterung bei gekrümmten Wurzelkanälen erreichen lässt (SCHADE 1999, THOMPSON und DUMMER 2000, VERSÜMER 1999).

MARHEINE (2006) verglich die Aufbereitungsfehler unerfahrener Behandler bei Anwendung verschiedener Instrumente und Methoden. Es zeigte sich, dass mit Nickel-Titan-Aufbereitung (manuell und maschinell) bessere Ergebnisse erzielt wurden (Abb. 20). Außerdem war ein signifikanter Zeitvorteil bei der maschinellen Aufbereitung zu verzeichnen.

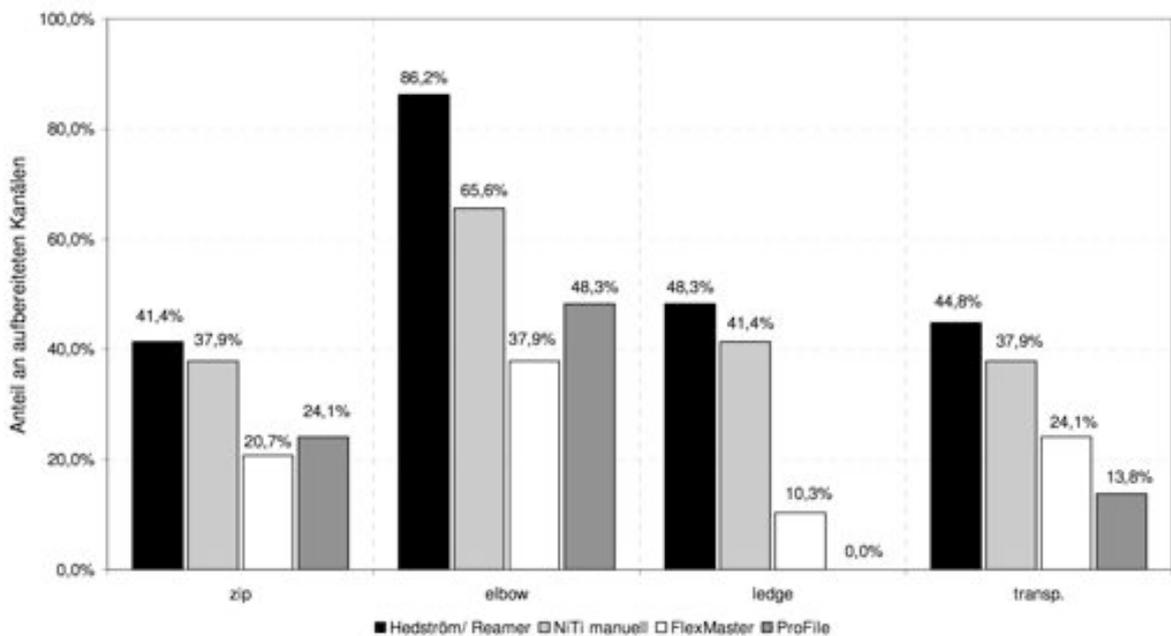


Abb. 20: Prozentualer Anteil aufbereiteter Kanäle, welche die Formveränderungen Zip, Elbow, Ledge oder Transportation nach Bearbeitung aufwiesen, dargestellt nach Aufbereitungsart nach MARHEINE (2006)

DELSCHEN (2006) kam in seiner Studie mit ungeübten Behandlern zu dem Ergebnis, dass es bei der maschinellen Aufbereitung im Vergleich zur Handaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten zu deutlich weniger Aufbereitungsfehlern kam (Abb. 21).

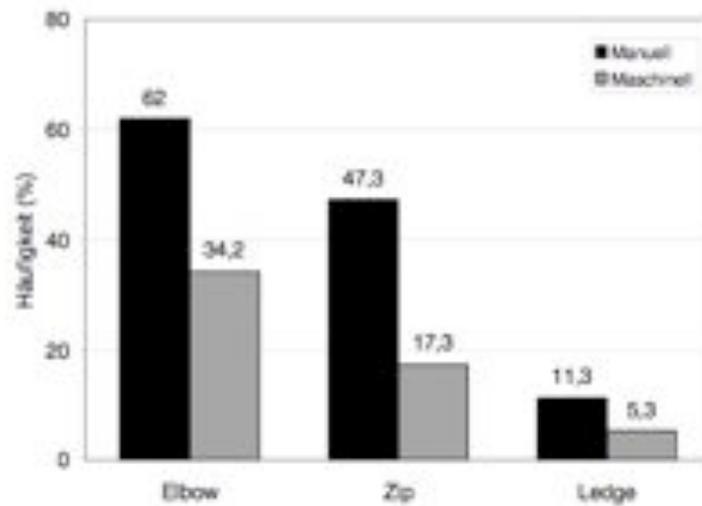


Abb. 21: Prozentuale Verteilung von Elbow-, Zip- und Legde- Konfigurationen bei der manuellen und maschinellen Wurzelkanalaufbereitung nach DELSCHEN (2006)

Außerdem untersuchte er die Aufbereitungslänge (Abb. 22). Zwar befanden sich nach maschineller Aufbereitung 68% der Masterpoints in korrekter Lage zum Foramen apikale (0-2 mm), allerdings wurden 18% zu lang aufbereitet (DELSCHEN 2006).

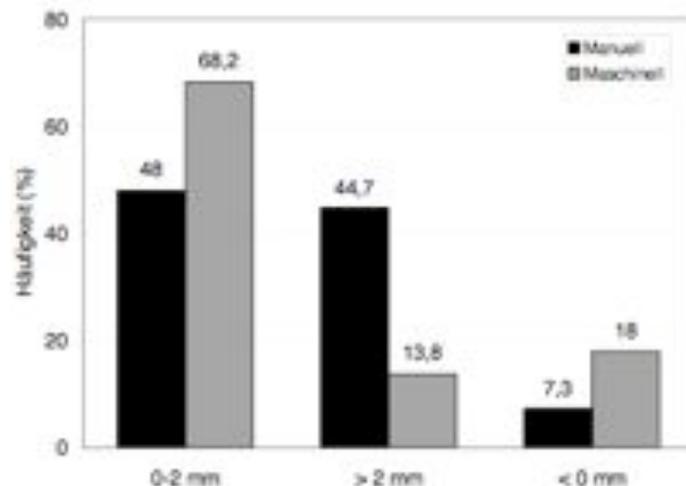


Abb. 22: Verteilung der Aufbereitungslänge in 3 Kategorien nach der Distanz des Masterpoints zum Foramen apikale nach DELSCHEN (2006)

Nach GRESSMANN und HÜLSMANN (2001) kommt es bei der Verwendung von Stahlfeilen häufig zu Kanalbegradigung, Zip- und Elbow-Effekt, Stufenbildung und gelegentlich sogar zur Perforation. Derartige Probleme

würden bei der Verwendung von Nickel-Titan-Systemen in der Regel nicht oder in geringerem Umfang auftreten. Auch SCHÄFER et al. (2004) kamen zu dem Ergebnis, dass es bei maschineller Aufbereitung mit dem Nickel-Titan-Flexmastersystem im Vergleich zu der manuellen Aufbereitung mit Edlestahlinstrumenten zu signifikant weniger Kanalbegradigungen bei geringerem Zeitaufwand kommt.

Der Indikationsbereich für die maschinelle Aufbereitung mit Nickel-Titan-Systemen beschränkt sich allerdings auf runde Kanalquerschnitte. Auf Grund ihrer hohen Flexibilität können die Instrumente nur unzureichend in die bukkalen und lingualen Wölbungen von Kanälen mit schlitzförmigem oder ovalem Querschnitt gepresst werden. Diese Ausläufer sollten manuell mit Stahlfeilen nachgearbeitet werden (GRESSMANN und HÜLSMANN 2001).

Bei der maschinellen Aufbereitung kommt es zu einem Verlust der Taktilität (HELLWIG et al. 2003). Zudem verdeckt der Kopf des Winkelstücks oftmals die Sicht auf den Stopper bzw. die Markierung auf dem Instrument, was ein exaktes Einhalten der Arbeitslänge verhindern kann, mit der Folge möglicher Über- oder auch Unterinstrumentierung.

2.4 Kombination aus maschineller Aufbereitung und Endometrie

Zur Lösung der oben genannten Problematik der Einhaltung der Arbeitslänge wurden Endodontiegeräte entwickelt, welche die maschinelle Aufbereitung mit der endometrischen Messung kombinieren.

Geräte dieser Bauart sollen nicht nur ein Stoppen bei einem vorgewählten Drehmoment, sondern auch beim Erreichen der apikalen Konstriktion durch eine während der Aufbereitung stattfindende endometrische Längenbestimmung ermöglichen (GAMBEL und HÜLSMANN 2003).

Morita brachte 1997 mit dem Tri-Auto-ZX-Winkelstück (J. Morita Corporation, Tokyo, Japan) das erste kombinierte Gerät auf den Markt (Abb. 23). Das Gerät bietet nicht nur die Einstellung, beim Erreichen des Apex zu stoppen, sondern

auch bei einer Aufbereitungslänge von 0,5 → 1 → 1,5 → 2 vor dem Apex. Nach Herstellerangaben (Betriebsanleitung) entsprechen diese Einstellungswerte jedoch nicht, wie teilweise irrtümlich beschrieben (GAMBEL und HÜLSMANN 2003), einer Entfernung in Millimetern.



Abb. 23: Tri-Auto-ZX-Winkelstück von Morita nach Herstellerfoto (2008)

CAMPBELL et al. (1998) führten eine in vitro Studie mit dem Tri-Auto-ZX-Winkelstück durch. Zunächst wurde an 60 Wurzelkanälen die sogenannte tatsächliche Länge bestimmt (AL). Hierzu wurde ein dünnes Handinstrument in den Kanal eingeführt, bis sich die Spitze am Foramen apikale zeigte. Dann wurde das Instrument zurückgezogen, bis die Feilenspitze wieder im Kanal verschwand, aber noch in der Aufsicht mit einer Lupenbrille im Bereich der apikalen Konstriktion sichtbar war.

Im zweiten Schritt wurde an jedem Kanal die Länge endometrisch ohne Rotation der Feile bestimmt (EL). Die Aufbereitungslänge wurde am Gerät hierbei auf „0,5 vor Apex“ eingestellt. In einem dritten Schritt wurden die Kanäle in 3 Gruppen zu je 20 Stück aufgeteilt (AAR1, AAR1.5, AAR2) und mit den Arbeitslängeneinstellungen „1, 1,5 und 2 vor Apex“ aufbereitet und die dabei ermittelten Arbeitslängen notiert (IL). Nach der Aufbereitung wurden die Kanäle bis zur Aufbereitungslänge (IL) mit Guttapercha gefüllt. Die nachfolgende Tabelle (Tab. 2) stellt die Ergebnisse dar.

| Anzahl | AAR 1 | | | AAR 1,5 | | | AAR 2 | | |
|--------|-------|------|------|---------|------|------|-------|------|------|
| | AL | EL | IL | AL | EL | IL | AL | EL | IL |
| 1 | 14.8 | 14.2 | 14.2 | 16.4 | 15.8 | 15.4 | 16.4 | 16.2 | 14.6 |
| 2 | 17.2 | 16.8 | 16.6 | 16.6 | 15.4 | 14.8 | 16.8 | 16.4 | 13.4 |
| 3 | 16.4 | 15.8 | 15.6 | 17.8 | 17.2 | 16.6 | 16.6 | 16.4 | 14.4 |
| 4 | 14.4 | 13.8 | 13.8 | 16.2 | 15.4 | 15.0 | 16.0 | 16.0 | 14.8 |
| 5 | 18.0 | 17.2 | 17.2 | 17.8 | 17.2 | 16.8 | 13.6 | 13.2 | 13.0 |
| 6 | 16.8 | 15.6 | 15.4 | 16.0 | 15.2 | 14.0 | 15.6 | 15.6 | 14.8 |
| 7 | 15.0 | 14.2 | 14.0 | 15.6 | 15.0 | 14.6 | 15.2 | 15.0 | 13.8 |
| 8 | 18.6 | 18.0 | 18.0 | 19.0 | 18.2 | 18.0 | 19.8 | 19.2 | 17.8 |
| 9 | 17.2 | 16.8 | 16.8 | 14.2 | 13.8 | 13.6 | 15.0 | 14.6 | 14.6 |
| 10 | 16.2 | 15.6 | 15.4 | 17.6 | 16.8 | 15.8 | 15.2 | 15.0 | 14.4 |
| 11 | 17.4 | 16.8 | 16.6 | 17.0 | 16.8 | 16.4 | 11.8 | 11.6 | 11.0 |
| 12 | 17.0 | 16.2 | 16.0 | 15.2 | 15.0 | 14.8 | 20.6 | 20.0 | 18.4 |
| 13 | 15.0 | 14.4 | 14.2 | 16.0 | 15.4 | 15.2 | 16.0 | 16.0 | 11.8 |
| 14 | 15.8 | 15.2 | 15.2 | 17.8 | 17.0 | 16.8 | 12.6 | 12.4 | 11.4 |
| 15 | 15.2 | 14.8 | 14.6 | 17.0 | 16.4 | 16.0 | 14.2 | 14.0 | 12.4 |
| 16 | 16.2 | 15.6 | 15.6 | 16.6 | 16.2 | 16.0 | 15.0 | 14.0 | 14.0 |
| 17 | 16.8 | 16.6 | 16.6 | 14.2 | 14.0 | 13.6 | 16.0 | 15.4 | 15.0 |
| 18 | 16.0 | 15.6 | 15.4 | 15.0 | 14.8 | 14.6 | 15.0 | 14.2 | 12.4 |
| 19 | 14.2 | 13.4 | 13.4 | 15.2 | 15.0 | 14.8 | 12.0 | 11.2 | 10.6 |
| 20 | 15.0 | 14.6 | 14.6 | 15.4 | 14.2 | 13.8 | 15.0 | 14.0 | 13.4 |

Tab. 2: Ergebnisse der Versuchsreihen nach Campbell et al. (1998)

Im Durchschnitt war die endometrisch ohne Rotation bestimmte Länge (AL) um 0,54 +/- 0,26 mm kürzer als die tatsächliche unter Sicht bestimmte Länge (EL).

Die Aufbereitungslänge (IL) war entweder kürzer oder gleich der endometrischen Arbeitslängenbestimmung ohne Rotation (EL). Bei der Einstellung „1 vor Apex“ resultierte eine mittlere Abweichung von 0,1 +/- 0,1 mm zwischen Aufbereitungslänge und endometrischer Arbeitslängenbestimmung ohne Rotation. Bei der Vorwahl „1,5 vor Apex“ ergab sich eine mittlere Abweichung von 0,36 +/- 0,2 mm. Bei der Vorwahl „2 vor Apex“ variierten die Längen sehr stark.

Im letzten Untersuchungsschritt wurden die apikalen 4 mm des Wurzelkanals mit rotierenden diamantierten Instrumenten freigelegt und unter einem Mikroskop betrachtet, um einen Aufschluss über die physiologische Konstriktion zu erhalten.

Bei den Aufbereitungen mit der Einstellung „1 vor Apex“ war nur noch in 50% der Fälle eine apikale Konstriktion erkennbar. Im Vergleich waren bei den Kanälen, welche mit der Vorwahl „1,5 und 2 vor Apex“ aufbereitet wurden, noch

90% bzw. 85% der Konstriktionen intakt. Nachfolgend ein Auszug aus der Fotodokumentation (Abb. 24).

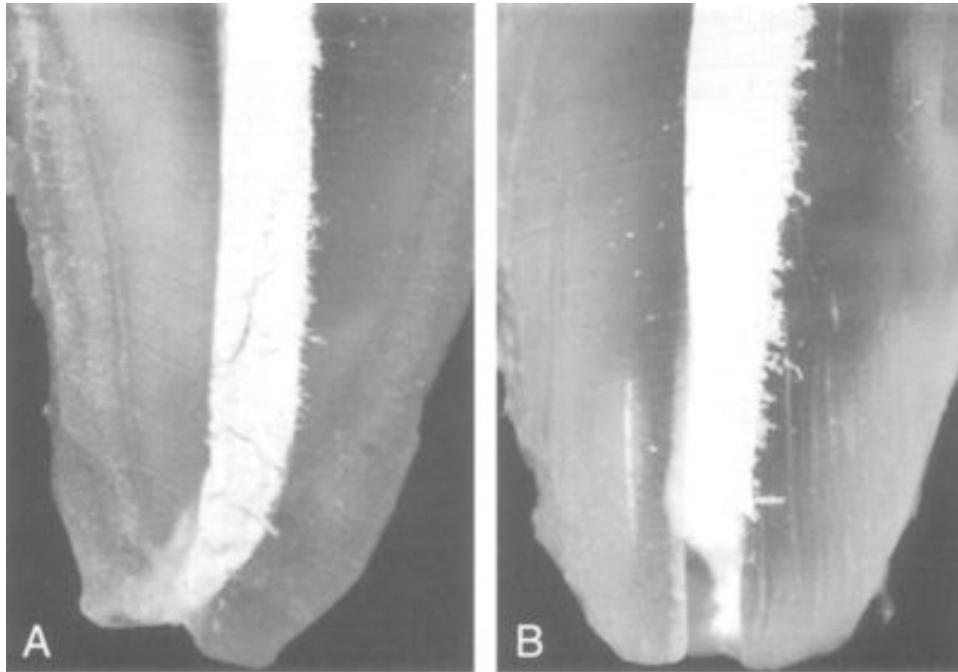


Abb. 24: A: vorhandenes Foramen physiologicum nach der Aufbereitung, B: Verlust des Foramen physiologicum nach der Aufbereitung nach Campbell et al. (1998)

Die Autoren resümierten aus den Versuchsergebnissen ihrer in vitro Studie, dass eine Aufbereitung mit der Einstellung „1 vor Apex“ konstant zu einer Arbeitslänge in der Nähe der physiologischen Konstriktion führt. Sie folgerten hieraus, dass das Gerät für den klinischen Einsatz geeignet ist und in einer Patientenstudie weiter untersucht werden sollte.

In einem klinischen Erfahrungsbericht kommen GAMBAL und HÜLSMANN (2003) zu folgendem Ergebnis: Das Tri-Auto-ZX-Winkelstück von Morita hat sich bei der Einstellung auf „1 vor Apex“ bewährt, um ein Überinstrumentieren zuverlässig zu verhindern und klinisch gute Ergebnisse zu erhalten.

Dem gegenüber empfehlen HÖR und ZIRKEL (2006) die Längenmessung und Aufbereitung getrennt vorzunehmen. Auf Grund des oftmals kurzen Messintervalls vom Foramen physiologicum bis zum Foramen apikale, des Informationsübertragungsweges von der Instrumentenspitze zum Motor und der Trägheit des Motors wird die apikale Konstriktion meist überschritten.

Nach Beginn dieser Dissertation wurde zu dem aktuellen Gerät von Morita, dem Dentaport ZX, eine vergleichbare in vitro Studie von FELIPPE et al. (2008) veröffentlicht. Das Gerät wird dort als Root ZX II bezeichnet.

Die Autoren beschäftigen sich nicht mit dem physiologischen Foramen als Endpunkt der Aufbereitung. Sie ermittelten an 65 Wurzelkanälen die Abweichungen zum anatomischen Foramen, die bei kombinierter Messung und Aufbereitung mit verschiedenen Einstellungen des Gerätes erreicht wurden. Zusätzlich wurden die Wurzelkanäle endometrisch mit einem Handinstrument vermessen.

Als Grundlage der Messungen wurde die tatsächliche Länge (DL) zwischen dem Koronalen Referenzpunkt und dem Foramen apicale bestimmt. Hierzu wurde ein dünnes Handinstrument in den Kanal eingeführt, bis die Spitze mit einer Lupenbrille (x 2,5) am anatomischen Foramen sichtbar war.

Im zweiten Schritt wurde bei allen Kanälen eine endometrische Messung mit einem Handinstrument durchgeführt (EL1). Das Instrument wurde in den Kanal eingeführt bis das Gerät „Apex“ anzeigte. Die Anzeige „Apex“ entspricht nach Herstellerangaben einer Feilenspitzenposition beim anatomischen Foramen.

Im dritten Schritt erfolgte die Aufbereitung mit rotierenden Instrumenten. Als Arbeitslängeneinstellungen wurden „2 vor Apex (AAR 2), 1 vor Apex (AAR 1) und 0,5 vor Apex (AAR 0,5)“ verwendet. Die jeweils entsprechende Aufbereitungstiefe wurde notiert.

Abschließend wurde nochmals, identisch der Messung im ersten Schritt, eine endometrische Messung mit einem Handinstrument durchgeführt (EL2).

Alle Längen wurden an den herausgezogenen Instrumenten auf 0,5 mm genau bestimmt.

Nachfolgend (Tab. 3) sind die Abweichungen der Arbeitslängen bei der kombinierten Aufbereitung mit endometrischer Arbeitslängenkontrolle zu der tatsächlichen Länge bis zum Foramen apikale dargestellt.

| Differenz zu DL [mm] | Anzahl in AAR 0,5 | Häufigkeit | Anzahl in AAR 1 | Häufigkeit | Anzahl in AAR 2 | Häufigkeit |
|----------------------|-------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|
| -3 | - | 0,00% | - | 0,00% | 1 | 1,54% |
| -2,5 | - | 0,00% | - | 0,00% | 1 | 1,54% |
| -2 | 1 | 1,54% | 3 | 4,62% | 5 | 7,69% |
| -1,5 | - | 0,00% | 3 | 4,62% | 6 | 9,23% |
| -1 | 17 | 26,15% | 19 | 29,23% | 25 | 38,46% |
| -0,5 | 9 | 13,85% | 13 | 20,00% | 11 | 16,92% |
| 0 | 25 | 38,46% | 20 | 30,77% | 14 | 21,54% |
| 0,5 | 7 | 10,77% | 4 | 6,15% | 1 | 1,54% |
| 1 | 6 | 9,23% | 3 | 4,62% | 1 | 1,54% |
| Total | 65 | 100,00% | 65 | 100,00% | 65 | 100,00% |

Tab. 3: Abweichung der ermittelten Arbeitslängen bei der maschinellen Aufbereitung mit endometrischer Arbeitslängenkontrolle zur tatsächlichen Länge bis zum Foramen apikale nach FELIPPE et al. (2008)

Die Einstellung „0,5 vor Apex“ soll nach Herstellerangaben einer Aufbereitung bis zum Foramen physiologicum entsprechen.

- Hier wurde in 20% der Fälle über das Foramen apikale hinaus aufbereitet.
- Die maximale Überschreitung betrug 1 mm. Sie wurde bei 6 Messungen (9%) erreicht.
- Der mittlere Abstand zwischen Foramen apicale und Instrumentenspitze betrug $-0,22 \pm 0,66$ mm.

Bei den Einstellungen „1 vor Apex“ bzw. „2 vor Apex“ ergab sich eine im Mittel um $-0,48 \pm 0,69$ mm bzw. $-0,82 \pm 0,73$ mm vom Foramen apicale entfernte Aufbereitung. Bei der Einstellung „2 vor Apex“ kam es zwar nur in 2 Fällen (3%) zu einer Überschreitung des Foramen apikale, dafür schwankten die Werte aber bis zu einer Entfernung von 3 mm zum Foramen apicale (Tab. 4).

| Einstellung am Gerät | minimale Abweichung zu DL [mm] | maximale Abweichung zu DL [mm] | mittlere Abweichung zu DL [mm] | SD [mm] |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 0,5 vor Apex | -2,00 | 1,00 | -0,22 | 0,66 |
| 1 vor Apex | -2,00 | 1,00 | -0,48 | 0,69 |
| 2 vor Apex | -3,00 | 1,00 | -0,82 | 0,73 |

Tab. 4: Grenz- und Mittelwerte mit Standardabweichung (SD) der Abweichungen der Arbeitslängen bei der maschinellen Aufbereitung mit endometrischer Arbeitslängenkontrolle zur tatsächlichen Länge (DL) bis zum Foramen apikale nach FELIPPE et al. (2008)

Die Autoren FELIPPE et al. (2008) folgerten aus ihrer Untersuchung, dass die endometrische Messung mit dem Root ZX II während der Aufbereitung keine akkurate Methode bietet, um das apikale Aufbereitungsende zu kontrollieren.

Als zusätzliche Untersuchungsergebnisse zeigt die Tab. 5 die Abweichung der endometrischen Messungen mit Handinstrument (EL1, EL2) zur tatsächlichen visuell ermittelten Länge vom koronalen Referenzpunkt zum Foramen apicale.

| Abweichung zur DL [mm] | Anzahl in EL1 | Häufigkeit | Anzahl in EL2 | Häufigkeit |
|-------------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| -1 | 6 | 9,20% | 8 | 12,30% |
| -0,5 bis 0,5 | 56 | 86,20% | 54 | 83,10% |
| 1 | 3 | 4,60% | 3 | 4,60% |
| Total | 65 | 100,00% | 65 | 100,00% |

Tab. 5: Abweichung der endometrischen Messungen (EL1, EL2) zur tatsächlichen Länge (DL) nach FELIPPE et al. (2008)

Der Vergleich der beiden endometrischen Messungen (EL1, EL2) untereinander ergab keine signifikanten Unterschiede. Auch zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Ergebnis der endometrischen Messungen mit Handinstrument (EL1, EL2) und der visuell ermittelten Länge vom koronalen Referenzpunkt bis zum Foramen apikale (DL). Die Tab. 6 zeigt die Ergebnisse in der Übersicht.

| Vergleich | mittlere Abweichung [mm] | Signifikanz | Sig. < 0,05 |
|------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------|
| EL1 vs. EL2 | 0,07 | 0,6268 | nein |
| DL vs. EL1 | 0,03 | 0,744 | nein |
| DL vs. EL2 | 0,10 | 0,111 | nein |

Tab. 6: Vergleich der endometrischen Messungen (EL1, EL2) untereinander sowie mit der tatsächlichen Länge (DL) nach FELIPPE et al. (2008)

Die Autoren schlossen daraus, dass sich mit einer endometrischen Messung die Position des Foramen apikale verlässlich und reproduzierbar bestimmen lässt.

3 Ziel der Untersuchung

Es herrscht Einigkeit, dass die maschinelle Aufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten bei geeigneten Kanälen zu guten Ergebnissen führt.

In der Literaturübersicht wurde erörtert, dass sich mit den modernen Endometriegeräten die Möglichkeit bietet, einen Bereich nahe der apikalen Konstriktion, sprich dem physiologischen Foramen, zu ermitteln.

Die Vereinigung der maschinellen Aufbereitung und der Endometrie in einem Gerät verspricht ein beträchtliches Potenzial, bei der Behandlung Zeit einzusparen und trotzdem zu einem sicheren Stopp im Bereich des Foramen Physiologicum zu kommen.

In der vorliegenden Arbeit sollen drei Geräte in vitro hinsichtlich der Genauigkeit der endometrischen Arbeitslängenbestimmung während der rotierenden Aufbereitung untersucht und miteinander, sowie mit der röntgenologischen Arbeitslängenbestimmung verglichen werden.

Die drei untersuchten Geräte sind das seit 2003 auf dem Markt befindliche Kombigerät Dentaport ZX (J. Morita Corporation, Tokyo, Japan), die Weiterentwicklung des Tri-Auto-ZX-Winkelstücks, das VDW.Gold (VDW GmbH, München, Deutschland) und der EndoPilot (Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt, Deutschland), welches beide Neuerscheinungen sind, weshalb noch keine wissenschaftlichen Studien oder praktischen Erfahrungen vorliegen.

4 Material und Methoden

4.1 Materialien

Drei Geräte zur maschinellen Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Längenbestimmung wurden untersucht:

- **VDW.Gold** (VDW GmbH, München, Deutschland)
- **Dentaport ZX** (J. Morita Corporation, Tokyo, Japan)
- **EndoPilot** (Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt, Deutschland)

4.1.1 Gerätebeschreibung Dentaport ZX

Beim Dentaport ZX (J. Morita Corporation, Tokyo, Japan) werden alle Informationen und Einstellungen auf dem Display an der Vorderseite des Gerätes dargestellt (Abb. 25). Zusätzlich wird der Anwender durch akustische Signale über die Feilenposition im Kanal informiert. Die Bedienung erfolgt über vier Tasten an der Vorderseite des Geräts.



Abb. 25: Dentaport ZX mit Handstück und Wangenelektrode (Herstellerfoto 2008)

Das Dentaport ZX ist nach dem Baukastenprinzip konzipiert. Grundbaustein ist das Bauteil mit dem Display und den vier Funktionstasten. Von der Rückseite

her können derzeit zwei unterschiedliche Module angebracht werden, die unterschiedliche Funktionsweisen ermöglichen. Das eine Modul ermöglicht ausschließlich eine endometrische Längenbestimmung mittels Wangenelektrode und einem an einer Klemme befestigten Handinstrument. Das zweite, bei dieser Untersuchung verwendete Modul, dient dem Betrieb eines speziellen Winkelstückes zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Messung.

Das Modul für die maschinelle Aufbereitung wird, im Gegensatz zu dem reinen Messmodul, über einen speziellen Akku betrieben. Das Gerät kann über das Netzteil geladen, aber nicht betrieben werden.

Das Aufbereitungsinstrument arretiert beim Einführen in das Winkelstück automatisch. Herausnehmen lässt es sich, ähnlich der Funktionsweise der meisten dentalen Winkelstücke, durch Betätigung des Druckknopfes am Hinterkopf des Winkelstücks.

Für den Messstromkreis muss ein Metallclip, der sich an der Unterseite des Winkelstückkopfes befindet, an den Schaft der eingesetzten Feile angelegt werden (Abb. 26). Er ist die leitende Verbindung zwischen Aufbereitungsinstrument und den inneren Bauteilen des Winkelstücks. Die Außenhülle und der Kopf des Winkelstücks sind kein Teil des Messstromkreises.

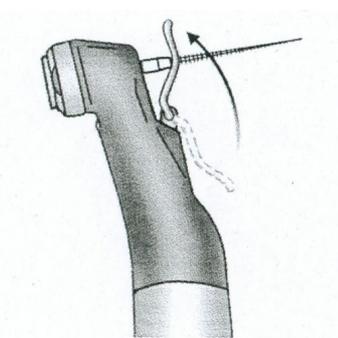


Abb. 26: Metallclip als leitende Verbindung zwischen Aufbereitungsinstrument und inneren Bauteilen des Winkelstücks (Betriebsanleitung 2008)

Nach dem Anschalten ist das Gerät ohne weitere Kalibrierung im normalen Betriebsmodus.

Die Rotationsgeschwindigkeiten und Drehmomentbegrenzungen müssen für die unterschiedlichen Feilen manuell eingestellt werden. Es können drei Speicherplätze, die als M1, M2 und M3 bezeichnet werden, belegt werden. Die Werte werden nach dem Ausschalten des Geräts beibehalten.

Für die Aufbereitung wird bei dieser Untersuchung der Funktionsmodus „Auto Start und Stopp“ verwendet. Wird die Feile in den Kanal eingeführt, also der Messstromkreis geschlossen, beginnt sie automatisch zu rotieren. Wird die Feile wieder herausgezogen, also der Messstromkreis unterbrochen, hält sie an.

Die Feilenspitzenposition im Wurzelkanal wird über eine Art Balkenanzeige graphisch dargestellt (Abb. 27). Die Skalierung der Balkenanzeige verläuft in den Stufen 3 → 2 → 1 → Apex. Die Zahlenwerte entsprechen nicht Entfernungen in Millimetern, sie dienen lediglich der Orientierung. Der Punkt, bei dem die Aufbereitung stoppen soll, kann individuell zwischen dem Wert 2 und Apex eingestellt werden. Nach dem Handbuch des Dentaport ZX soll der Wert 0,5 der apikalen Konstriktion entsprechen. Folglich wurde der Wert 0,5 für den Aufbereitungsstopp eingestellt.

Ab Erreichen der Position 2 auf dem Display wird ein Alarmton in langsamen Intervallen hörbar. Bei weiterem Voranschieben der Feile werden die Intervalle des Alarmtones kürzer.

Beim Erreichen der vermeintlichen apikalen Konstriktion kann zwischen zwei Aktionen gewählt werden: Stopp der Rotation oder Rotation entgegengesetzt der Arbeitsrichtung. Bei dieser Untersuchung wurde, um das exakte Fixieren der Feile in der ermittelten Position zu ermöglichen, der Rotationsstopp beim Erreichen der gewählten Aufbereitungstiefe gewählt.

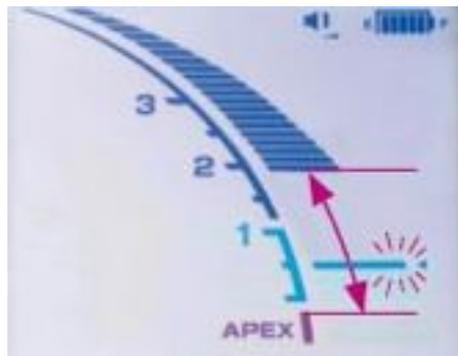


Abb. 27: Variable Einstellungen der Arbeitslängenanzeige zwischen dem Balken mit der Bezeichnung 2 und Apex. Die Arbeitslänge ist hier auf 0,5 eingestellt (Herstellerabbildung 2008)

4.1.2 Gerätebeschreibung VDW.Gold

Das VDW.Gold (VDW GmbH, München, Deutschland) wird über zehn Tasten an der Vorderseite des Gerätes und einen Fußschalter bedient (Abb. 28). Informationen und Einstellungen werden auf einem zweizeiligen Display und verschiedenen Leuchtdioden im Bereich des Bedienfeldes angezeigt. Zusätzlich dienen akustische Signale der Information über die Feilenposition im Kanal und das Erreichen eines voreingestellten kritischen Drehmomentes.



Abb. 28: VDW.Gold mit Handstück und Wangenelektrode (Herstellerfoto 2008)

Das VDW.Gold kann auch während des Ladevorganges des integrierten Akkus über das Netzteil betrieben werden.

Nach dem ersten Einschalten erfolgt eine automatische Kalibrierung, um die Reibung des Winkelstückes zu kompensieren. Der Mikromotor durchläuft hierbei einen Drehzahlbereich von 1200 U/min bis maximal 12.000 U/min. Dies soll eine genauere Einhaltung der Drehzahl und der Drehmomentbegrenzung während der Aufbereitung ermöglichen. Der Vorgang muss nach jedem Ölen und Sterilisieren des Winkelstückes wiederholt werden.

Der Messstromkreis fließt beim VDW.Gold direkt über das Winkelstück. Um einen Kurzschluss über die Schleimhaut und damit eine zu niedrige Arbeitslänge zu verhindern, schreibt der Hersteller die Verwendung einer speziellen Schutzhülle (Abb. 29) aus Silikon vor, die über das Winkelstück gestülpt wird.



Abb. 29: Winkelstück-Schutzhülle zur Verhinderung von Kurzschlüssen

Nachdem die Schutzhülle aufgesetzt ist, wird das Aufbereitungsinstrument in das Winkelstück eingeführt. Es arretiert automatisch. Herausnehmen lässt es sich durch Betätigung des Druckknopfes am Hinterkopf des Winkelstücks.

Die Drehmomentbegrenzungen und Rotationsgeschwindigkeiten sind für zehn Feilensysteme bereits im Gerät voreingestellt und können über ein Menü ausgewählt werden. Zusätzlich zur integrierten Feilenbibliothek können auch individuelle Einstellungen vorgenommen und abgespeichert werden.

Um nach der Feilenauswahl die Messfunktion einzuschalten, muss die Lippenelektrode für etwa 2 Sekunden direkt mit der Feile im Winkelstück berührt werden (Abb. 30).



Abb. 30: Die Aktivierung der Messfunktion durch Berührung von Wangenelektrode und Feile (Betriebsanleitung 2008)

Die Feilenspitzenposition im Wurzelkanal wird über eine LED-Ampel dargestellt (Abb. 31). Drei blaue, drei grüne, eine orange und eine rote LED zeigen die aktuelle Feilenposition an. Begleitet wird das Aufleuchten der LED's von akustischen Signalen. Im blauen und grünen Bereich steigt die Signalfrequenz stetig an. Im orangen Bereich ertönt ein Dauerton, der im roten Bereich seine Intensität ändert.



Abb. 31: Darstellung der Feilenspitzenposition beim VDW.Gold (Betriebsanleitung 2008)

Beim VDW.Gold wird Start und Stopp des Mikromotors über den Fußschalter gesteuert. Über das Menü kann eine automatische Stopp-Funktion bei Erreichen des Apex aktiviert werden. Die Rotation stoppt dann mit dem Aufleuchten der orangenen Leuchtdiode der Apexlocator-Anzeige, was einer Aufbereitungstiefe bis zum Foramen apicale entsprechen soll. Nach dem Stopp wird durch Loslassen und erneutes Drücken des Fußpedals die Feile in den Linkslauf versetzt. Der Punkt für den apikalen Autostopp lässt sich durch den Benutzer nicht verändern.

Als gewünschte Aufbereitungstiefe für die Untersuchung wurde das Aufleuchten der mittleren der drei grünen Leuchtdioden gewählt. In der Betriebsanleitung ist diese dünn umkreist. Ihr Aufleuchten soll der Lage der Feilenspitze in einem Kanalabschnitt von der apikalen Konstriktion bis zum Foramen apicale entsprechen.

Beim Aufleuchten der mittleren grünen Leuchtdiode wird die Rotation durch Loslassen des Fußschalters unterbrochen.

4.1.3 Gerätebeschreibung EndoPilot

Der EndoPilot (Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt, Deutschland) wird über einen Touchscreen und einen Fußschalter bedient (Abb. 32). Alle Einstellungen und Informationen werden auf dem Display angezeigt. Akustische Signale und LED's im hinteren Bereich des Mikromotors dienen der zusätzlichen Information während der Aufbereitung. Die Stromversorgung des EndoPilots erfolgt ausschließlich über das mitgelieferte Netzteil. Der EndoPilot bedarf nach dem Anschalten keiner Kalibrierung und ist sofort betriebsbereit.



Abb. 32: EndoPilot mit Handstück und Wangenelektrode (Herstellerfoto 2008)

Das ausgewählte Aufbereitungsinstrument arretiert beim Einführen in das Winkelstück automatisch. Herausnehmen lässt es sich durch Betätigung des Druckknopfes am Hinterkopf des Winkelstücks.

Beim EndoPilot sind die Drehmomentbegrenzungen und Rotationsgeschwindigkeiten für zehn Feilensysteme voreingestellt und können über das Menü ausgewählt werden. Zusätzlich können eigene Einstellungen im Gerät abgespeichert werden. Eigene Sequenzen können durch Kombination bereits bestehender Instrumentendaten erstellt werden.

Der Messstromkreis läuft im Inneren des Winkelstücks und ist gegen die Außenhülle isoliert. Somit kann es bei Berührungen des Winkelstücks mit der Schleimhaut des Patienten nicht zu einem Kurzschluss kommen. Die Verwendung von Isolationshülsen ist nicht nötig.

Nach der Auswahl der eingespannten Feile aus der Feilenbibliothek kann durch Betätigung des Fußschalters die Feilenrotation gestartet werden. Ist, wie bei der vorliegenden Untersuchung, die Längenbestimmung während der Aufbereitung aktiviert, wechselt die Displayanzeige von der Feilenauswahl zur Apex-Anzeige.

Die Feilenspitze im Wurzelkanal wird durch eine Balkenanzeige graphisch dargestellt (Abb. 33). Wird die Feile in den Kanal eingeführt, nähert sich von oben ein Balken einer horizontalen Linie, diese Linie zeigt die Stop-Position an.

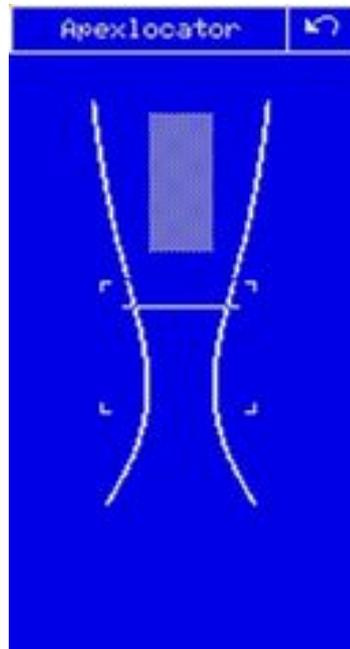


Abb. 33: Darstellung der Feilenposition beim EndoPilot (Herstellerabbildung 2008)

Die Position der Linie ist vom Hersteller voreingestellt, kann jedoch auch verändert werden. Hierzu muss in das Menü für die manuelle Längenbestimmung gewechselt werden. Dieser Funktionsmodus ist für die endometrische Längenbestimmung über ein per Feilenklemme verbundenes Handinstrument gedacht. Die Linie kann hier entweder durch Berührung des Displays frei verschoben oder während einer endometrischen Messung neu festgelegt werden. Im zweiten Verfahren wird durch Antippen des Fußschalters während der manuellen Messung die momentan angezeigte Feilenspitzenposition als neue Grenzlinie festgelegt. Die veränderte Einstellung bleibt dann bis zum Ausschalten des Geräts erhalten und wird durch einen Neustart auf den Standard zurückgesetzt.

In dieser Untersuchung wird der voreingestellte Wert für den Aufbereitungsstopp beibehalten. Es wird der Funktionsmodus „auto stopp“ verwendet. In dieser Einstellung stoppt die Feilenrotation beim Erreichen der

Grenzlinie automatisch. Ein Tonsignal und das Blinken von roten LED's im hinteren Bereich des Mikromotors signalisieren zusätzlich das Erreichen der Grenzlinie.

4.1.4 Verwendete Feilen

Für die Aufbereitung werden bei allen Geräten Feilen aus dem FlexMaster-System (VDW GmbH, München, Deutschland) verwendet.

Die Feilen haben einen konvexen Querschnitt, Schneidekanten vom Typ „K“ und eine nicht schneidende Instrumentenspitze (Abb. 34). Die Legierung, aus der die Instrumente hergestellt werden, enthält 54% Nickel und 46% Titan.



Abb. 34: Querschnitt einer FlexMaster-Feile als rasterelektronenmikroskopische Aufnahme mit 500-facher Vergrößerung (Herstellerfoto 2008)

Die Instrumente werden mit einer Drehzahl von $150-300 \text{ min}^{-1}$ rotierend eingesetzt. Um einen Torsionsbruch zu verhindern, sollen die Instrumente nur mit drehmomentkontrollierten Antrieben verwendet werden. Die Aufbereitung der Wurzelkanäle erfolgt nach dem Crown-down-Prinzip.

Die Feilen des FlexMaster-Systems (Abb. 35) unterscheiden sich in ISO-Größe (Durchmesser der Spitze), Länge und Konizität (Steigung).



Abb. 35: Drei Feilen der ISO-Größe 30 in gleicher Länge, aber unterschiedlicher Konizität (Herstellerfoto 2008)

Das FlexMaster-System verfügt über die ISO-Größen 15 bis 70, die Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm und Konizitäten (englisch 'Taper') von 2%, 4% und 6% Steigung. Die Steigungen sind wie in Abb. 36 dargestellt am Schaft der Feilen markiert.

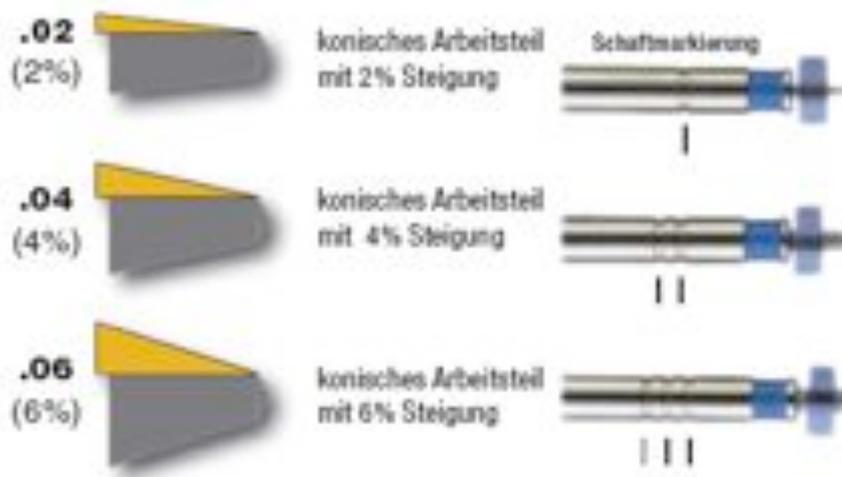


Abb. 36: Darstellung der verschiedenen Konizitäten (I = 2%, II = 4%, III = 6%) (Herstellerabbildung 2008)

Das Flexmaster-System verfügt nicht über jede mögliche Kombination aus den drei Parametern ISO-Größe, Länge und Konizität. Die ISO-Größen 45 bis 70 werden nur mit einer Konizität von 2% Steigung, die Feilen mit einer Konizität von 6% Steigung werden nicht in der Länge von 31 mm angeboten. Auch existiert keine Feile der ISO-Größe 15 mit einer Länge von 31 mm.

Je nach Kanaldurchmesser wird vom Hersteller VDW eine unterschiedliche Abfolge von Feilen mit verschiedenen ISO-Größen und Konizitäten empfohlen. Es werden hierbei enge, mittlere und weite Kanäle unterschieden (Abb. 37).

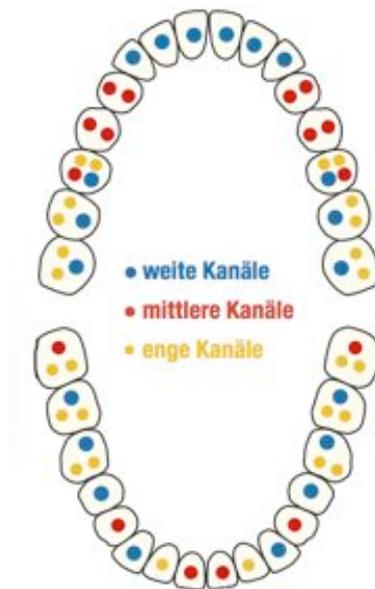


Abb. 37: Einteilung in enge, mittlere und weite Kanäle (Herstellerabbildung 2008)

Die Erweiterung des Kanaleinganges erfolgt immer mit der sogenannten IntroFile, die nachfolgenden Feilen-Sequenzen sind je nach Kanaldurchmesser unterschiedlich (Abb. 38 bis Abb. 40).

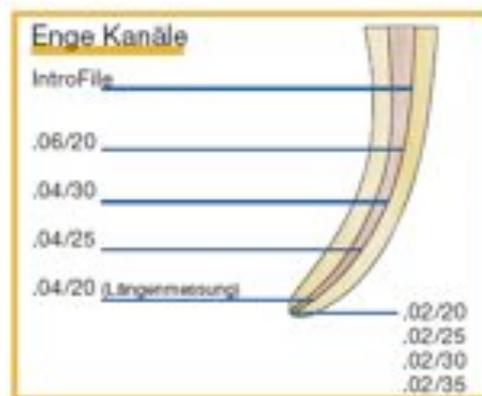


Abb. 38: Empfohlene Feilen-Sequenzen für enge Kanäle (Herstellerabbildung 2008)

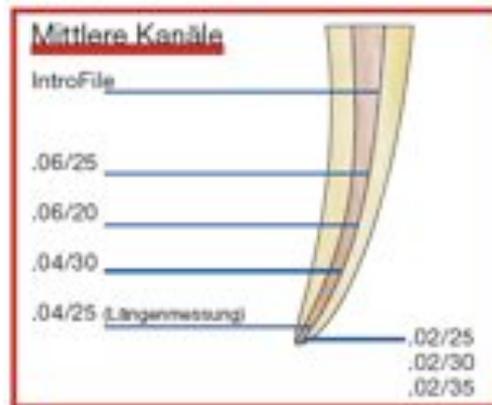


Abb. 39: Empfohlene Feilen-Sequenzen für mittlere Kanäle (Herstellerabbildung 2008)

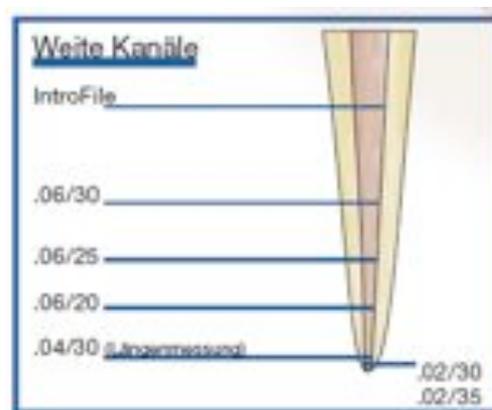


Abb. 40: Empfohlene Feilen-Sequenzen für weite Kanäle (Herstellerabbildung 2008)

Der Hersteller empfiehlt, eine Feile nach acht Kanalaufbereitungen zu ersetzen. Dies gilt jedoch nur für die Aufbereitung gerader Kanäle. Kanäle mit mäßiger bis mittlerer Krümmung erfordern die doppelte, enge und stark gekrümmte Kanäle die dreifache Wechselhäufigkeit.

4.2 Methoden

4.2.1 Übersicht über die praktische Vorgehensweise

Die folgende Aufzählung zeigt die Reihenfolge der Untersuchungsaktivitäten:

- Beschaffung extrahierter Zähne, Lagerung in 0,1% Thymollösung
- Trepanation und Einbettung der Zähne in ein Röntgenmodell

- Röntgenologische Arbeitslängenbestimmung mit Handinstrumenten
- Maschinelle Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Längenbestimmung, notieren der ermittelten Arbeitslänge und Fixierung der Feile im Kanal mittels Klebewachs
- Röntgenkontrolle der endometrischen Längenbestimmung
- Freilegen des apikalen Wurzelkanals und Darstellung von Feilenspitze, Foramen physiologicum und Foramen apicale
- Erstellung einer digitalen Photographie der apikalen Region mittels einer an ein Stereomikroskop angeschlossenen Kamera
- Bestimmung der Feilenspitzenposition in Relation zum Foramen apicale und zum Foramen physiologicum anhand des Fotos mit entsprechender im Maßstab kalibrierter Auswertungssoftware
- Statistische Auswertung der Ergebnisse

4.2.2 Auswahl der Zähne

Die Untersuchung wurde an einwurzligen und mehrwurzligen Zähnen mit abgeschlossenem Wurzelwachstum durchgeführt. Pro Gerät wurden mindestens 50 Wurzelkanäle aufbereitet. Das Verhältnis von Wurzelkanälen, die von einwurzligen Zähnen stammen, zu denen, die von mehrwurzligen stammen, war auf die drei Geräte bezogen gleich.

Endodontisch vorbehandelte und Zähne mit apikalen oder lateralen Wurzelresorptionen wurden ausgeschlossen. Auch dritte Molaren mit stark abnormer Wurzelkonfiguration wurden nicht in die Untersuchung einbezogen.

Die Zähne wurden nach der Extraktion in Glasgefäßen mit 0,1% Thymollösung gelagert.

4.2.3 Fixierung der Zähne

Die Zähne wurden in einem Versuchsaufbau fixiert, der eine röntgenologische Untersuchung sowie die maschinelle Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Längenbestimmung ermöglicht.

Zur Einbettung wurde ein Röntgenmodell (Frasaco GmbH, Tettang, Deutschland) verwendet (Abb. 41).



Abb. 41: Röntgenmodell mit Schlitz von 6-7 mm Breite zur Aufnahme von CCD-Sensoren für digitales Röntgen (Herstellerfoto 2008)

Jeweils drei Zähne wurden nebeneinander in einem Block eingebettet. Jeder Block erhielt eine Identifizierungsnummer und wurde während der einzelnen Arbeitsschritte aus dem Modell entfernt und wieder repositioniert.

Die Ausrichtung der Zähne im Modell erfolgte in der Art, wie sie auch in der natürlichen Zahnreihe vorzufinden wäre. Die Kammer des Modells wurde während der Aufbereitung mit Kochsalzlösung gefüllt, um eine endometrische Messung zu ermöglichen. Die Wurzeln wurden für eine korrekte Messung so ausgerichtet, dass sie während der Aufbereitung komplett von Kochsalzlösung umgeben waren.

Die Zähne wurden zunächst im Wurzelbereich mit Zellstoff bedeckt, um Verunreinigungen während der nächsten Arbeitsschritte auszuschließen. Eine

darauf folgende Umwicklung aus Plattenwachs ermöglichte die Positionierung der Zähne im Röntgenmodell, bevor mit zurechtgeschnittenen, lichthärtenden Kunststoffplatten die endgültige Fixierung erfolgte. Nach der Fixation wurden Wachs und Zellstoff entfernt (Abb. 42 bis Abb. 45).



Abb. 42 + Abb. 43: Die Wurzel eines einwurzligen Zahnes wurde mit Zellstoff und Plattenwachs umwickelt

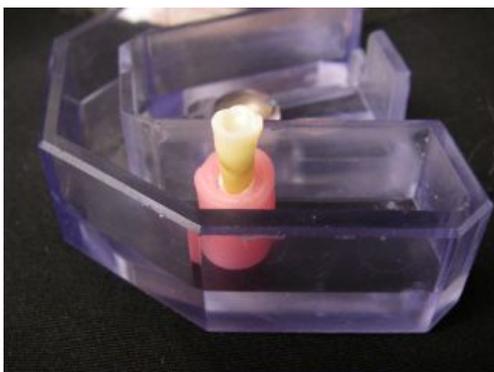


Abb. 44 + Abb. 45: Die Zähne wurden erst im Modell ausgerichtet und dann mit Kunststoff fixiert

4.2.4 Röntgenologische Arbeitslängenbestimmung

Zur Bestimmung der Messlänge wurde zunächst ein Ausgangsröntgenbild des im Modell fixierten Zahnes angefertigt. Die Röntgenaufnahme wurde mittels digitaler Sensortechnik durchgeführt.

Als Dentalstrahler wurde die Röntgenröhre 'Heliodent DS Multipuls' (Siemens, Bensheim, Deutschland) mit 60 kV und 7mA verwendet. Zur Erfassung der Röntgenstrahlen diente ein 'Sidexis Full Size Sensor' (Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland). Er hat eine aktive Fläche von 26x34 mm und eine physikalische Pixelgröße von 19,5 μm . Die Aufnahme wurde mit der Befundungssoftware 'Sidexis neXt Generation' in der Version 1.5.2 (Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland) betrachtet.

Das Röntgenbild wurde direkt nach dem Auslösen in der Befundungssoftware auf dem Monitor dargestellt und auf der Festplatte des Computers gespeichert.

Die Befundungssoftware bietet die Funktion der Streckenmessung, mit der Distanzen am digitalen Röntgenbild per Mauszeiger abgegriffen werden können und die Länge in Millimetern angezeigt wird (Abb. 46).

Mit diesem Werkzeug wurde am Ausgangsröntgenbild die Strecke vom projizierten koronalen Referenzpunkt bis zum röntgenologischen Apex abgegriffen. Von der angezeigten Distanz wurden 2 mm abgezogen und der Wert auf 0,5 mm genau gerundet. Der sich ergebende Wert wurde als Messlänge verwendet.

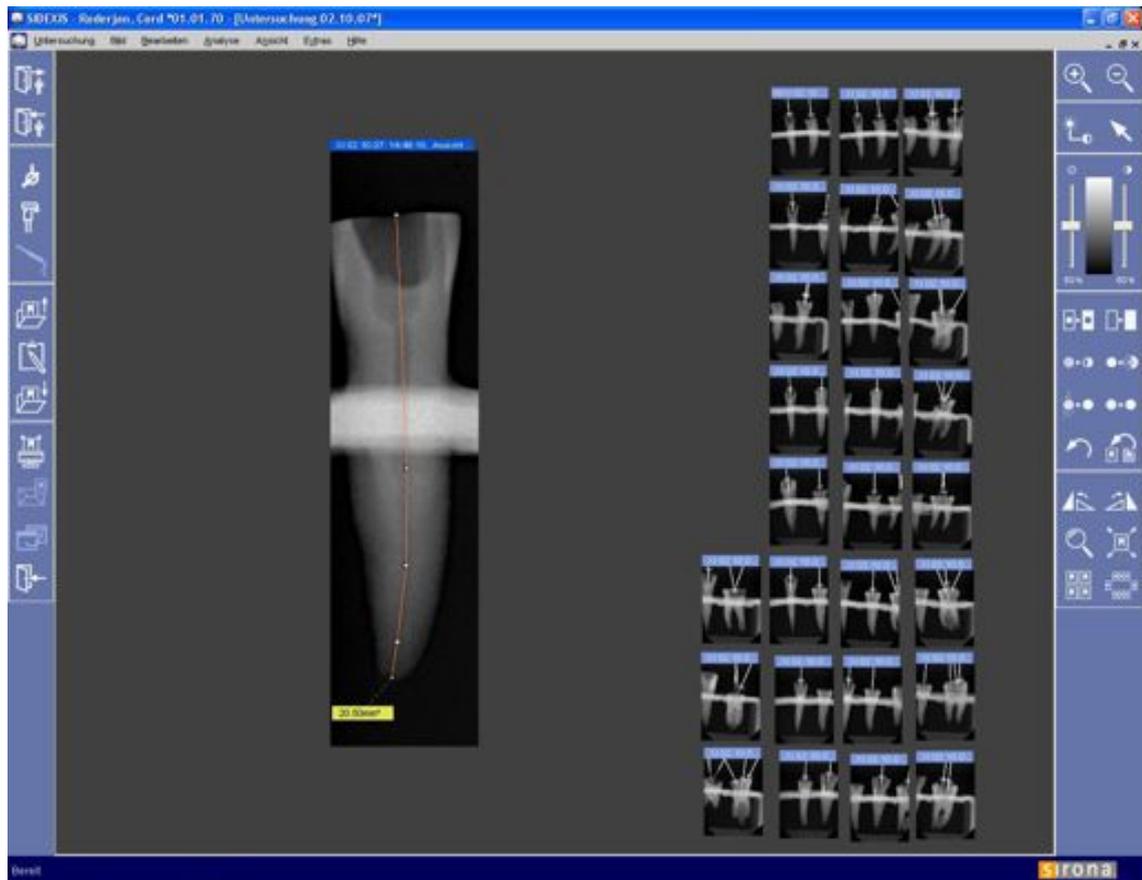


Abb. 46: Screenshot der Befundungssoftware Sidexis neXt Generation, links im Bild die vermessene Ausgangsaufnahme

Bei der Messaufnahme wurden Reamer und Hedström-Feilen ab der ISO-Größe 10 eingesetzt. In vivo soll die Mindestgröße für ein Edelstahlinstrument bei der Messaufnahme ISO-Größe 15, besser 20 betragen, um die Position der Instrumentenspitze eindeutig beurteilen zu können. Da der Zahn bei dieser Untersuchung jedoch nicht von röntgenopaken Strukturen (Knochen und Weichgewebe) umgeben war, konnte auch ein dünneres Edelstahlinstrument der ISO-Größe 10 hinreichend beurteilt werden.

Für die Messaufnahme wurde das Instrument mit der kleinsten ISO-Größe verwendet, welches beim Erreichen der Messlänge eine minimale Klemmpassung im Kanal aufwies, so dass es bei der Röntgenaufnahme nicht verrutschen konnte. Da bei der Messaufnahme in vitro keine Erschütterungen, die zum Verrutschen des Instruments führen könnten, zu erwarten waren, konnte die Klemmpassung nur sehr minimal sein. Es wurden möglichst dünne

Instrumente verwendet, da hierdurch das Risiko vermindert wurde, intrakanaläre Strukturen vor der eigentlichen Aufbereitung zu verändern.

Bei mehrwurzigen Zähnen mit oralen und vestibulären Kanälen wurden Reamer in den vestibulären und Hedström-Feilen in den oralen Kanälen verwendet.

Der Silikonstopper des Aufbereitungsinstruments wurde durch Verschiebung mit Hilfe eines Endo-Messblocks (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) auf die festgelegte Messlänge eingestellt (Abb. 47).



Abb. 47: Endo-Messblock mit einem auf 18 mm Länge eingestellten Aufbereitungsinstrument

Die Instrumente wurden langsam und ohne Druck bis auf die festgelegte Messlänge in den Kanal eingeführt. Zur Spülung wurde CHX-Lösung (2%) verwendet, da diese vom Hersteller VDW auch für die spätere endometrische Messung empfohlen wird.

Nach Erreichen der Messlänge wurde eine zweite Röntgenaufnahme (Messaufnahme) angefertigt. Die röntgenologisch festgelegte Arbeitslänge sollte einen Millimeter vor dem röntgenologischen Apex enden. Stellte sich die Instrumentenspitze bei der Messaufnahme einen Millimeter von dem röntgenologischen Apex entfernt dar, wurde diese Messlänge als röntgenologische Arbeitslänge in der Datentabelle festgehalten.

War die Instrumentenspitze zwischen einem und drei Millimetern vom röntgenologischen Apex entfernt, ergab sich die Arbeitslänge, indem die

verbleibende Strecke in 0,5 mm Schritten zur Messlänge addiert wurde. War die Instrumentenspitze weiter als drei Millimeter vom röntgenologischen Apex entfernt, bestand also eine Abweichung von mehr als 2 mm zum geforderten Punkt, wurde das Instrument entsprechend vorgeschoben und die Aufnahme wiederholt und neu beurteilt.

Zeigte sich bei der Messaufnahme (Abb. 48 und Abb. 49), dass die Instrumentenspitze über die angestrebte Entfernung zum röntgenologischen Apex hinaus geschoben wurde, wurde der Kanal verworfen, da eine Beschädigung des physiologischen Foramens hierbei nicht auszuschließen ist. Dies würde die spätere endometrische Längenbestimmung beeinträchtigen.

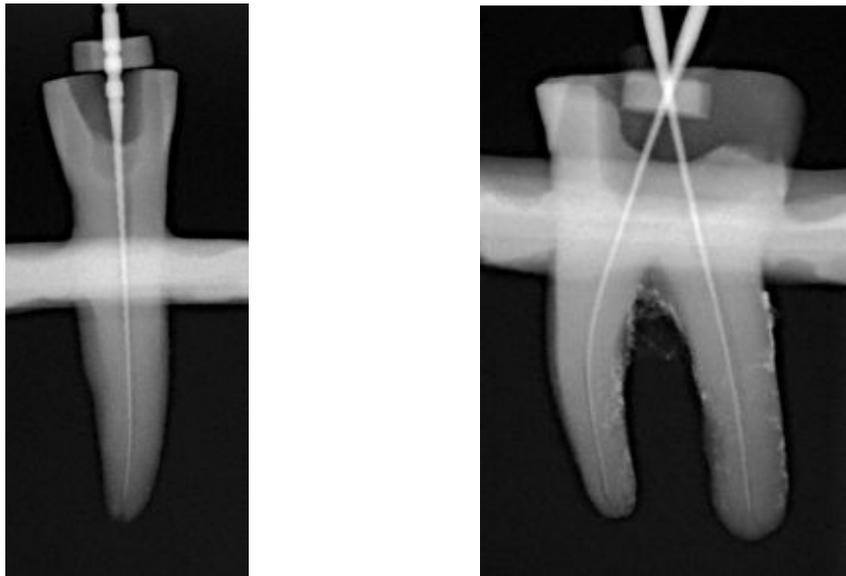


Abb. 48 + Abb. 49: Messaufnahmen zur Arbeitslängenbestimmung bei einem einwurzligen und einem mehrwurzligen Zahn

Anhand der Messaufnahme und der Außenansicht der Wurzel wurde zusätzlich in der Datentabelle vermerkt, ob es sich bei dem Wurzelkanal um einen geraden oder gebogenen Kanalverlauf handelt.

4.2.5 Aufbereitung

Die Kammer des Röntgenmodells wurde mit physiologischer Kochsalzlösung gefüllt. Die Wurzeln der fixierten Zähne waren komplett von der Lösung bedeckt. Die Zahnkronen und die Kunststoffplatte durften nicht von Flüssigkeit benetzt sein, da dies zu einem Kurzschluss hätte führen können. Die Lippenelektrode wurde ins Modell eingehängt, so dass auch sie mit der Kochsalzlösung in Kontakt war.

Die Geräte wurden der Betriebsanleitung entsprechend für die Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Messung vorbereitet. Es folgte die Aufbereitung mit FlexMaster-Feilen in den vom Feilen-Hersteller empfohlenen Sequenzen.

Wenn das Gerät das Erreichen der Arbeitslänge signalisierte bzw. automatisch stoppte, wurde der Silikonstopper der FlexMaster-Feile zum koronalen Referenzpunkt geschoben, die Feile aus dem Kanal herausgezogen und die Arbeitslänge am Endo-Messblock auf 0,5 mm genau abgelesen. Der Wert wurde in die Datentabelle eingetragen.

Die Feile wurde ein weiteres Mal in den Kanal eingeführt, beim Erreichen der Arbeitslänge mit Klebewachs in ihrer Position fixiert und vom Winkelstück gelöst (Abb. 50).

Um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch einen eventuell vorhandenen Übungseffekt zu verhindern, wurden jeweils drei Zähne pro Gerät aufbereitet und dann das Gerät gewechselt.



Abb. 50: Versuchsaufbau für die Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Messung. Die zwei einwurzligen Zähne sind bereits aufbereitet und die Feilen mit Klebewachs fixiert.

4.2.6 Kontrolle der Aufbereitung

Nach Aufbereitung aller Zähne eines Versuchblockes erfolgte zunächst eine röntgenologische Kontrolle. Das Nachfolgende Foto (Abb. 51) zeigt die Platzierung des Röntgensensors im Modell.

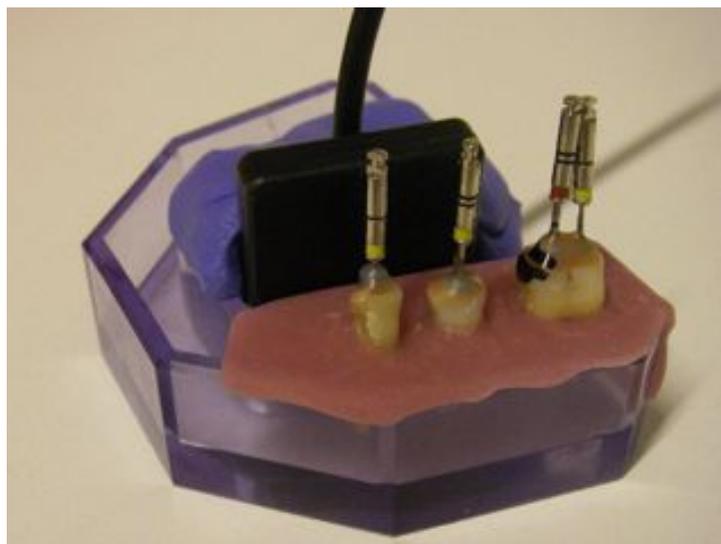


Abb. 51: Der Sensor ist für die Kontrollaufnahme des ersten Zahnes im Block platziert.

Nachfolgend die Kontrollaufnahmen (Abb. 52 und Abb. 53) der auch für die Messaufnahme (Abb. 48 und Abb. 49) als Beispiel gezeigten Zähne.

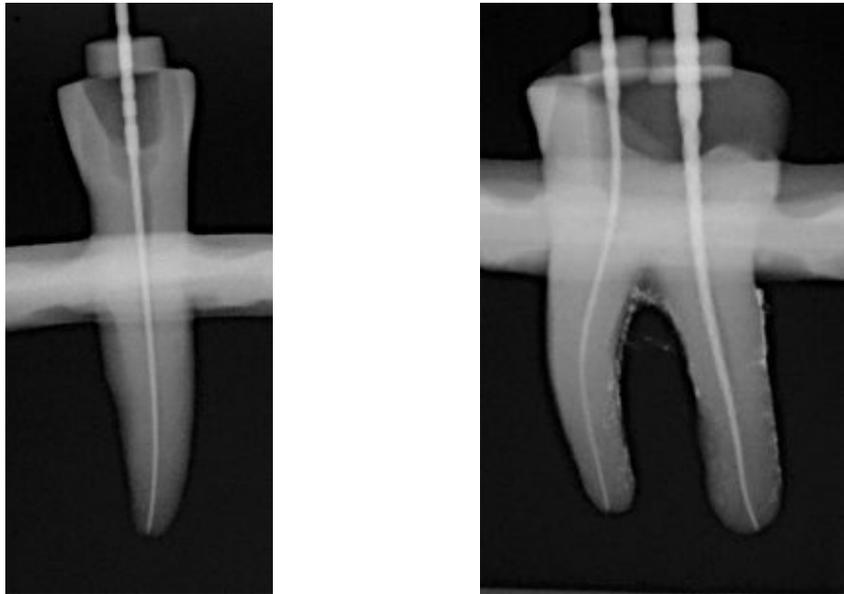


Abb. 52 + Abb. 53: Röntgenkontrolle der Aufbereitung bei einem einwurzigen und einem mehrwurzigen Zahn

Um die Messungen mit dem tatsächlich erreichten Endpunkt der Aufbereitung vergleichen zu können, wurde anschließend der apikale Anteil des Wurzelkanals mit diamantierten rotierenden Instrumenten freigelegt. Es wurden FG-Diamanten feiner Körnung (Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) in Walzenform (\varnothing 1,2 mm) mit einem roten Winkelstück verwendet.

Die Abtragung erfolgte von lateral, parallel zum Wurzelkanalverlauf. Dargestellt wurde die Feilenspitze, das Foramen apicale und das Foramen physiologicum. Als Vergrößerungshilfe beim Freilegen diente eine Lupenbrille mit 2,5-facher Vergrößerung.

Die dargestellte Region wurde unter einem Stereomikroskop (Abb. 54) betrachtet. Der Zahn wurde so platziert, dass die drei Strukturen Feilenspitze, Foramen apicale und Foramen physiologicum in einer Schärfeebene lagen. Mit der an das Mikroskop angeschlossenen Digitalkamera (Hitachi HVC20AP 3CCD)

wurde ein Foto der Region erstellt, welches auf dem PC als Bilddatei im JPG-Format gespeichert wurde.

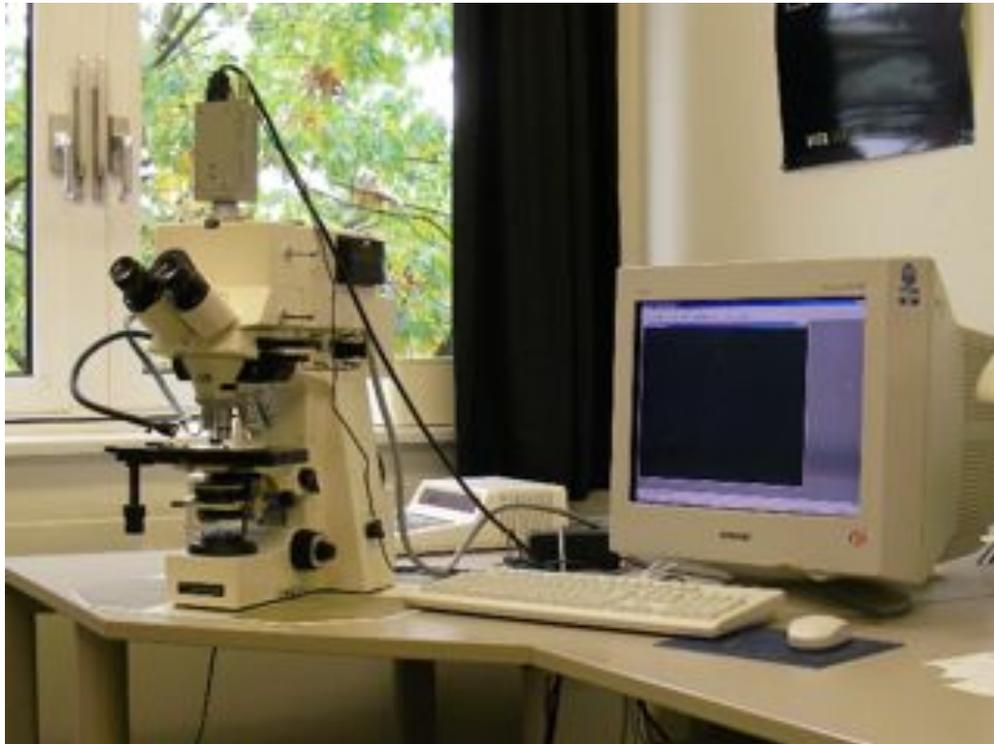


Abb. 54: Stereomikroskop mit angeschlossener Kamera und EDV zur Auswertung

Die Bestimmung der Feilenspitzenposition in Relation zum Foramen apicale und zum Foramen physiologicum erfolgte anhand des digitalen Fotos. Das Foto wurde mit der im Maßstab kalibrierten Software Sigma Scan Pro 5.0 für Windows (Systat Software GmbH, Erkrath, Deutschland) vermessen (Abb. 55).

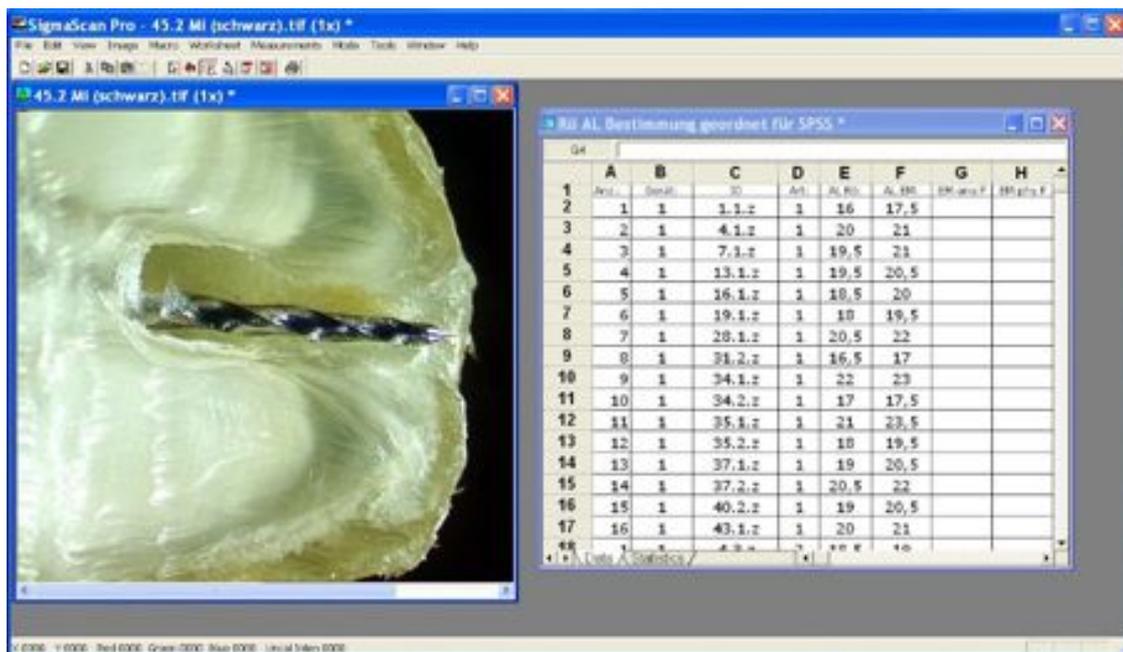


Abb. 55: Screenshot der Software Sigma Scan Pro 5.0, links im Bild das Foto der apikalen Region, rechts die Tabelle, in der die Messwerte eingetragen wurden

4.2.7 Inhalt der Datentabelle

Jeweils eine Zeile der Datentabelle entspricht einem Wurzelkanal. In den Spalten wurden die Vermerke und die gemessenen bzw. berechneten Werte eingetragen (Tab. 7).

| Spalte | Bedeutung |
|--------|--|
| 1 | Identifikationscode für die Zuordnung eines Datensatzes zu dem entsprechenden Wurzelkanal |
| 2 | Vermerk, mit welchem Gerät der Kanal aufbereitet wurde |
| 3 | Vermerk, ob es sich um einen einwurzligen oder mehrwurzligen Zahn handelt |
| 4 | Vermerk, ob es sich um einen gebogenen oder krummen Kanalverlauf handelt |
| 5 | ML Rö = verwendete Messlänge bei der Messaufnahme |
| 6 | AL Rö = röntgenologisch festgelegte Arbeitslänge |
| 7 | AL EM = endometrisch ermittelte Arbeitslänge |
| 8 | EM - phy F = an der freigelegten Wurzelspitze gemessene Strecke zwischen Instrumentenspitze und Foramen physiologicum |
| 9 | EM - ana F = an der freigelegten Wurzelspitze gemessene Strecke zwischen Instrumentenspitze und Foramen apicale |
| 10 | Rö – phy F = Strecke zwischen röntgenologisch festgelegter Arbeitslänge und dem Foramen physiologicum <i>Rechenweg:</i> Rö – phy F = (AL_Rö) – (AL_EM) + (EM_phy) |
| 11 | Rö – ana F = Strecke zwischen röntgenologisch festgelegter Arbeitslänge und dem Foramen apicale <i>Rechenweg:</i> Rö – ana F = (AL_Rö) – (AL_EM) + (EM_ana) |
| 12 | ana - phy = Strecke zwischen Foramen apicale und Foramen physiologicum <i>Rechenweg:</i> ana - phy = (EM_ana) – (EM_phy) |

Tab. 7: Übersicht über den Inhalt der Datentabelle

4.2.8 Statistische Auswertung

Die Statistik gliedert sich in einen beschreibenden und einen analytischen Teil.

Im ersten Abschnitt werden die Messergebnisse als Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung verdichtet dargestellt.

Im zweiten Abschnitt wird analysiert, ob sich die Geräte und die Röntgentechnik in Hinblick auf die Korrektheit der Arbeitslängenbestimmung unterscheiden. Maßstab dafür sind die Abstände der Arbeitslänge zum physiologischen Foramen und zum Foramen apikale. Zur Varianzanalyse wurde ein LSD-Test (Least Significance Difference) verwendet.

Ergänzend wurde ausgewertet, ob die Art der Zähne (einwurzelig oder mehrwurzelig) und der Kanalverlauf (gerade oder gebogen) Einfluss auf die endometrische bzw. röntgenologische Arbeitslängenbestimmung haben. Dazu wurde die ANOVA (Analysis Of Variance) verwendet.

Bei allen Untersuchungen wurde das Signifikanzniveau auf $P = 0,05$ festgelegt. Das heißt, als unterschiedlich wurden Ergebnisse interpretiert, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5% nicht zufällig ermittelt worden sind.

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit der Analysesoftware SPSS Version 13 (SPSS GmbH, München, Deutschland).

Die Untersuchungsergebnisse wurden in Tabellen und Grafiken mit Excel 2008 für Mac (Microsoft Deutschland GmbH, Unterschleißheim, Deutschland) aufbereitet.

5 Ergebnisse

5.1 Zahnart und Kanalverlauf

Insgesamt wurden 165 Wurzelkanäle in die Auswertung einbezogen. 50 Kanäle stammten von einwurzeligen und 115 Kanäle von mehrwurzeligen Zähnen (Abb. 56).

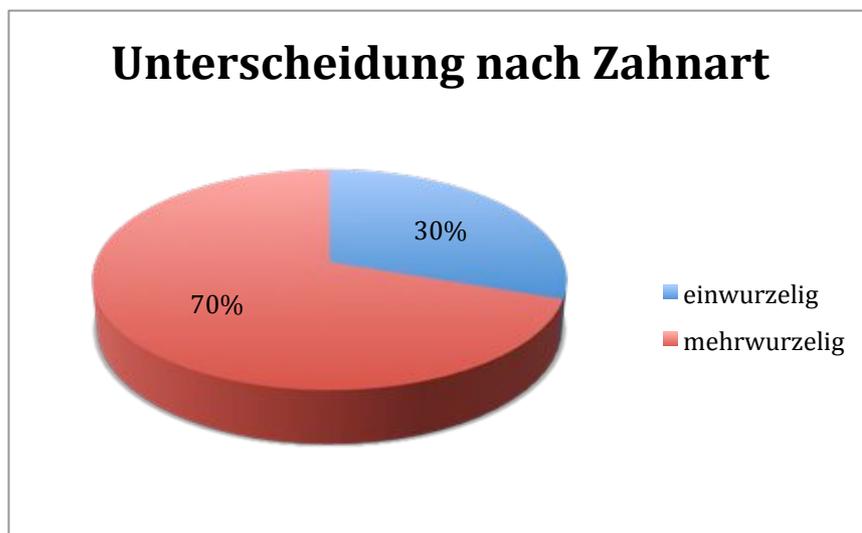


Abb. 56: Verhältnis von einwurzelig zu mehrwurzelig bezogen auf alle 165 Wurzelkanäle (relative Häufigkeit)

Die anschließende Tabelle (Tab. 8) zeigt die genaue Verteilung auf die Geräte.

| Gerät | Art | Kanäle | Anteil |
|--------------|--------------|--------|--------|
| VDW.Gold | einwurzelig | 16 | 28% |
| | mehrwurzelig | 42 | 72% |
| | Summe | 58 | 100% |
| Dentaport ZX | einwurzelig | 16 | 30% |
| | mehrwurzelig | 37 | 70% |
| | Summe | 53 | 100% |
| EndoPilot | einwurzelig | 18 | 33% |
| | mehrwurzelig | 36 | 67% |
| | Summe | 54 | 100% |
| Total | einwurzelig | 50 | 30% |
| | mehrwurzelig | 115 | 70% |
| | Summe | 165 | 100% |

Tab. 8: Ein- und mehrwurzelige Zähne bezogen auf die untersuchten Geräte

Der Wurzelkanalverlauf war bei 58% aller 165 Kanäle gebogen und bei 42% gerade (Abb. 57).



Abb. 57: Verhältnis von geradem zu gebogenem Wurzelkanalverlauf bezogen auf alle 165 Wurzelkanäle (relative Häufigkeit)

Auch in Bezug auf die einzelnen Geräte stellte sich der Kanalverlauf häufiger gebogen als gerade dar. Auf die Geräte bezogen ergab sich die in Tab. 9 dargestellte Verteilung.

| Gerät | Verlauf | Kanäle | Anteil |
|--------------|---------|--------|--------|
| VDW.Gold | gerade | 22 | 38% |
| | gebogen | 36 | 62% |
| | Summe | 58 | 100% |
| Dentaport ZX | gerade | 25 | 47% |
| | gebogen | 28 | 53% |
| | Summe | 53 | 100% |
| EndoPilot | gerade | 23 | 43% |
| | gebogen | 31 | 57% |
| | Summe | 54 | 100% |
| Total | gerade | 70 | 42% |
| | gebogen | 95 | 58% |
| | Summe | 165 | 100% |

Tab. 9: Wurzelkanalverlauf je Gerät

5.2 Fotografische Dokumentation der apikalen Region

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Auszüge aus der fotografischen Dokumentation. Die Aufnahmen sind mit der an das Stereomikroskop angeschlossenen Digitalkamera erstellt worden.

Die jeweils erste Abbildungen (Abb. 58 und Abb. 60) zeigen die native Aufnahme des von lateral eröffneten apikalen Anteils des Wurzelkanals. Auf der jeweils zweiten Abbildung (Abb. 59 und Abb. 61) ist die Lage des Foramen physiologicum (blau), der Feilenspitze (gelb) und des Foramen apicale (rot) in das Foto eingezeichnet.



Abb. 58: Der apikale Bereich des Wurzelkanals ist von lateral her eröffnet



Abb. 59: Die Lage des Foramen physiologicum (blau), der Feilenspitze (gelb) und des Foramen apicale (rot) sind mit Linien eingezeichnet



Abb. 60: Der apikale Bereich des Wurzelkanals ist von lateral her eröffnet

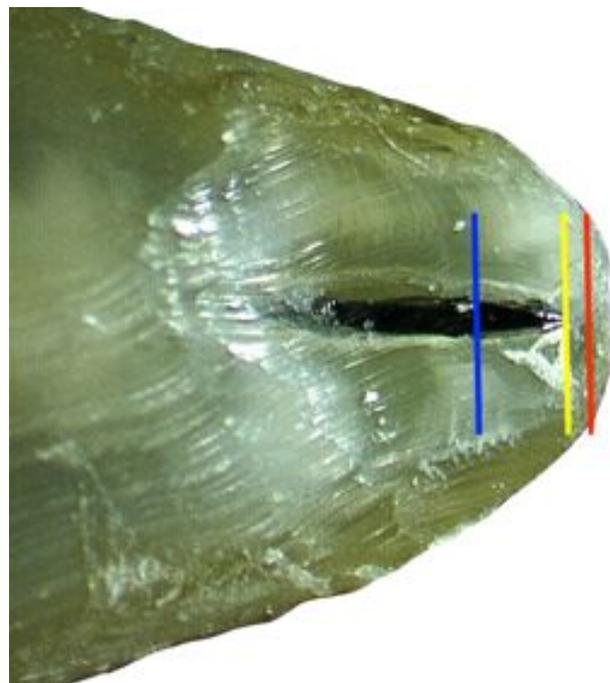


Abb. 61: Die Lage des Foramen physiologicum (blau), der Feilenspitze (gelb) und des Foramen apicale (rot) sind mit Linien eingezeichnet

5.3 Lage des physiologischen Foramens

Die Abstände zwischen dem Foramen physiologicum und dem Foramen apicale wurden am aufgeschnittenen Kanal vermessen. Deren Häufigkeitsverteilung wird in der folgenden Tabelle (Tab. 10) gezeigt.

| Abstand [mm] | Kanäle | Anteil |
|-----------------------------|--------|--------|
| > 2,00 | 1 | 0,61% |
| > 1,75 \wedge \leq 2,00 | 2 | 1,21% |
| > 1,50 \wedge \leq 1,75 | 2 | 1,21% |
| > 1,25 \wedge \leq 1,50 | 6 | 3,64% |
| > 1,00 \wedge \leq 1,25 | 13 | 7,88% |
| > 0,75 \wedge \leq 1,00 | 32 | 19,39% |
| > 0,50 \wedge \leq 0,75 | 61 | 36,97% |
| > 0,25 \wedge \leq 0,50 | 39 | 23,64% |
| > 0 \wedge \leq 0,25 | 9 | 5,45% |
| Total | 165 | 100% |

Tab. 10: Distanz zwischen Foramen physiologicum und Foramen apicale

Die maximale Distanz zwischen dem physiologischen und dem anatomischen Foramen betrug 2,03 mm, die minimale 0,12 mm. Der Mittelwert betrug 0,70 mm bei einer Standardabweichung von 0,34 mm.

Im nachfolgenden Boxplot-Diagramm (Abb. 62) entspricht die eingezeichnete Nulllinie der Position des Foramen apicale und die aufgetragenen Messwerte den Abständen zum physiologischen Foramen.

Das Boxplot-Diagramm dient der Darstellung der Lage, Streuung und Schiefe der Messwerte. Innerhalb der gelben Box liegen 50% der Messwerte. Der schwarze Balken in der Box kennzeichnet den Median, welcher durch seine Lage einen Eindruck von der Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung vermittelt. Die vertikalen Linien ober- und unterhalb der Box werden als „Whisker“ (deutsch: Schnurrhaare) bezeichnet. Die Länge der Whisker beträgt maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstands (IQR) und wird durch einen Wert aus den Daten bestimmt. Werte, die über dieser Grenze liegen, werden als Ausreißer bezeichnet. Milde Ausreißer, die zwischen $1,5 \times \text{IQR}$ und

$3 \times \text{IQR}$ liegen, werden durch kleine Kreise; extreme Werte über $3 \times \text{IQR}$ als kleine Sterne eingetragen. Gibt es keine Werte außerhalb der Whisker, so wird die Länge des Whiskers durch den maximalen bzw. minimalen Wert festgelegt.

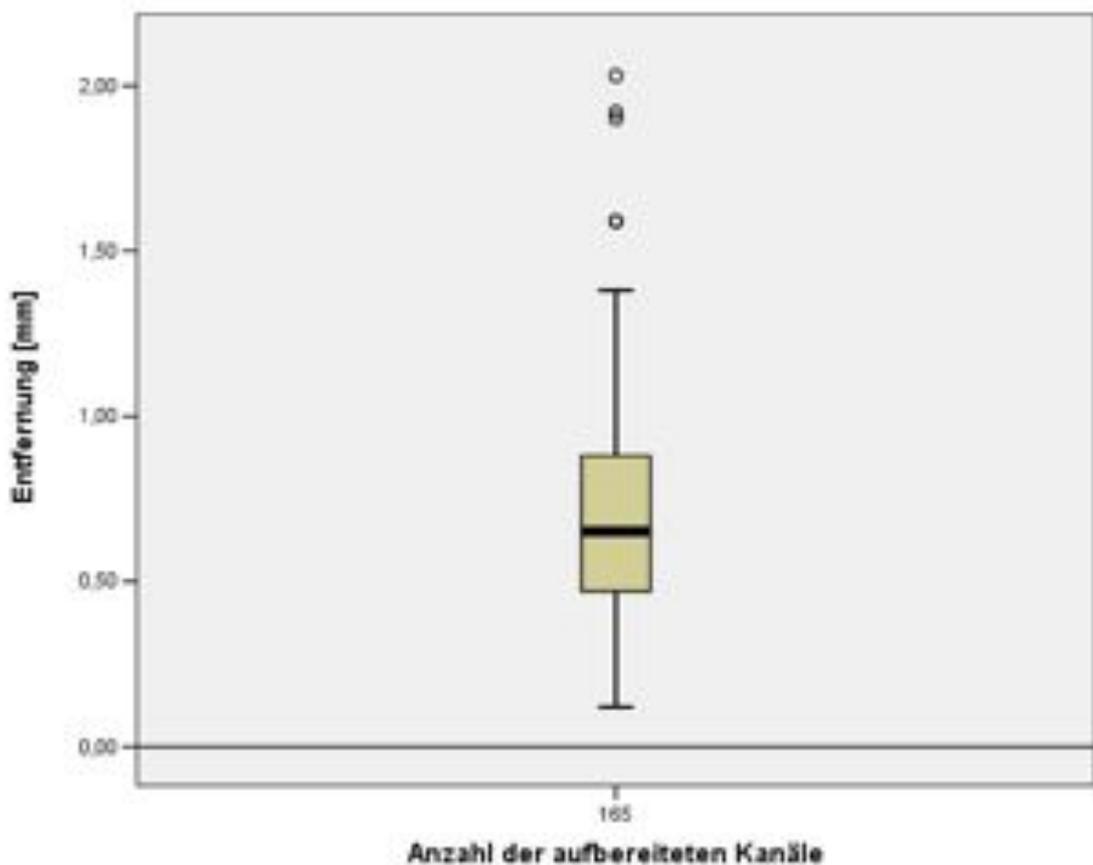


Abb. 62: Entfernung zwischen Foramen physiologicum und Foramen apicale

5.4 Röntgenologisch festgelegte Arbeitslänge

Dieser Abschnitt beschreibt die Distanz der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge zum Foramen physiologicum und zum Foramen apicale. (Rechenweg siehe S. 72 Inhalt der Datentabelle)

5.4.1 Abstand zum Foramen physiologicum

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 11) zeigt die Häufigkeitsverteilung der Lage der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge zum Foramen physiologicum.

Negative Werte bezeichnen laut Definition eine Lage koronal des Foramen physiologicum; positive Werte entsprechen einer Position apikal der physiologischen Konstriktion.

| Abstand [mm] | Kanäle | Anteil |
|-------------------------------|---------------|---------------|
| < -1,00 | 2 | 1,21% |
| < -0,75 \wedge \geq -1,00 | 8 | 4,85% |
| < -0,50 \wedge \geq -0,75 | 25 | 15,15% |
| < -0,25 \wedge \geq -0,50 | 55 | 33,33% |
| < 0 \wedge \geq -0,25 | 49 | 29,70% |
| 0 | 5 | 3,03% |
| > 0 \wedge \leq 0,25 | 11 | 6,67% |
| > 0,25 \wedge \leq 0,50 | 8 | 4,85% |
| > 0,50 \wedge \leq 0,75 | 1 | 0,61% |
| > 0,75 \wedge \leq 1,00 | 0 | 0,00% |
| > 1,00 | 1 | 0,61% |
| Total | 165 | 100% |

Tab. 11: Entfernung der Arbeitslänge zum Foramen physiologicum bei der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge

Bei der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge lag die Entfernung zum Foramen physiologicum im Mittel bei -0,27 mm +/- 0,34 mm.

- In 3% der Fälle wurde die Lage des Foramen physiologicum nach der röntgenologischen Arbeitslängenbestimmung exakt getroffen.
- Bei 84% der Kanäle wurde eine zu kurze, bei 13% eine zu lange Arbeitslänge ermittelt.
- 39% der Werte lagen in den Grenzen +/- 0,25 mm um das physiologische Foramen.
- 78% der Werte lagen in den Grenzen +/- 0,5 mm um das physiologische Foramen.
- In 98% der Fälle wurde die Arbeitslänge im Bereich zwischen 1 mm vor und 0,5 mm hinter dem physiologischen Foramen bestimmt.

Die Arbeitslänge wurde maximal um 1,05 mm zu kurz bestimmt. Die maximale Überschreitung des physiologischen Foramens bei der röntgenologischen Arbeitslängenbestimmung betrug 1,51 mm. Dieser stark abweichende Wert lässt sich dadurch erklären, dass der Wurzelkanal bei diesem Zahn hoch lateral an der Wurzel nach außen mündete. Röntgenologischer Apex und physiologisches Foramen lagen also weit voneinander entfernt.

Im nachfolgenden Boxplot-Diagramm (Abb. 63) ist der Wert durch einen Stern als extremer Ausreißer markiert. Die eingezeichnete Nulllinie entspricht der Position des Foramen physiologicum. Werte oberhalb der Linie entsprechen einer Arbeitslängenbestimmung im Bereich vor dem physiologischen Foramen, Werte unterhalb der Linie einer Position nach dem Passieren des physiologischen Foramens.

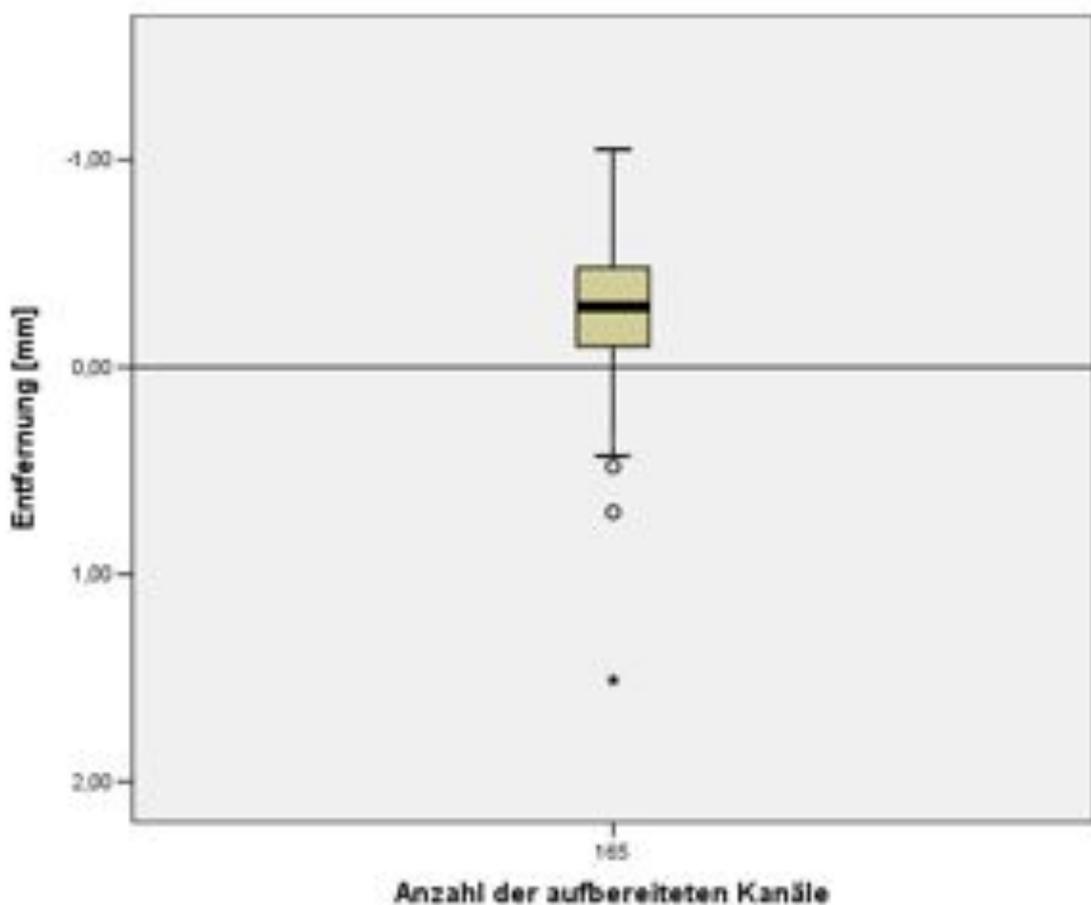


Abb. 63: Entfernung der Arbeitslänge zum Foramen physiologicum bei der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge

5.4.2 Abstand zum Foramen apicale

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 12) beschreibt die Distanz der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge zum Foramen apicale. Alle Werte sind negativ, bezeichnen also gemäß der Definition eine Arbeitslänge koronal des Foramen apicale.

| Abstand [mm] | Kanäle | Anteil |
|-------------------------------|--------|--------|
| < -2,00 | 0 | 0,00% |
| < -1,75 \wedge \geq -2,00 | 2 | 1,21% |
| < -1,50 \wedge \geq -1,75 | 5 | 3,03% |
| < -1,25 \wedge \geq -1,50 | 22 | 13,33% |
| < -1,00 \wedge \geq -1,25 | 34 | 20,61% |
| < -0,75 \wedge \geq -1,00 | 69 | 41,82% |
| < -0,50 \wedge \geq -0,75 | 25 | 15,15% |
| < -0,25 \wedge \geq -0,50 | 7 | 4,24% |
| < 0 \wedge \geq -0,25 | 1 | 0,61% |
| Total | 165 | 100% |

Tab. 12: Entfernung der Arbeitslänge zum Foramen apicale bei der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge

Im Mittel lag die Entfernung zum Foramen apicale bei der röntgenologisch festgelegte Arbeitslänge bei -0,97 mm +/- 0,29 mm.

- Die maximale Entfernung betrug -1,87 mm, die minimale -0,08 mm.
- Die minimale Entfernung (-0,08 mm) wurde bei dem Zahn bestimmt, bei dem der Wurzelkanal untypisch hoch lateral an der Wurzel nach außen mündete.
- In 91% der Fälle wurde die Arbeitslänge so bestimmt, dass die Aufbereitung zwischen 0,5 und 1,5 mm vor dem Foramen apikale geendet hätte.
- Nach keiner der erfolgten röntgenologischen Arbeitslängenbestimmungen wäre die Aufbereitung über das Foramen apikale hinaus erfolgt.

Im nachfolgenden Boxplot-Diagramm (Abb. 64) entspricht die eingezeichnete Nulllinie der Lage des Foramen apicale. Alle eingetragenen Werte liegen oberhalb der Nulllinie, entsprechen also einer Arbeitslängenbestimmung innerhalb des Wurzelkanals.

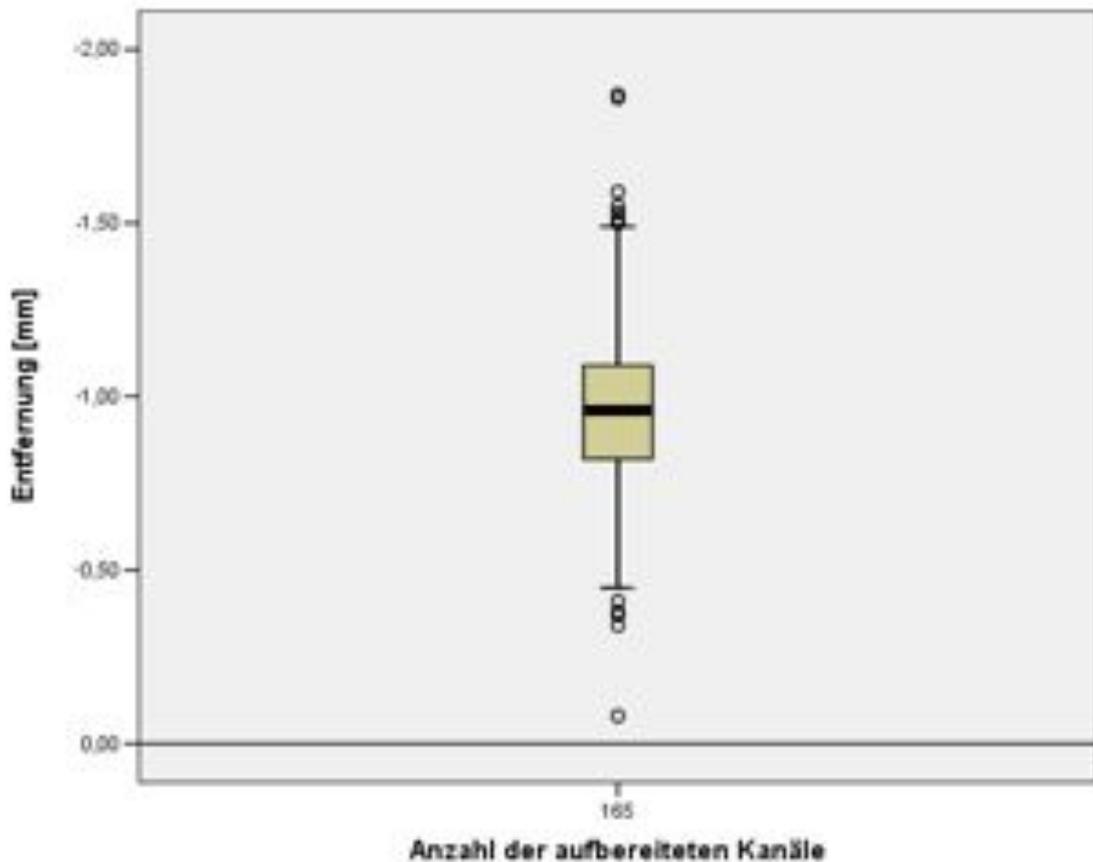


Abb. 64: Entfernung der Arbeitslänge zum Foramen apicale bei der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge

5.5 Endometrische Arbeitslängenbestimmung

Dieser Abschnitt beschreibt die nach der Eröffnung des Wurzelkanals ausgemessene Distanz der Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum und zum Foramen apicale nach der Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Arbeitslängenbestimmung.

5.5.1 Abstand zum Foramen physiologicum

Die zwei nachfolgenden Tabellen (Tab. 13 und Tab. 14) beschreiben die Entfernung der Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum nach der Aufbereitung mit endometrischer Arbeitslängenbestimmung. Negative Werte bezeichnen laut Definition eine Lage der Feilenspitze koronal des Foramen physiologicum; positive Werte entsprechen einer Feilenposition apikal der physiologischen Konstriktion.

| Abstand [mm] | VDW.Gold n = 58 | Dentaport ZX n = 53 | EndoPilot n = 54 |
|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| < -0,50 \wedge \geq -0,75 | 0 | 0 | 0 |
| < -0,25 \wedge \geq -0,50 | 1 | 0 | 0 |
| < 0 \wedge \geq -0,25 | 3 | 3 | 2 |
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| > 0 \wedge \leq 0,25 | 9 | 10 | 12 |
| > 0,25 \wedge \leq 0,50 | 18 | 22 | 18 |
| > 0,50 \wedge \leq 0,75 | 19 | 7 | 12 |
| > 0,75 \wedge \leq 1,00 | 6 | 7 | 4 |
| > 1,00 | 1 | 2 | 3 |

Tab. 13: Entfernung der Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum nach Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Arbeitslängenbestimmung (absolute Häufigkeit)

| Abstand [mm] | VDW.Gold n = 58 | Dentaport ZX n = 53 | EndoPilot n = 54 |
|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| < -0,50 \wedge \geq -0,75 | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| < -0,25 \wedge \geq -0,50 | 1,72% | 0,00% | 0,00% |
| < 0 \wedge \geq -0,25 | 5,17% | 5,66% | 3,70% |
| 0 | 1,72% | 3,77% | 5,56% |
| > 0 \wedge \leq 0,25 | 15,52% | 18,87% | 22,22% |
| > 0,25 \wedge \leq 0,50 | 31,03% | 41,51% | 33,33% |
| > 0,50 \wedge \leq 0,75 | 32,76% | 13,21% | 22,22% |
| > 0,75 \wedge \leq 1,00 | 10,34% | 13,21% | 7,41% |
| > 1,00 | 1,72% | 3,77% | 5,56% |

Tab. 14: Entfernung der Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum nach Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Arbeitslängenbestimmung (relative Häufigkeit)

Die Aufbereitung bis zum physiologischen Foramen, an dem die Aufbereitung idealer Weise enden soll, erfolgte beim Gerät von der Firma VDW in 1,72%, beim Gerät von Morita in 3,77% und beim Gerät von Schlumbohm in 5,56% der Fälle.

Beim Gerät von VDW wurde in 91,38%, beim Gerät von Morita in 90,57% und beim Gerät von Schlumbohm in 90,74% der Fälle das physiologische Foramen überschritten. Beim Gerät von VDW um maximal 1,11 mm, beim Gerät von Morita um maximal 1,20 mm und beim Gerät von Schlumbohm um maximal 1,29 mm.

Im Mittel betrug der Abstand zwischen Instrumentenspitze und Foramen physiologicum beim Gerät von VDW 0,45 mm +/- 0,29 mm, beim Gerät von Morita 0,42 mm +/- 0,30 mm und beim Gerät von Schlumbohm 0,43 mm +/- 0,31 mm.

In dem nachfolgenden Boxplot-Diagramm (Abb. 65) entspricht die eingezeichnete Nulllinie der Position des Foramen physiologicum. Werte oberhalb der Linie entsprechen einem Stopp der Aufbereitung vor dem physiologischen Foramen, Werte unterhalb der Linie einem Stopp nach dem Passieren des physiologischen Foramens.

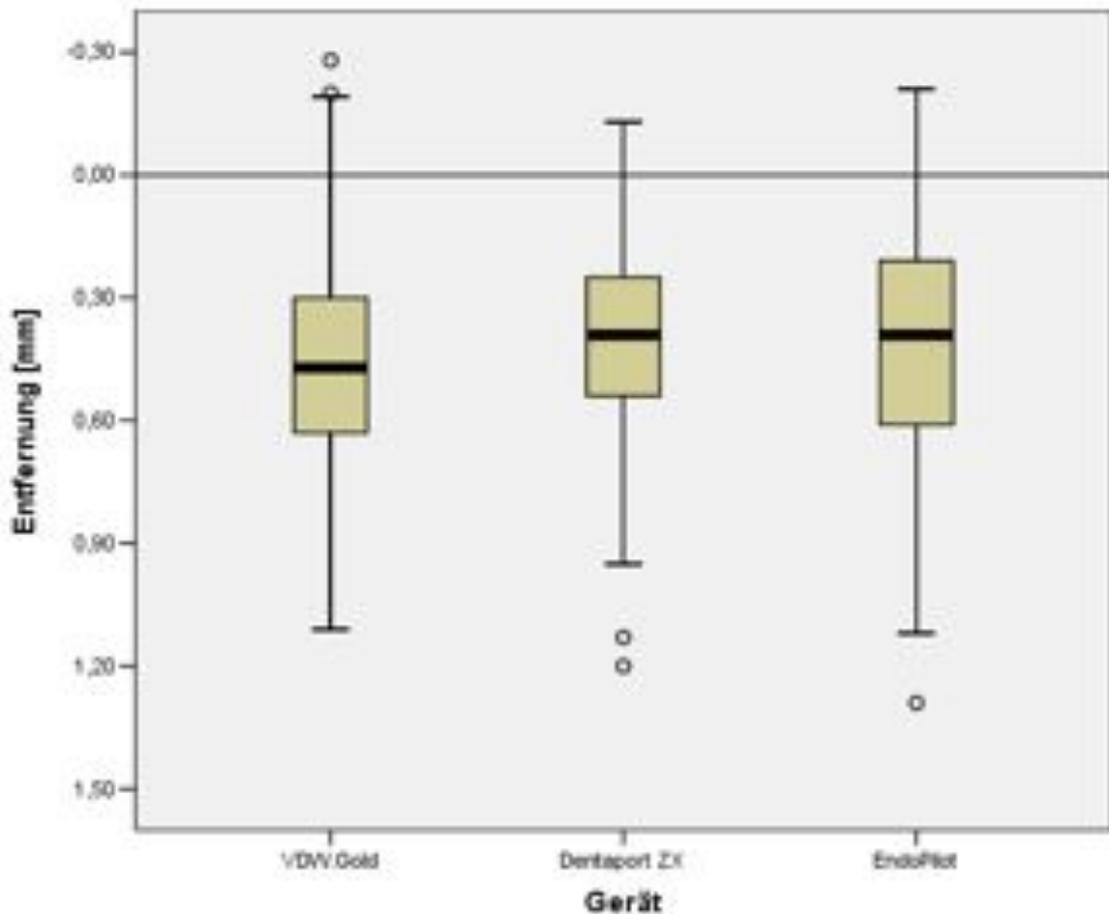


Abb. 65: Entfernung der Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum nach Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Arbeitslängenbestimmung

5.5.2 Abstand zum Foramen apicale

Die zwei nachfolgenden Tabellen (Tab. 15 und Tab. 16) beschreiben die Entfernung der Instrumentenspitze zum Foramen apicale nach der Aufbereitung mit endometrisch bestimmter Arbeitslänge. Negative Werte bezeichnen laut Definition eine Lage der Feilenspitze koronal des Foramen apicale; positive Werte entsprechen einer Feilenposition außerhalb der Wurzel.

| Abstand [mm] | VDW.Gold n = 58 | Dentaport ZX n = 53 | EndoPilot n = 54 |
|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| < -1,00 | 2 | 1 | 3 |
| < -0,75 \wedge \geq -1,00 | 3 | 5 | 4 |
| < -0,50 \wedge \geq -0,75 | 5 | 7 | 5 |
| < -0,25 \wedge \geq -0,50 | 9 | 13 | 16 |
| < 0 \wedge \geq -0,25 | 13 | 14 | 15 |
| 0 | 1 | 6 | 4 |
| > 0 \wedge \leq 0,25 | 24 | 7 | 6 |
| > 0,25 \wedge \leq 0,50 | 1 | 0 | 1 |
| > 0,50 \wedge \leq 0,75 | 0 | 0 | 0 |

Tab. 15: Entfernung der Instrumentenspitze zum Foramen apicale nach Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Arbeitslängenbestimmung (absolute Häufigkeit)

| Abstand [mm] | VDW.Gold n = 58 | Dentaport ZX n = 53 | EndoPilot n = 54 |
|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| < -1,00 | 3,45% | 1,89% | 5,56% |
| < -0,75 \wedge \geq -1,00 | 5,17% | 9,43% | 7,41% |
| < -0,50 \wedge \geq -0,75 | 8,62% | 13,21% | 9,26% |
| < -0,25 \wedge \geq -0,50 | 15,52% | 24,53% | 29,63% |
| < 0 \wedge \geq -0,25 | 22,41% | 26,42% | 27,78% |
| 0 | 1,72% | 11,32% | 7,41% |
| > 0 \wedge \leq 0,25 | 41,38% | 13,21% | 11,11% |
| > 0,25 \wedge \leq 0,50 | 1,72% | 0,00% | 1,85% |
| > 0,50 \wedge \leq 0,75 | 0,00% | 0,00% | 0,00% |

Tab. 16: Entfernung der Instrumentenspitze zum Foramen apicale nach Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Arbeitslängenbestimmung (relative Häufigkeit)

Passiert die Instrumentenspitze das Foramen apicale, befindet sie sich außerhalb des Zahnes. Dies war beim Gerät VDW.Gold in 43,10% und bei den Geräten Dentaport ZX und EndoPilot jeweils in 13,21% bzw. 12,96% der Wurzelkanalaufbereitungen mit endometrischer Arbeitslängenbestimmung der Fall.

Alle Überschreitungen erfolgten, bis auf jeweils eine Ausnahme beim Gerät von VDW (0,26 mm) und eine beim Gerät von Schlumbohm (0,41 mm), um maximal 0,21 mm.

Im Mittel erreichten die Geräte folgende Abstände zwischen Instrumentenspitze und Foramen apicale:

- VDW.Gold -0,17 +/- 0,38 mm
- Dentaport ZX -0,30 +/- 0,35 mm
- EndoPilot -0,33 +/- 0,36 mm

In dem nachfolgenden Boxplot-Diagramm (Abb. 66) entspricht die eingezeichnete Nulllinie der Position des Foramen apicale. Werte oberhalb der Linie entsprechen einem Stopp der Aufbereitung vor dem Foramen apikale, Werte unterhalb der Linie entsprechen einer Position der Instrumentenspitze außerhalb des Zahnes.

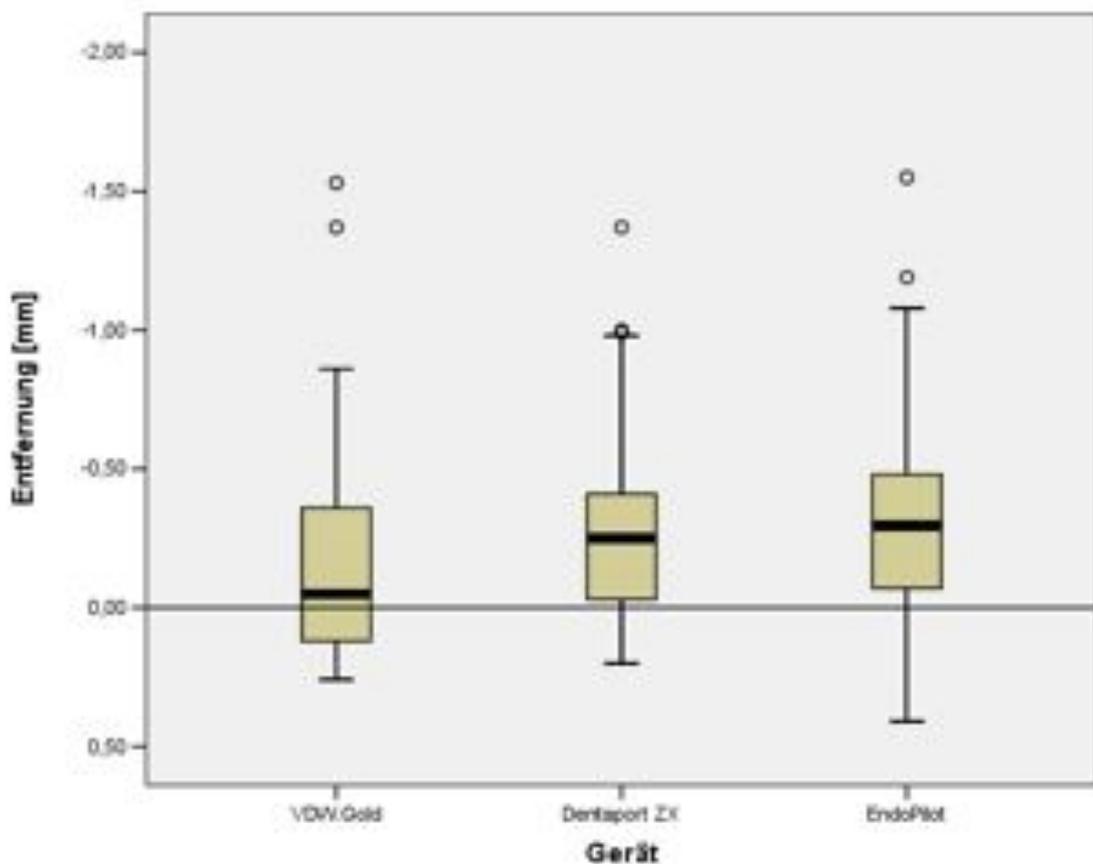


Abb. 66: Entfernung der Instrumentenspitze zum Foramen apicale nach Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Arbeitslängenbestimmung

5.6 Vergleich Röntgen / Endometrie

Die nachfolgenden Tabellen (Tab. 17 und Tab. 18) beschreiben die Abweichung zwischen der röntgenologisch festgelegten und der endometrisch ermittelten Arbeitslänge. Negative Werte entsprechen einer kürzeren endometrisch ermittelten Arbeitslänge, positive Werte entsprechen einer längeren.

| Abstand [mm] | VDW.Gold n = 58 | Dentaport ZX n = 53 | EndoPilot n = 54 |
|---------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| -1,00 | 0 | 0 | 1 |
| -0,50 | 0 | 0 | 0 |
| 0,00 | 4 | 5 | 5 |
| 0,50 | 18 | 26 | 26 |
| 1,00 | 34 | 21 | 19 |
| 1,50 | 2 | 1 | 3 |

Tab. 17: Abweichung der endometrisch ermittelten Arbeitslänge von der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge (absolute Häufigkeit)

| Abstand [mm] | VDW.Gold n = 58 | Dentaport ZX n = 53 | EndoPilot n = 54 |
|---------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| -1,00 | 0,00% | 0,00% | 1,85% |
| -0,50 | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| 0,00 | 6,90% | 9,43% | 9,26% |
| 0,50 | 31,03% | 49,06% | 48,15% |
| 1,00 | 58,62% | 39,62% | 35,19% |
| 1,50 | 3,45% | 1,89% | 5,56% |

Tab. 18: Abweichung der endometrisch ermittelten Arbeitslänge von der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge (relative Häufigkeit)

Bei allen Geräten wurde im Mittel endometrisch eine längere Arbeitslänge ermittelt als röntgenologisch. Die Werte im Einzelnen:

- VDW.Gold 0,79 +/- 0,34 mm
- Dentaport ZX 0,67 +/- 0,34 mm
- EndoPilot 0,66 +/- 0,43 mm

Bei dem Messergebnis mit der Abweichung um -1 mm zwischen endometrisch und röntgenologisch ermittelter Arbeitslänge handelte es sich um den

Wurzelkanal, der hoch lateral an der Wurzel nach außen mündete. Bezieht man diesen Messwert nicht mit ein, ergibt sich eine um 0,69 +/- 0,37 mm längere endometrische Arbeitslänge.

5.7 Auswertung der Ergebnisse

Die statistische Auswertung gliedert sich in einen beschreibenden und einen analytischen Teil. Im ersten Abschnitt werden die auf den vorherigen Seiten vorgestellten statistisch relevanten Werte zusammengefasst dargestellt. Im zweiten Abschnitt werden die Unterschiede der Ergebnisse bei der Bestimmung des physiologischen Foramens zwischen den drei Geräte und der Röntgentechnik untersucht. Weiter wird überprüft, ob Faktoren wie der Kanalverlauf oder die Art des Zahnes einen Einfluss auf die Arbeitslängenbestimmung hatten.

5.7.1 Deskriptive Statistik

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 19) zeigt die Grenz- und Mittelwerte mit Standardabweichung der Entfernung von Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum und Foramen apicale nach der Aufbereitung mit gleichzeitig endometrisch bestimmter Arbeitslänge und bei der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge.

| Gerät | Entfernung der Instrumentenspitze [mm] zum | Anzahl | Minimum | Maximum | Mittelwert | SD |
|--------------|--|--------|---------|---------|------------|---------|
| VDW.Gold | Foramen physiologicum | 58 | -0,28 | 1,11 | 0,4517 | 0,28977 |
| | Foramen apicale | 58 | -1,53 | 0,26 | -0,1655 | 0,38296 |
| Dentaport ZX | Foramen physiologicum | 53 | -0,13 | 1,20 | 0,4236 | 0,29713 |
| | Foramen apicale | 53 | -1,37 | 0,20 | -0,3043 | 0,35023 |
| EndoPilot | Foramen physiologicum | 54 | -0,21 | 1,29 | 0,4267 | 0,30835 |
| | Foramen apicale | 54 | -1,55 | 0,41 | -0,3307 | 0,36358 |
| Röntgen | Foramen physiologicum | 165 | -1,05 | 1,51 | -0,2746 | 0,33802 |
| | Foramen apicale | 165 | -1,87 | -0,08 | -0,9733 | 0,28543 |

Tab. 19: Grenz- und Mittelwerte mit Standardabweichung (SD) der Entfernung von Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum und Foramen apicale nach Aufbereitung mit endometrisch bestimmter Arbeitslänge und bei der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge

5.7.2 Analytische Statistik

Um eventuelle Unterschiede in der Fähigkeit der Geräte bzw. des Verfahrens, die Position des physiologischen Foramens zu ermitteln, nachzuweisen, wurden mittels der Software SPSS Varianzanalysen durchgeführt.

Durch einen paarweisen Vergleich zwischen den drei Geräten untereinander und der Röntgentechnik mit Hilfe des LSD-Tests wurden die signifikanten Unterschiede ($P < 0,05$) ermittelt.

Der erste Vergleich bezieht sich auf Fähigkeit, die Position des physiologischen Foramens zu ermitteln (Tab. 20).

| Gerät/Methode | Vergleich | Diff. Mittelwerte [mm] | Signifikanz | Sig. < 0,05 |
|---------------|--------------|------------------------|-------------|-------------|
| VDW.Gold | Dentaport ZX | 0,02814 | 0,643 | |
| | EndoPilot | 0,02506 | 0,678 | |
| | Röntgen | 0,72633 | 0,000 | X |
| Dentaport ZX | VDW.Gold | -0,02814 | 0,643 | |
| | EndoPilot | -0,00308 | 0,960 | |
| | Röntgen | 0,69819 | 0,000 | X |
| EndoPilot | VDW.Gold | -0,02506 | 0,678 | |
| | Dentaport ZX | 0,00308 | 0,960 | |
| | Röntgen | 0,70127 | 0,000 | X |
| Röntgen | VDW.Gold | -0,72633 | 0,000 | X |
| | Dentaport ZX | -0,69819 | 0,000 | X |
| | EndoPilot | -0,70127 | 0,000 | X |

Tab. 20: Signifikante Unterschiede bei der Ermittlung des physiologischen Foramens

Dabei wurde zwischen den endometrisch ermittelten Arbeitslängen der untersuchten Geräte kein signifikanter Unterschied festgestellt. Alle drei Geräte unterscheiden sich aber signifikant von der röntgenologischen Methode.

Das folgende Diagramm (Abb. 67) verdeutlicht dies anhand der Mittelwerte der Entfernung zwischen Instrumentenspitze und Foramen physiologicum. Die eingezeichnete Nulllinie entspricht dabei der Position des physiologischen Foramens.

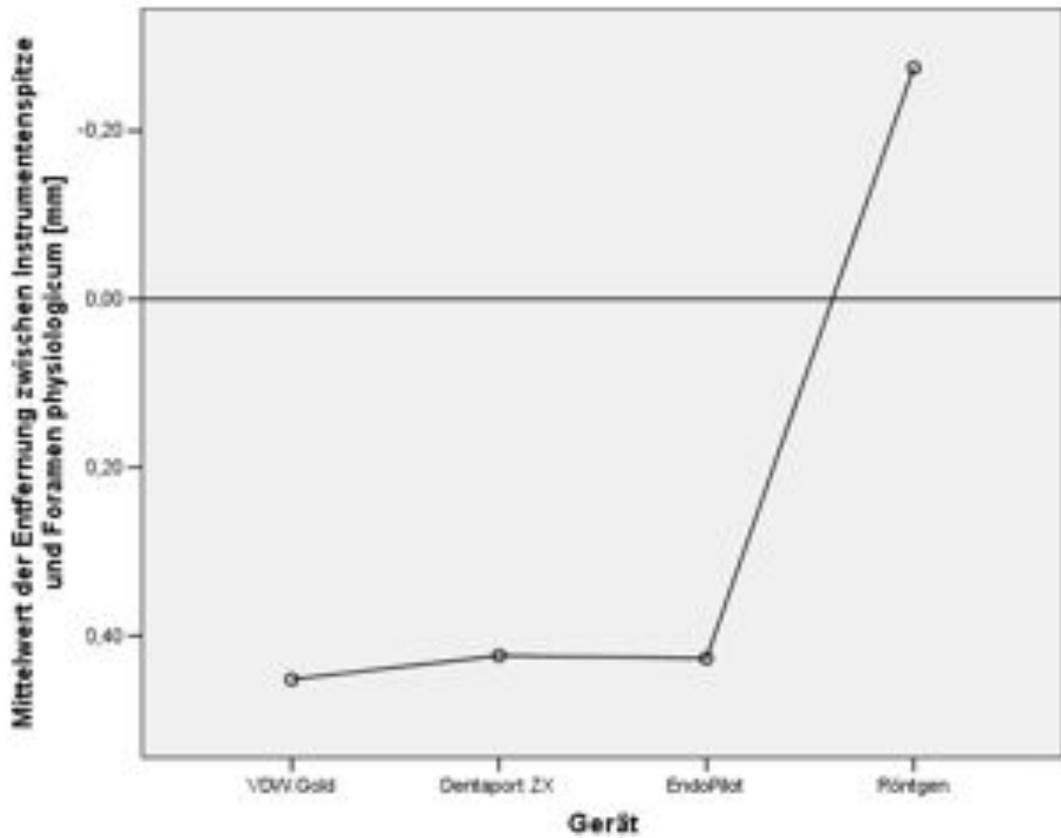


Abb. 67: Mittelwert der Entfernung zwischen Instrumentenspitze und Foramen physiologicum bei den mit den drei Geräten endometrisch bestimmten Arbeitslängen und den röntgenologisch festgelegten Arbeitslängen

Ein zweiter Vergleich untersucht die Unterschiede bezüglich der Lage der Instrumentenspitze zum Foramen apicale (Tab. 21).

| Gerät/Methode | Vergleich | Diff. Mittelwerte [mm] | Signifikanz | Sig. < 0,05 |
|---------------|--------------|------------------------|-------------|-------------|
| VDW.Gold | Dentaport ZX | 0,13882 | 0,027 | X |
| | EndoPilot | 0,16522 | 0,008 | X |
| | Röntgen | 0,80776 | 0,000 | X |
| Dentaport ZX | VDW.Gold | -0,13882 | 0,027 | X |
| | EndoPilot | 0,0264 | 0,678 | |
| | Röntgen | 0,66893 | 0,000 | X |
| EndoPilot | VDW.Gold | -0,16522 | 0,008 | X |
| | Dentaport ZX | -0,0264 | 0,678 | |
| | Röntgen | 0,64253 | 0,000 | X |
| Röntgen | VDW.Gold | -0,80776 | 0,000 | X |
| | Dentaport ZX | -0,66893 | 0,000 | X |
| | EndoPilot | -0,64253 | 0,000 | X |

Tab. 21: Signifikante Unterschiede bezüglich der Lage der Instrumentenspitze zum Foramen apicale

Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie vorher bezüglich der Lage der Instrumentenspitze zum physiologischen Foramen. Die Geräte weichen bezüglich der Lage der Instrumentenspitze zum Foramen apicale von der röntgenologischen Methode signifikant ab.

Zusätzlich werden hier auch signifikante Unterschiede zwischen den Geräten VDW.Gold und Dentaport ZX ($P = 0,027$) sowie VDW.Gold und EndoPilot ($P = 0,008$) festgestellt.

Das folgende Diagramm (Abb. 68) veranschaulicht das Ergebnis des LSD-Tests. Die Unterschiede zwischen den Geräten werden deutlich, erscheinen aber im Vergleich zur röntgenologischen Methode marginal. Die eingezeichnete Nulllinie entspricht der Position des Foramen apicale.

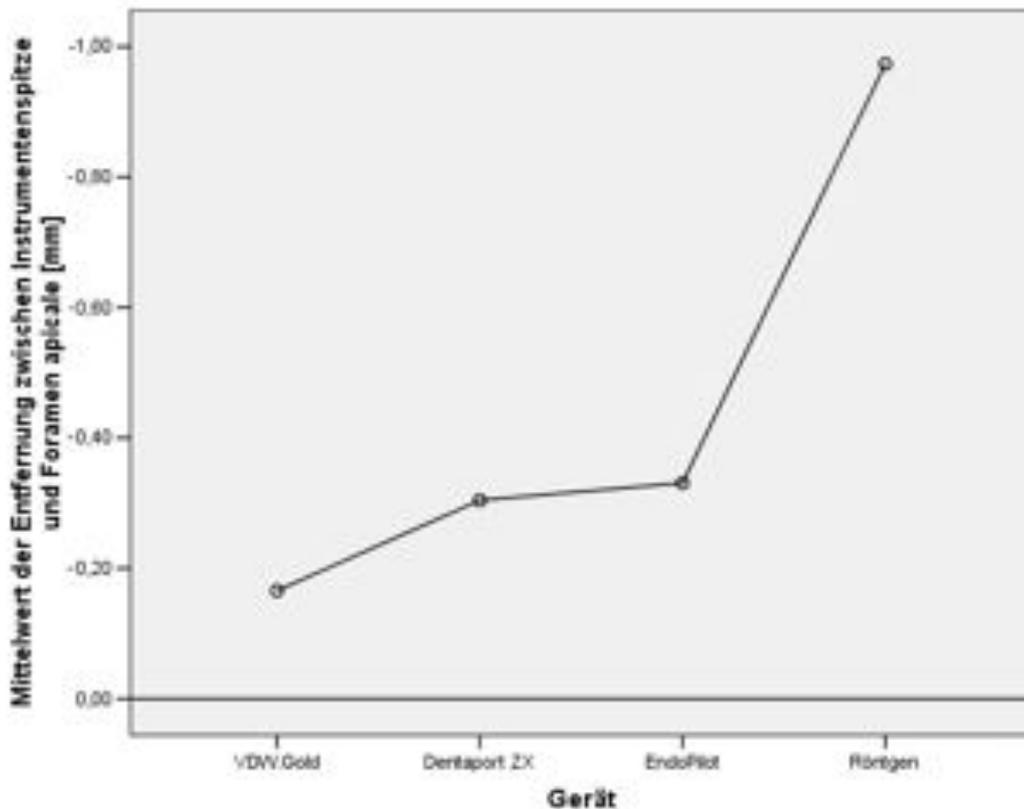


Abb. 68: Mittelwert der Entfernung zwischen Instrumentenspitze und Foramen apicale bei den mit den drei Geräten endometrisch bestimmten Arbeitslängen und den röntgenologisch festgelegten Arbeitslängen

Als weitere Fragestellung wurde analysiert, ob die Art des Zahnes mit dem Unterscheidungskriterium einwurzelig oder mehrwurzelig, oder der Kanalverlauf mit dem Merkmal gerade oder gebogen, einen Einfluss auf die endometrische und röntgenologische Arbeitslängenbestimmung hat.

Zu den Messergebnissen jedes Kanals wurde vermerkt, ob dieser in einem ein- oder mehrkanaligen Zahn liegt, und ob er gerade oder gebogen ist. Mit Hilfe von ANOVA-Tests wurde analysiert, ob diese Merkmale Einfluss auf die Messergebnisse hatten.

- Bei keinem Gerät konnte eine Abhängigkeit zwischen der Art des Zahnes oder dem Kanalverlauf und der Messfunktion gefunden werden, weder auf die Lage der Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum, noch auf die Lage der Instrumentenspitze zum Foramen apikale bezogen.

- Auch bei der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge konnte kein Einfluss von Zahnart oder Kanalverlauf auf die Entfernung der Arbeitslänge zum physiologischen bzw. anatomischen Foramen festgestellt werden.

Kanäle mit geringer Distanz zwischen dem physiologischen und anatomischen Foramen stellen eine besondere Herausforderung für die Ermittlung der Aufbereitungslänge dar. Abschließend wurde daher untersucht, ob die Distanzen bei den auf die drei Geräte verteilten Gruppen Unterschiede aufwiesen. Es konnte mittels einer ANOVA kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Untersuchungsgruppen festgestellt werden ($P > 0,05$).

6 Diskussion

6.1 Methodenkritik

6.1.1 Modellkritik

Es wurden drei handelsübliche Endodontiegeräte zur maschinellen Aufbereitung bei gleichzeitiger endometrischer Arbeitslängenbestimmung untereinander, sowie mit der röntgenologischen Arbeitslängenbestimmung verglichen. Alle Geräte haben eine CE-Zulassung.

Zwei der untersuchten Geräte arbeiten nach dem heute üblichen Impedanzquotientenverfahren; der EndoPilot nach einem neuen Impulsverfahren. Für die endometrische Längenbestimmung ist bei diesen Messverfahren nicht das den Zahn umgebende Gewebe für die Bestimmung der Arbeitlänge entscheidend, sondern das Passieren der physiologischen Konstriktion mit der Feilenspitze (HÖR et al. 2005, VOSS und SIEBENKEES 1994). Dies ermöglicht die Durchführung einer Studie mit extrahierten Zähnen, um eine Aussage über die untersuchten Geräte zu gewinnen, von der auf die klinische Anwendbarkeit geschlossen werden kann.

In vitro ist es zudem möglich, Versuche in annähernd gleicher, standardisierter Vorgehensweise an einer großen Anzahl von Zähnen durchzuführen und somit Störfaktoren auf ein Mindestmaß zu reduzieren, was wiederum zu einer besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen führt.

Methodisch können die Messungen mit den zu vergleichenden Geräten entweder an denselben Zähnen (GALLER 2002, HÖR et al. 2005), oder an unterschiedlichen Zähnen durchgeführt werden (STOLL 2007). Bei dieser Untersuchung wurde die zweite Variante gewählt, da die endometrische Arbeitslängenbestimmung mit rotierender Feile erfolgte und somit bei jeder Messung die Gefahr besteht, dass die Struktur der physiologischen Konstriktion verändert wird. Nachfolgende Messungen am selben Zahn mit den weiteren

Geräten würden dann nicht mehr unter gleichen Bedingungen stattfinden und die Ergebnisse folglich nicht mehr vergleichbar sein.

Pro Gerät wurden mindestens 53 Wurzelkanäle in die Auswertung einbezogen. Die Anzahl orientiert sich an der in vergleichbaren aktuellen Studien zur Genauigkeit der endometrischen Arbeitslängenbestimmung verwendeten Anzahl von 40 bis 65 Kanälen (FELIPPE 2008, GALLER 2002, STOLL 2007).

Die Zähne wurden für die Versuchsdurchführung mit lichthärtendem Kunststoff in einem Röntgenmodell fixiert. Kochsalzlösung diente als Medium zwischen Zahnwurzel und Wangenelektrode. Dieser Versuchsaufbau ist für die endometrische Arbeitslängenbestimmung an extrahierten Zähnen ein Standardverfahren.

KOBAYASHI und SUDA (1994) führten die Methode der Quotientenbildung bei Endometriegeräten mit einer Studie ein, bei der sie als Modell ebenfalls eine Wanne mit Salzlösung benutzten, in welche die extrahierten Zähne, auf einer Plexiglasplatte montiert, getaucht wurden. MARKULA-LIEGAU (1996) benutzte bei ihrer Studie über die Messgenauigkeit des Endometriegeräts Root ZX ebenfalls dieses Modell. OISHI et al. (2002) benutzten ein Kunststoffgefäß mit Kochsalzlösung, in dessen Deckel der Zahn mit Composit befestigt wurde.

Es sind jedoch auch andere Möglichkeiten der Einbettung der Zähne beschrieben: DONELLY (1993) nutzte handelsübliche Gelatine, die er mit einer Kochsalzlösung anrührte. Nach dem Aufkochen und Erkalten wurden die Zähne in das Gelee gedrückt und die Messungen durchgeführt. Die Zähne mussten während der Messung zusätzlich vom Autor gehalten werden. KATZ (1996) und THOMAS et al. (2003) nutzten für ihre Studien Alginat zur Einbettung der Zähne. TINAZ et al. (2002) beschrieben ein Lehrmodell, um die Verwendung der Endometriegeräte zu erklären. Es bestand aus dem Phantommodell eines Kiefers, in dem die extrahierten Zähne mit Alginat fixiert wurden. STOLL (2007) beschrieb ein neues Modell, bei dem die Zähne in einen mit Ringerlösung getränkten Feuchtsteckschaum eingedrückt werden. Die

Blumensteckschaumblöcke für Frischblumengestecke bestehen aus einem phenolischen Schaumstoff, welcher sehr gut Wasser aufnimmt und speichert.

Aus den folgenden Überlegungen wurde unter den verschiedenen Möglichkeiten die Verwendung eines Röntgenmodells mit Kochsalzlösung und Kunststoffhalterung für die Zähne ausgewählt:

- Das Modell ist in ähnlichem Aufbau in der Literatur als ein Standardverfahren beschrieben.
- Die Zähne müssen während der Aufbereitung nicht manuell fixiert werden und haben eine definierte, sichere Lage.
- Die röntgenologische Arbeitslängenbestimmung, die Aufbereitung und die Kontrollaufnahme der Aufbereitung können im gleichen Modell unter exakt reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt werden.

6.1.2 Röntgenologische Arbeitslängenbestimmung

Alle durchgeführten Röntgenaufnahmen wurden mittels digitaler Sensortechnik angefertigt. Dies ermöglichte, bei gleichem diagnostischen Nutzen, eine einfachere Handhabung und schnellere Verfügbarkeit der Röntgenbilder, als dies bei konventioneller Röntgentechnik der Fall gewesen wäre.

Für die möglichst größenrichtige Darstellung des Zahnes wurden alle Röntgenaufnahmen in der heute üblichen Paralleltechnik angefertigt. Filmebene und Zahnachse sind bestmöglich parallel angeordnet, wobei der Zentralstrahl senkrecht darauf trifft. Diese geometrische Anordnung ist in vitro deutlich einfacher zu realisieren als in vivo.

Im Vergleich mit einem Zahnfilm bei der konventionellen Röntgentechnik bereiten drei Eigenschaften des digitalen Röntgensensors im klinischen Alltag Schwierigkeiten:

- die Kabelverbindung zwischen Sensor und Computer
- die größeren Abmessungen

- die starre Bauweise

Am in vitro Modell lässt sich die digitale Röntgentechnik einfacher realisieren als am Patienten.

Zusätzlich werden bei einer Patientenaufnahme alle Strukturen zwischen Röntgenstrahler und Sensor als Summationsaufnahme abgebildet. Weichgewebe, knöcherne Strukturen und Zahngewebe überlagern sich bei der Aufnahme. Die Aufnahme eines extrahierten Zahnes in einem für Röntgenstrahlen transluzenten Modell ermöglicht, insbesondere bei mehrwurzligen Zähnen, eine eindeutigere Auswertung der Aufnahme.

Die in vitro Methode erleichtert die röntgenologische Messung. Trotzdem können die Ergebnisse bezüglich der Genauigkeit der röntgenologischen Methode auf den klinischen Alltag übertragen werden.

Bei der röntgenologischen Arbeitslängenbestimmung sollten durch die eingeführten Instrumente bei der Messlängenaufnahme keine Veränderungen an der physiologischen Konstriktion entstehen. Deswegen wurden möglichst dünne Instrumente (ISO-Größe 10) verwendet. Des Weiteren wurde versucht, nicht mit der Instrumentenspitze bis zum physiologischen Foramen vorzudringen.

Für die Sicherheitstiefe bei der Messlängenaufnahme wurden von der am digitalen Bild ermittelten Strecke zwischen dem projizierten koronalen Referenzpunkt und dem röntgenologischen Apex 2 mm abgezogen. Da in Paralleltechnik hergestellte Aufnahmen nur eine leichte Vergrößerung aufweisen, stellte sich die Instrumentenspitze entsprechend ca. 2 mm vom röntgenologischen Apex entfernt dar. Die durchschnittliche Distanz zwischen röntgenologischem Apex und Foramen physiologicum beträgt etwa 1 mm. Bis hier hin soll die Arbeitslänge gehen. Ohne das Instrument vorzuschieben und die Aufnahme zu wiederholen, wurde die verbleibende Distanz zur Messlänge addiert, um die Arbeitslänge zu erhalten.

Die Instrumentenspitze befand sich also bei der Messlängenaufnahme meist weiter vom zu schützenden physiologischen Foramen entfernt als die festgelegte Arbeitslänge. Die nachfolgende Abbildung (Abb. 69) soll die Verhältnisse verdeutlichen.

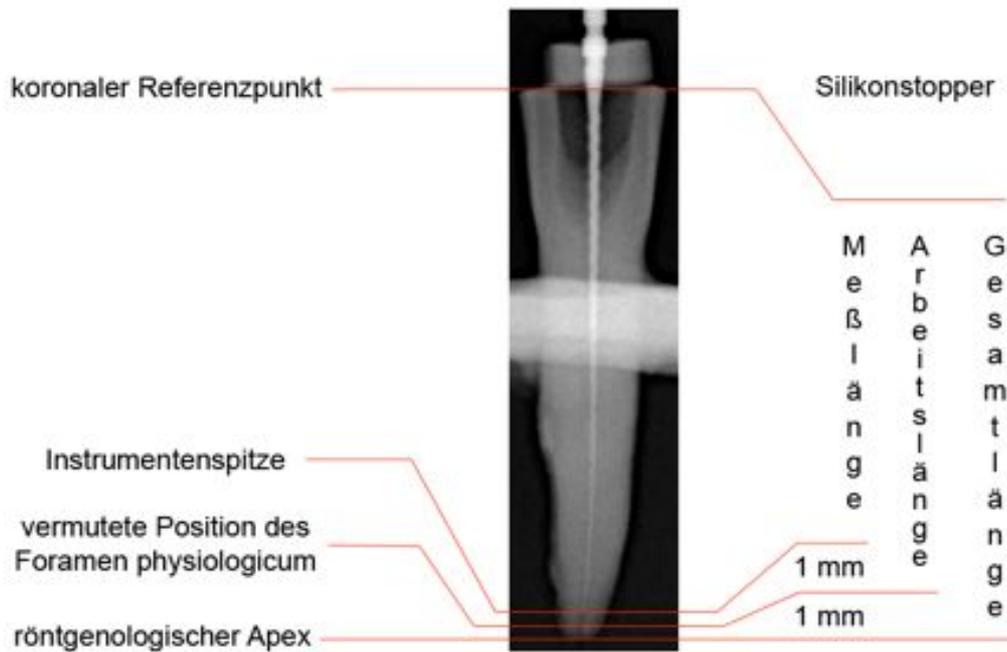


Abb. 69: Meßlängenaufnahme mit Beschriftungen

Die Abweichung von Messlänge zu festgelegter Arbeitslänge betrug maximal 2 mm und war damit im von der DGZMK (2004) empfohlenen Toleranzbereich, ab dem die Aufnahme, nach Korrektur der Messlänge, wiederholt werden sollte.

Zeigte sich die Instrumentenspitze bei der Messaufnahme näher als 1 mm am röntgenologischen Apex, wurde der Wurzelkanal verworfen.

Dies Vorgehen sicherte bestmöglich die Unversehrtheit der apikalen Konstriktion für die folgende endometrische Messung.

6.1.3 Aufbereitung

Die Aufbereitung erfolgte in der in der Betriebsanleitung angegebenen Art und Weise. Es wurden keine individuellen Anpassungen vorgenommen. Die Geräte wurden so eingesetzt, dass das Aufbereitungsende allein durch die endometrische Messung während der Aufbereitung kontrolliert wurde.

Für die maschinelle Aufbereitung wurde das FlexMaster-System gewählt, da es in der Literatur oft positiv beschrieben wurde (GRESSMANN und HÜLSMANN 2001, SCHÄFER et al. 2004) und auch für relativ unerfahrene Anwender geeignet ist (MARHEINE 2006).

Die Feile wurde nach dem Erreichen der Arbeitslänge in ihrer Position mit Klebewachs fixiert, um einen Messfehler durch eine falsche Repositionierung bei der Auswertung zu vermeiden.

6.1.4 Auswertung des Aufbereitungsendes

Nach der Aufbereitung wurde zur Beurteilung der Lage der Instrumentenspitze zum Foramen physiologicum und zum Foramen apicale der Wurzelkanal apikal freigelegt. Wie auch CAMPBELL et al. (1998) und WRBAS et al. (2007) wurden hierzu rotierende diamantierte Schleifkörper verwendet.

GALLER (2002) verwendete zum Freilegen eine in ein Mandrell eingespannte Einmaltrennscheibe. STOLL (2007) setzte Sandpapier unterschiedlicher Körnung (1000, 2000 und 4000) ein, welches auf einem rotierenden Drehteller befestigt war.

Die folgende Abbildung (Abb. 70) zeigt ein Beispiel aus der Fotodokumentation von STOLL.

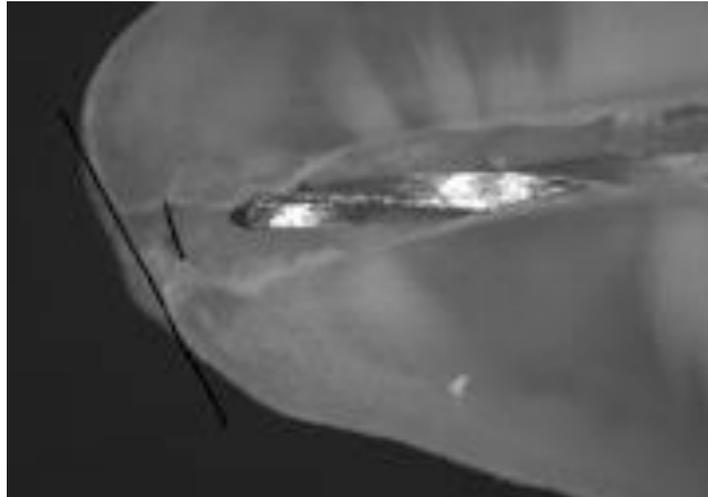


Abb. 70: Mittels Sandpapier freigelegte apikale Region; das physiologische Foramen und das anatomische Foramen sind mit schwarzen Linien eingezeichnet (STOLL 2007)

Der freigelegte apikale Teil des Wurzelkanals wurde unter dem Stereomikroskop aus verschiedenen Perspektiven betrachtet, um die drei Strukturen Feilenspitze, Foramen apicale und Foramen physiologicum zu identifizieren. Das Foramen apicale und die Instrumentenspitze waren in der Regel sofort eindeutig zu erkennen. Für die exakte Lagebestimmung der apikalen Konstriktion wurde das Präparat mehrmals gedreht und geneigt. Die Region wurde aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet. Die so ermittelte engste Stelle wurde einem aus jedem Blickwinkel eindeutig erkennbaren Punkt zugeordnet.

Der Zahn wurde anschließend so platziert, dass die drei Strukturen in einer Schärfeebene lagen. Mit der an das Mikroskop angeschlossenen Digitalkamera wurde ein Foto erstellt, auf dem direkt im Anschluss die drei Punkte eingezeichnet und die Strecken vermessen wurden. Auf dem Foto sind das Foramen apicale und die Instrumentenspitze deutlich erkennbar. Der am Foramen physiologicum eingezeichnete Punkt setzt die vorher durchgeführte mehrdimensionale Betrachtung voraus.

Die Fotos wurden sodann nochmals überprüft. In zweifelhaften Fällen erfolgte eine erneute Prüfung unter dem Stereomikroskop, die regelmäßig zum gleichen Ergebnis führte. Der individuelle Einfluss ist damit marginal. Vorteil des

gewählten Verfahrens ist die direkte Messung im eingesehenen Bereich und die dabei unmittelbar und ohne Ableitung vorgenommene Bestimmung der Strecken.

Eine weitere Technik für die Bestimmung der Distanz zwischen Instrumentenspitze und Foramen apicale bei extrahierten Zähnen ist, eine dünne Feile in den Wurzelkanal einzuführen, bis sie am Foramen apicale, meist mit Hilfe einer Vergrößerungshilfe, ausgemacht werden kann. Diese Länge wird dann mit der endometrisch bestimmten Arbeitslänge verglichen (CAMPBELL et al. 1998, FELIPPE 2008). Dieses Verfahren bietet den Vorteil, ohne einen komplizierten Schleifprozess eine Aussage über die Lage der Instrumentenspitze zum Foramen apicale machen zu können. Auf diese Weise kann jedoch keine Information über die Relation der Instrumentenspitze zum physiologischen Foramen gewonnen werden.

Ein weiteres praktiziertes Verfahren, um die Lage der Instrumentenspitze zu beurteilen, ist die Auswertung einer nach der endometrischen Messung angefertigten Röntgenaufnahme. DITTMER (2003) bezeichnete bei einer in vitro Untersuchung 88,6% der Messungen als akzeptabel, da sich die Instrumentenspitze in einem Bereich von 0,5 – 1,5 mm zum röntgenologischen Apex darstellte. In klinischen Studien, in denen die Zähne nach der Messung nicht extrahiert werden, ist dies die einzige Möglichkeit, die Messung zu beurteilen (LUCK 1999). Bei in vitro Versuchen bleibt eine rein röntgenologische Beurteilung aber hinter den Möglichkeiten der Aufschleiftechnik zurück.

6.2 Ergebniskritik

Ziel der Untersuchung war es festzustellen, ob sich mit den untersuchten Geräten der apikale Endpunkt bei der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung sicher kontrollieren lässt.

6.2.1 Röntgenologische Arbeitslängenbestimmung

In Bezug auf das ideale Aufbereitungsende, das physiologische Foramen, wurde bei der röntgenologischen Methode im Mittel eine etwas zu kurze Arbeitslänge bestimmt. Die Entfernung zwischen röntgenologisch festgelegter Arbeitslänge und Foramen physiologicum lag bei $-0,27 \pm 0,34$ mm.

In keinem Fall wurde eine Arbeitslänge festgelegt, die eine Überinstrumentierung zur Folge gehabt hätte. Alle Aufbereitungen hätten vor dem Foramen apikale, also innerhalb des Zahnes, geendet. Im Mittel lag die Entfernung zwischen röntgenologisch festgelegter Arbeitslänge und Foramen apicale bei $-0,97 \text{ mm} \pm 0,29 \text{ mm}$.

In 98% der Fälle wurde eine Arbeitslänge im Bereich von 1 mm vor und 0,5 mm nach dem physiologischen Foramen bestimmt. In Hinblick auf die Tatsache, dass auch eine etwas zu kurze Aufbereitung eine gute Prognose hat, ist die röntgenologische Arbeitslängenbestimmung auch nach den Ergebnissen in dieser Studie als klinisch akzeptabel einzustufen. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Versuche unter Laborbedingungen durchgeführt wurden und die in der Methodenkritik beschriebenen Probleme des klinischen Alltags nicht auftraten.

6.2.2 Endometrisch kontrollierte Aufbereitung

Die endometrisch kontrollierten Aufbereitungen endeten bei allen drei Geräten nur in sehr wenigen Fällen exakt am physiologischen Foramen. Beim Gerät VDW.Gold war dies in 1,72%, beim Dentaport ZX in 3,77% und beim EndoPilot in 5,56% der Aufbereitungen der Fall. Bei allen drei Geräten erfolgte in ca. 91% der Fälle die Aufbereitung über das physiologische Foramen hinaus. Im Mittel wurde die optimale Aufbereitungslänge um $0,43 \pm 0,30$ mm überschritten. Es lässt sich also festhalten, dass es mittels endometrischer Messung nicht möglich war, das gewünschte Aufbereitungsende einzuhalten.

Dieses Ergebnis hat grundsätzliche Bedeutung und wird später detailliert diskutiert. Zunächst werden die Unterschiede zwischen den untersuchten Geräten betrachtet.

Neben der fast generellen Überschreitung des physiologischen Foramens wurden auch Arbeitslängen über den Wurzelkanal hinaus bestimmt. Eine Aufbereitung über das Foramen apikale hinaus erfolgte bei dem Gerät VDW.Gold in 43,10% sowie bei den Geräten Dentaport ZX und EndoPilot jeweils in 13,21% bzw. 12,96% der Fälle.

Die Überschreitung des Foramen apikale erreichte in der vorliegenden Studie maximal Werte von 0,21 mm. Ausnahmen waren jeweils ein Messwert beim Gerät VDW.Gold (0,26 mm) und einer beim Gerät EndoPilot (0,41 mm).

Die Tatsache, dass die Arbeitslänge mit dem VDW.Gold in ca. 43% über das apikale Foramen hinaus bestimmt wurde, bei den anderen beiden Geräten jedoch nur in jeweils ca. 13% der Fälle, könnte in der Versuchsdurchführung begründet sein. Die beiden Geräte von Morita und Schlumbohm verfügen über einen Funktionsmodus, der die Feilenrotation beim Erreichen der vermeintlichen physiologischen Konstriktion automatisch stoppen lässt. Beim VDW.Gold wird die Rotation nach dem Aufleuchten der entsprechenden LED durch Loslassen des Fußanlassers gestoppt. Diese „menschliche Komponente“ könnte zu den abweichenden Messergebnissen geführt haben.

An dieser Stelle muss verdeutlicht werden, dass die ermittelten signifikanten Unterschiede zwischen den drei Geräten im Mittel lediglich eine Abweichung von ca. 0,15 mm ausmachten. Eine klinische Konsequenz ist bei dieser Größenordnung fraglich. Klinisch relevante Unterschiede in der Messgenauigkeit der Geräte existieren also faktisch nicht.

Zwar scheinen die beschriebenen Überinstrumentierungen von weniger als einem halben Millimeter gering, doch ist es hierdurch nicht mehr möglich, einen definitiven apikalen Stopp zu schaffen. Dies ist die Voraussetzung für das sichere intrakanaläre Abfüllen des Wurzelkanals. Bei einer Verbreiterung der apikalen Konstriktion erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, Wurzelfüllmaterial zu

überstopfen (GULDENER und LANGELAND 1993). Ebenso steigt beim Spülen das Risiko, dass die Spülflüssigkeit ins periapikale Gewebe gelangt und dort entzündliche destruktive Prozesse verursacht (HÜLSMANN und HAHN 2000). Insgesamt erhöht sich also das Risiko einer Irritation des periapikalen Gewebes und damit verschlechtert sich die Prognose der endodontischen Behandlung (MERYON 1987).

Die nachfolgende Abbildung (Abb. 71) zeigt das morphologische Korrelat einer geringen Überinstrumentierung. Es wird deutlich, dass nach der Aufbereitung bis zu dieser Position die zuvor erwähnten Probleme auftreten können.

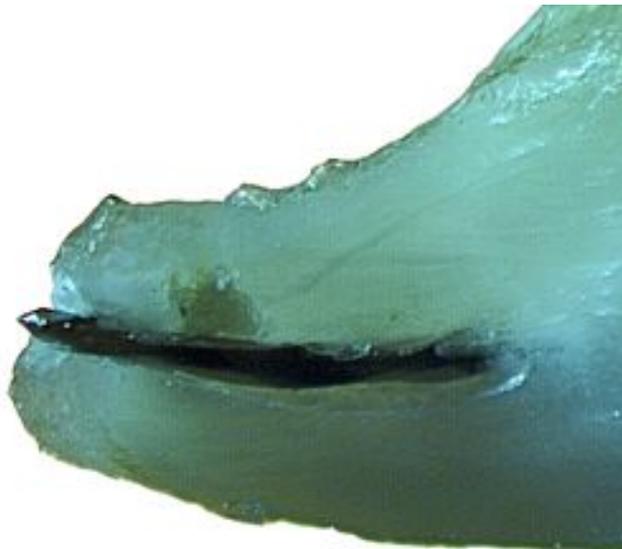


Abb. 71: Die Instrumentenspitze ist 0,1 mm hinter dem anatomischen Foramen

HÖR et al. (2005) gehen aufgrund der dem Messverfahren zugrunde liegenden physikalischen Voraussetzungen davon aus, dass durch die endometrische Messung grundsätzlich nur ein Punkt nach dem physiologischen Foramen bestimmt werden kann. Die Geräte zeigen also im günstigen Fall einen Punkt zwischen der physiologischen Konstriktion und dem Foramen apicale an. Diese Feststellung wird durch die vorliegende Studie bestätigt.

WRBAS et al. (2007) empfehlen deshalb nach ihren Untersuchungen 0,5 mm von der endometrisch bestimmten Arbeitslänge abzuziehen, um ein Überinstrumentieren zu verhindern.

Aus dieser Sicht verbietet sich die Arbeitslängenbestimmung durch die endometrische Messung während der Aufbereitung. Schließlich folgt bei der Aufbereitung mit endometrischer Arbeitslängenkontrolle nach dem Überschreiten des physiologischen Foramens noch eine Abschaltverzögerung des Motors (BARGHOLZ 2006).

Eine andere in der Literatur beschriebene Möglichkeit der Wertung ist es, einen Bereich um das physiologische Foramen als klinisch akzeptabel zu definieren und entsprechend alle Messergebnisse in diesem Feld als Erfolg zu werten. Der klinisch akzeptable Toleranzbereich wird in anderen Studien mit +/- 0,5 mm um das physiologische Foramen herum angegeben (DUNLAP 1998, GALLER 2002, TSELNIK 2005).

Bei diesem Bewertungsmaßstab wird jedoch toleriert, dass das physiologische Foramen erweitert wird. Wenn der Abstand zwischen Foramen physiologicum und Foramen apikale kleiner als 0,5 mm ist, wird sogar ein leichtes Überinstrumentieren und Überstopfen hingenommen.

In Hinblick auf die Tatsache, dass überstopftes Wurzelfüllmaterial immer zu einer entzündlichen Reaktion des periapikalen Gewebes führt (RICUCCI und LANGELAND 1998) und eine zu kurze Arbeitslänge eine bessere Prognose als eine Überinstrumentierung hat (SJÖGREN et al. 1990), erscheint dies nicht sinnvoll.

HELLWIG et al. (2003) geben als mittlere Distanz von der apikalen Konstriktion zum Foramen apicale 0,6 mm an. KUTTLER (1955) ermittelte als durchschnittliche Distanz zwischen der apikalen Konstriktion und dem Foramen apicale den Wert von 0,524 mm für Patienten im Alter von 18 - 25 Jahren und den Wert 0,659 mm für Patienten von 55 Jahren und darüber. DUMMER et al. (1984) fanden Entfernungen vom Apex bis zur physiologischen Konstriktion in einer Spanne von 0,07 bis 2,69 mm.

In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Ergebnis von 0,70 mm +/- 0,34 mm in den Grenzen von maximal 2,03 mm und minimal 0,12 mm ermittelt. Dies ähnelt den Angaben in der Literatur und zeigt, dass der Abstand zwischen physiologischem und anatomischem Foramen durchaus kleiner als 0,5 mm sein kann.

In der Studie zum Tri-Auto-ZX-Winkelstück von CAMPBELL et al. (1998) erfolgte bei der Aufbereitung mit der Arbeitslängeneinstellung „1 vor Apex“ in 50% der Fälle eine Verbreiterung der apikalen Konstriktion.

Eine weitere Möglichkeit die Messung zu bewerten ist, nicht den theoretisch besten Punkt für das Ende der Aufbereitung, das physiologische Foramen, für die Bewertung heranzuziehen, sondern das anatomische Foramen.

Im Gegensatz zum physiologischen Foramen ist die Position der Feilenspitze zum anatomischen Foramen in vitro eindeutig bestimmbar und damit, ob die Aufbereitung mit endometrischer Arbeitslängenbestimmung im oder außerhalb des Zahnes endet.

So beurteilten FELIPPE et al. (2008) das in dieser Studie untersuchte Gerät von Morita, das Dentaport ZX, nach der Entfernung der Instrumentenspitze zum anatomischen Foramen.

Die Ergebnisse in Hinblick auf den mittleren Abstand zwischen Foramen apicale und Instrumentenspitze bei der Aufbereitung mit der Einstellung „0,5 vor Apex“ sind ähnlich der in dieser Studie ermittelten. FELIPPE et al. (2008) beobachteten eine Distanz von -0,22 +/- 0,66 mm. In der vorliegenden Untersuchung betrug der mittlere Abstand zwischen Instrumentenspitze und Foramen apicale beim VDW.Gold -0,17 mm +/- 0,38 mm, beim Dentaport ZX -0,30 mm +/- 0,35 mm und beim EndoPilot -0,33 mm +/- 0,36 mm.

Bei FELIPPE et al. (2008) kam es beim Dentaport ZX bei der Einstellung „0,5 vor Apex“, d.h. der Einstellung, bei der nach Herstellerangaben eigentlich eine Aufbereitung bis zum physiologischen Foramen erfolgen soll, in 20% der Fälle zu einer Aufbereitung über das Foramen apicale hinaus.

Zum Vergleich noch einmal die in dieser Studie gemessenen Überschreitungen des Foramen apikale: VDW.Gold in 43,10%, sowie Dentaport ZX und EndoPilot in 13,21% bzw. 12,96% der Fälle.

In dieser Untersuchung trat jedoch keine Überschreitung des Foramen apicale um mehr als 0,5 mm auf, wo hingegen bei FELIPPE et al. (2008) die maximale Überschreitung 1 mm betrug. Dies war bei der Arbeitslängeneinstellung „0,5 vor Apex“ immerhin bei 6 Messungen (9%) der Fall.

Während CAMPBELL et al. (1998) - trotz ihrer beschriebenen Ergebnisse - das untersuchte Gerät zumindest für eine Patientenstudie geeignet hielten, folgerten FELIPPE et al. (2008) aus ihrer Untersuchung, dass die endometrische Messung während der Aufbereitung keine akkurate Methode darstellt, um das apikale Aufbereitungsende zu kontrollieren. Die Ergebnisse dieser Studie führen zum gleichen Schluss.

6.3 Klinische Aspekte

Mit der röntgenologischen Methode wurde meist eine kürzere Arbeitslänge ermittelt als bei der Aufbereitung mit endometrischer Messung. Es sollte hieraus jedoch nicht geschlossen werden, dass klinisch keine Gefahr besteht, endometrisch eine zu kurze Arbeitslänge zu bestimmen. In der klinischen Anwendung können Kurzschlussströme zwischen Messelektrode (Feile) und Wangenelektrode über Spülmedien, Speichel oder metallische Restaurationen entstehen. Kurzschlussströme führen zu einer zu kurzen Arbeitslänge, da das Gerät zu früh den Apex anzeigt.

Deshalb sollte stets eine Röntgenaufnahme zur Überprüfung angefertigt werden.

Bei in vitro Untersuchungen sind Kurzschlussströme so gut wie ausgeschlossen, da hier eine bessere Übersicht und eine einfachere Feuchtigkeitskontrolle gegeben ist.

Das zeigen auch die Ergebnisse der vorliegenden Studie. Die maximal zu kurze Arbeitslänge betrug -0,28 mm. Das ist eine Entfernung, die kaum auf einen Kurzschlussstrom zurückzuführen ist.

Bei einem Wurzelkanal wurde, entgegen der üblichen Tendenz, endometrisch eine kürzere Arbeitslänge bestimmt als zuvor röntgenologisch. Die endometrische Arbeitslänge fiel 1 mm kürzer aus als die röntgenologisch festgelegte.

Die Betrachtung der apikalen Region unter dem Mikroskop (Abb. 72) zeigt, dass sich das apikale Foramen hoch seitlich an der Wurzel befindet. Durch die zweidimensionale Darstellung als Summationsaufnahme können im Röntgenbild je nach Strahlengang solche lateralen Austritte der Instrumentenspitze aus dem Wurzelkanal übersehen werden. In diesem Fall wäre die endometrisch kürzer bestimmte Arbeitslänge für die Prognose des Zahnes vorteilhafter als die röntgenologisch festgelegte.

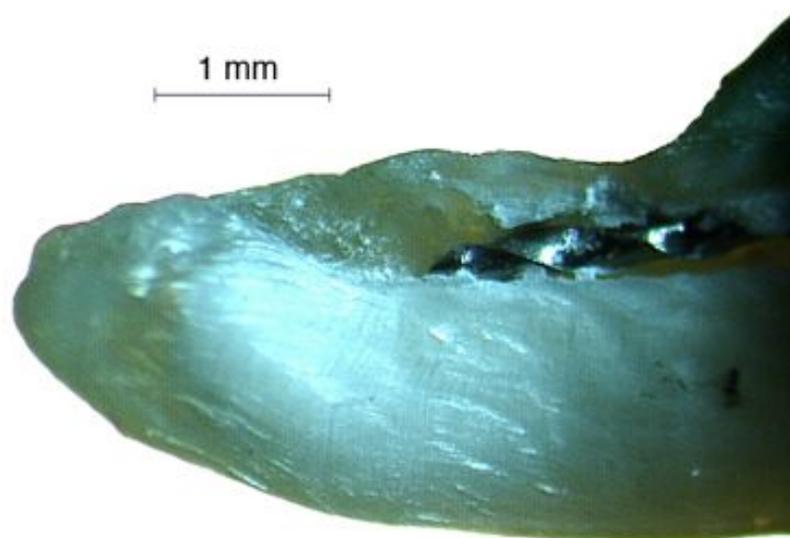


Abb. 72: Das apikale Foramen befindet sich hoch lateral an der Wurzel

Derartige Fälle zeigen den Vorteil der Endometrie gegenüber der Röntgentechnik. Schließlich ist der Kanalausgang radiologisch nicht zu

erkennen. Zur Vermeidung einer Überinstrumentierung sollte dem endometrischen Ergebnis vertraut werden.

Die durchgeführte Untersuchung belegt in Übereinstimmung mit der Literatur, dass die heutigen Endodontiegeräte sicher einen Punkt zwischen dem physiologischen und dem anatomischen Foramen bestimmen können. Es erscheint daher sinnvoll, diesen Punkt mit einem dünnen Handinstrument endometrisch zu bestimmen und von der ermittelten Länge 0,5 bis 1 mm abzuziehen. Somit wird eine möglichst exakte Arbeitslänge erreicht, die minimal vor dem Foramen physiologicum endet. Zusätzlich sollte die Länge in einer Röntgenmessaufnahme kontrolliert werden.

Durch die endometrische Messung während der maschinellen Aufbereitung kann ein versehentliches Überinstrumentieren von mehr als 0,5 mm verhindert werden und das Verfahren der maschinellen Aufbereitung somit absichert werden.

7 Schlussfolgerungen

Nach den Ergebnissen dieser Studie stellt die simultane endometrische Messung während der maschinellen Aufbereitung zwar eine sinnvolle Ergänzung dar, ist jedoch nicht geeignet, das physiologische Foramen als den Endpunkt der Aufbereitung zu bestimmen. Das Ergebnis ist unabhängig von den untersuchten Geräten.

Die Aufbereitung erfolgte bei allen drei Geräten gleichermaßen zu rund 91% über das physiologische Foramen hinaus. Es kommt somit zu einer Verbreiterung der apikalen Konstriktion.

Die Kombination aus endometrischer und röntgenologischer Arbeitslängenbestimmung vor Aufbereitungsbeginn ist heute die beste Möglichkeit, die Position des physiologischen Foramens zu bestimmen.

Durch die endometrische Messung während der maschinellen Aufbereitung kann ein versehentliches Überinstrumentieren von mehr als 0,5 mm verhindert werden und dadurch das Verfahren abgesichert werden.

Der Einsatz der untersuchten Geräte in der zahnärztlichen Praxis ist sinnvoll, weil hierdurch die endometrische Arbeitslängenbestimmung mit einem dünnen Handinstrument vor Aufbereitungsbeginn ermöglicht und während der maschinellen Aufbereitung die Einhaltung der Arbeitslänge absichert werden kann.

8 Zusammenfassung

In einer in vitro Studie an extrahierten Zähnen wurden drei Endodontiegeräte zur maschinellen Aufbereitung untersucht. Die Geräte bieten die Möglichkeit, die Arbeitslänge endometrisch während der Aufbereitung zu bestimmen. Die Genauigkeit dieser Funktion sollte untersucht werden.

Dazu wurden Messreihen in einem mit Kochsalzlösung gefüllten Röntgenmodell (Frasaco GmbH, Tettang, Deutschland) durchgeführt. Vor der eigentlichen Aufbereitung wurde eine klassische röntgenologische Arbeitslängenbestimmung mittels digitaler Sensortechnik durchgeführt. Die Arbeitslänge wurde auf 1 mm vor dem röntgenologischen Apex festgelegt.

Untersucht wurden die Geräte VDW.Gold (VDW GmbH, München, Deutschland), Dentaport ZX (J. Morita Corporation, Tokyo, Japan) und EndoPilot (Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt, Deutschland). Sie wurden nach Herstellerangaben so eingestellt, dass die Aufbereitung mit endometrischer Arbeitslängenbestimmung bis zum physiologischen Foramen erfolgen sollte. Für die Aufbereitung wurde das FlexMaster-Feilensystem (VDW GmbH, München, Deutschland) verwendet.

In die Auswertung wurden die Messungen von 165 Wurzelkanälen einbezogen. Hiervon wurden 58 mit dem VDW.Gold, 53 mit dem Dentaport ZX und 54 mit dem EndoPilot aufbereitet. Das letzte Aufbereitungsinstrument auf endometrisch ermittelter Arbeitslänge wurde mit Klebewachs fixiert. Anschließend wurden die Kanäle apikal längsseits aufgeschnitten, um die Messungen zu objektivieren. Mit Hilfe eines Mikroskops wurde die Lage der Instrumentenspitze zum physiologischen und anatomischen Foramen vermessen. Die Ergebnisse der röntgenologischen Arbeitslängenbestimmung und der endometrischen Arbeitslängenbestimmung während der Aufbereitung wurden statistisch verglichen.

Bei der röntgenologisch festgelegten Arbeitslänge lag die Entfernung zum Foramen physiologicum im Mittel bei $-0,27 \text{ mm} \pm 0,34 \text{ mm}$. In 98% der Fälle

wurde auf diese Weise die Arbeitslänge im Bereich zwischen 1 mm vor und 0,5 mm nach dem physiologischen Foramen bestimmt. Es wurde mit der Röntgenmethode keine Arbeitslänge jenseits des Foramen apicale, also außerhalb des Zahnes, bestimmt. Die Röntgenmethode unterschied sich signifikant von der endometrischen.

Beim Gerät von VDW wurde in 91,38%, beim Gerät von Morita in 90,57% und beim Gerät von Schlumbohm in 90,74% der Fälle das physiologische Foramen überschritten. Im Mittel betrug die Überschreitung beim VDW.Gold 0,45 mm +/- 0,29 mm, beim Dentaport ZX 0,42 mm +/- 0,30 mm und beim EndoPilot 0,43 mm +/- 0,31 mm. Zwischen den Geräten konnte hierbei kein signifikanter Unterschied gefunden werden.

Durch die endometrische Messung während der Aufbereitung war es durchgängig nicht möglich, die Arbeitslänge bis zum angestrebten Aufbereitungspunkt, dem physiologischen Foramen, einzuhalten.

Mehr noch, es erfolgten Aufbereitungen über das Foramen apicale hinaus, beim VDW.Gold in 43,10% sowie den Geräten Dentaport ZX und EndoPilot in jeweils 13,21% bzw. 12,96% der untersuchten Wurzelkanäle. Der Abstand zwischen Instrumentenspitze und Foramen apicale betrug im Mittel beim VDW.Gold -0,17 mm +/- 0,38 mm, beim Dentaport ZX -0,30 mm +/- 0,35 mm und beim EndoPilot -0,33 mm +/- 0,36 mm.

Mit Blick auf das Foramen apicale sind die Unterschiede zwischen den Geräten VDW.Gold und Dentaport ZX ($P = 0,027$) sowie VDW.Gold und EndoPilot ($P = 0,008$) statistisch signifikant.

Die klinische Relevanz ist zu diskutieren, weil die Unterschiede im Bereich von lediglich 0,15 mm liegen.

Die untersuchten Kombinationsgeräte ermitteln nicht das physiologische Foramen als Endpunkt der Aufbereitung, sondern einen Punkt nach dessen Überschreitung. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit anderen Studien.

Die endometrische und röntgenologische Arbeitslängenbestimmung vor Aufbereitungsbeginn lässt sich daher durch die simultane endometrische Messung während der Aufbereitung nicht ersetzen. Jedoch wird die maschinelle Aufbereitung durch diese Technik sicherer.

Die vorliegende Untersuchung stellt die Erhaltung des physischen Foramens für eine gute Prognose zur Erhaltung der behandelten Zähne in den Vordergrund. Dieses Ziel ohne Abstriche mit verringertem Behandlungsaufwand zu erreichen, bleibt Aufgabe für Zahnmedizin und Gerätetechnik.

9 Literaturverzeichnis

- 1 Bargholz, C. ; Hör, D. ; Zirkel, C.:
Praxisleitfaden Endodontie
München: Urban & Fischer 2006
- 2 Baumann, M.:
Endodontie: Rückblick und Ausblick.
Endodontie Journal 2002; 1: 6-17
- 3 Blank, L.W. ; Fenca, J.I. ; Pellen, G.B.:
Reliability of electronic measuring devices in endodontic therapy
J Endod 1975; 1: 141
- 4 Breuer, H.:
dtv-Atlas Physik Bd 2: Elektrizität, Magnetismus, Festkörper, Moderne Physik
München : Deutscher Taschenbuch Verlag 2000
- 5 Campbell, D. ; Friedman, S. ; Nguyen H.Q. ; Kaufman, A.:
Apical extent of rotary canal instrumentation with an apex-locating handpiece in vitro
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1998; 85: 319-324
- 6 Delschen, S.:
Einfluss des Übungseffektes auf die Anwendungssicherheit der maschinellen
Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Feilen in der studentischen Ausbildung
Zahnmed. Diss., Marburg 2006
- 7 Dittmer, P.:
Die maschinelle Aufbereitung des Wurzelkanals mit dem Tri Auto ZX
Winkelstück und FlexMaster-Instrumenten
Zahnmed. Diss., Greifswald 2003
- 8 Donnelly, J.C.:
A simplified model to demonstrate the operation of electronic root canal measuring
devices
J Endod 1993; 19: 579-580
- 9 Dummer, P.M.H. ; McGinn, J.H. ; Rees, D.G.:
The position and topography of the apical canal constriction and apical foramen
Int Endod J 1984; 17: 192-198
- 10 Dunlap, C.A. ; Remeikis, N.A. ; BeGole, E.A. ; Rauschenberger, C.R.:
An in vivo evaluation of an electronic apex locator that uses the ratio method in vital and
necrotic canals
J Endod 1998; 24: 48-50
- 11 Felipe, W.T. ; Felipe, M.C. ; Reyes Carmona, J. ; Crozoé, F.C. ; Alvisi, B.B.:
ex vivo evaluation of the ability of the ROOT ZX II to locate the apical foramen and to
control the apical extent of rotary canal instrumentation
Int Endod J. 2008 Jun; 41/6: 502-507.
- 12 Galler, K.:
Vier elektronische Wurzelkanallängenmessgeräte im klinischen Vergleich mit
Röntgenmesstechnik und tatsächlicher Länge
Zahnmed. Diss., Mainz 2002

- 13 Gambal, A. ; Hülsmann, M.:
Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit dem Tri-Auto-ZX-Winkelstück
Endodontie 2003; 12/4: 353-364
- 14 Gressmann, G. ; Hülsmann, M.:
Die Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit dem FlexMaster-NiTi-System
Endodontie 2001; 10/3: 227-241
- 15 Guldener, P. ; Langeland, K.:
Endodontologie (3. Auflage)
Stuttgart: Thieme, 1993
- 16 Hellwig, E. ; Klimek, J. ; Attin, T.:
Einführung in die Zahnerhaltung (3. Auflage)
München, Jena: Urban & Fischer, 2003
- 17 Hör, D.:
Die Arbeitslänge zuverlässig bestimmen
Dentalzeitung 2005; 1: 24-26
- 18 Hör, D. ; Attin, T.:
Die elektrische Längenbestimmung des Wurzelkanals
Endodontie 2001; 1: 39-56
- 19 Hör, D. ; Krusy, S. ; Attin, T.:
Ex vivo comparison of two electronic apex locators with different scales and frequencies
Int Endod J 2005; 38/12: 855-859
- 20 Huang, L.:
An experimental study of the principle of electronic root canal measurement
J Endod 1987; 13: 60-64
- 21 Hülsmann, M. ; Bertzbach, F.:
Klinische Überprüfung der Genauigkeit eines Apexlokalisators
Dtsch Zahnärztl Z 1989; 44: 603-605
- 22 Hülsmann, M. ; Hahn, W.:
Complications during root canal irrigation – literature review and case reports
Int Endod J 2000; 33: 86-93
- 23 Hülsmann, M. ; Rödig, T.:
Die Röntgenmessaufnahme
Endodontie 2001; 1: 21-37
- 24 Hülsmann, M. ; Schäfer, E.:
Stellungnahme für den Beirat Endodontologie der DGZ „Die Wurzelkanalbehandlung“
Endodontie 2006; 15/2: 195-199
- 25 Ingle, J.:
Endodontic instruments and instrumentation
Dent Clin North Am 1957; 1: 905-922
- 26 Ingle, J. ; Taintor, J.:
Endodontics

- Philadelphia: Lea & Febiger, 1985
- 27 Katz, A. ; Mass, E. ; Kaufman, A.Y.:
Electronic apex locator: a useful tool for root canal treatment in the primary dentition
ASDC J Dent Child 1996; 63: 414-417
- 28 Kim, E. ; Lee, S.J.:
Electronic apex locator
Dent Clin North Am 2004; 48/1: 35-54
- 29 Kobayashi C. ; Suda, H.:
New electronic canal measuring device based on the ratio method
J Endod 1994; 20/3: 111-114
- 30 Kobayashi, C.:
Electronic canal length measurement
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1995; 79: 226-231
- 31 Kuttler, Y.:
Microscopic investigation of root apexes
J Am Dent Assoc 1955; 50: 544-552
- 32 Lechner, H. ; Krönke, A.:
Vergleichende Untersuchungen zur Messung der Wurzelkanallänge
Dtsch Zahnärztl Z 1973; 28: 347-350
- 33 Luck, S.:
Die Anwendung der Endometrie- Eine In-vivo-Studie
Dtsch Zahnärztl Z 1999; 54: 314-316
- 34 Marheine, A.:
Untersuchung zur Anwendbarkeit der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung im
Phantomkurs der Zahnerhaltung
Zahnmed. Diss., Marburg 2006
- 35 Markula-Liegau, A.:
In vitro Untersuchung zur Endometrie mit dem Messgerät Root ZX
Zahnmed. Diss., Erlangen 1996
- 36 Maschinski, G.:
Lexikon Zahnmedizin, Zahntechnik
München, Jena: Urban & Fischer, 2000
- 37 Meryon, S.D.:
The influence fo surface area on the in vitro cytotoxicity of a range of dental materials
J Biomed Mater Res 1987; 21: 1179-1186
- 38 Nair, P.N.R. ; Sjögren, U. ; Krey, G. ; Kahnberg, K.-E. ; Sundqvist, G.:
Intraradicular bacteria and fungi in rootfilled asymptomatic human teeth with
therapyresistant periapical lesions: a longterm light and electron microscopic followup
study.
J Endod 1990; 16: 580-588
- 39 Oishi, A. ; Yoshioka, T. ; Kobayashi, C. ; Suda, H.:
Electronic detection of root canal constrictions

- J Endod 2002; 28: 361-364
- 40 Plant, J.J. ; Newmann, R.F.:
Clinical evaluation of the sono-explorer
J Endod 1976; 2: 216
- 41 Ricucci, D. ; Langeland, K.:
Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 2. A histological study
Int Endod J 1998; 31/6: 394-409
- 42 Rother, U.J.:
Moderne bildgebende Diagnostik in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
München, Jena: Urban & Fischer, 2001
- 43 Schade, M.:
Eine vergleichende Studie der maschinellen Aufbereitung mit den Nickel-Titan-
Aufbereitungssystemen Quantec Series 2000 und Hero 642
Zahnmed. Diss., Göttingen 1999
- 44 Schäfer, E. ; Schulz-Bongert, U. ; Tulus, G.:
Comparison of Hand Stainless Steel and Nickel Titanium Rotary Instrumentation:
A Clinical Study
J Endod 2004; 30: 432-435
- 45 Seidberg, B.H. ; Alibrand, B.V. ; Fine, H. ; Logue, B.:
Clinical investigation of measuring working lengths of root canals with an electronic
device and with digital-tactile sense.
J Am Dent Assoc 1975; 90: 379-387
- 46 Sjögren, U. ; Hägglund, B. ; Sundqvist, G.:
Factors affecting the long-term results of endodontic treatment
J Endodont 1990; 16: 498-504
- 47 Stoll, M.:
Evaluation eines neuen Modells zur In-vitro Testung von Endometriegeräten
Zahnmed. Diss., Freiburg 2007
- 48 Sunada, I.:
New method for measuring the length of the root canal
Jpn Dent Res 1962; 41: 375-387
- 49 Suzuki, K.:
Experimental studies on iontophoresis
Jpn J Stomatol 1942; 16: 411-429
- 50 Tepel, J. ; Schäfer, E.:
Schneidleistung von Hedström-Feilen sowie S- und U-Feilen aus unterschiedlichen
Legierungen bei feilender Arbeitsweise
Endodontie 1996; 3: 219-226
- 51 Thomas, A.S. ; Hartwell, G.R. ; Moon, P.C.:
The accuracy of the Root ZX electronic apex locator using stainless-steel and nickel-
titanium files
J Endod 2003; 29: 662-663

- 52 Thompson, S.A. ; Dummer, P.M.H.:
Shaping ability of Hero 642 rotary nickel titanium instruments in simulated root canals
Int Endod J 2000; 33: 255-261 (Part 1)
- 53 Thompson, S.A. ; Dummer, P.M.H.:
Shaping ability of Hero 642 rotary nickel titanium instruments in simulated root canals
Int Endod J 2000; 33: 268-274 (Part 2)
- 54 Tinaz, A.C. ; Alacam, T. ; Topuz, O.:
A simple model to demonstrate the electronic apex locator
Int Endod J 2002; 35: 940-945
- 55 Tselnik, M. ; Baumgartner, J.C. ; Marshall, J.G.:
An evaluation of root ZX and elements diagnostic apex locators
J Endod 2005; 31: 507-509
- 56 Vande Voorde, H.E. ; Bjorndahl, A.M.:
Estimating endodontic working length with paralleling radiographs
Oral Surg 1969; 27: 106
- 57 Versümer, J.:
Eine vergleichende Untersuchung der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung mit dem
Lightspeed- und dem ProFile.04-System
Zahnmed. Diss., Göttingen 1999
- 58 Voß, A.:
Stellungnahme der DGZMK „Die Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge“
Dtsch Zahnärztl Z 2004; 59: 605
- 59 Voß, A. ; Siebenkees, J.:
Experimentelle und klinische Bewertung der Endometriegeräte Apit und
Root ZX
Dtsch Zahnärztl Z 1994; 49: 281-284
- 60 Walia, H. ; Brantley, W.A. ; Gerstein, H.:
An initial investigation of the bending and torsional properties of nitinol root canal files.
J Endodont 1988; 14: 346-351
- 61 Wolf, H.F.:
Farbatlant der Zahnmedizin: Endodontologie
Stuttgart : Thieme Verlag 2007
- 62 Wrbas, K.T. ; Ziegler, A.A. ; Altenburger, M.J. ; Schirrmeister, J.F.:
In vivo comparison of working length determination with two electronic apex locators
Int Endod J 2007; 40/2: 133-138
- 63 Wu, M. ; Wesselink, P.:
Überlegungen zum apikalen Endpunkt der Wurzelkanalbehandlung
Endodontie 2001; 1: 9-18

Internetseiten:

- 64 www.morita.de (J. Morita Corporation, Tokyo, Japan)
J.Morita Europe
Eingesehen am: 21.10.08

-
- 65 www.vdw-dental.de (VDW GmbH, München, Deutschland)
Endo Einfach Erfolgreich - VDW Endodontic Synergy
Eingesehen am: 21.10.08
- 66 www.endopilot.de (Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt, Deutschland)
Schlumbohm: Start
Eingesehen am: 21.10.08
- 67 www.frasaco.de (Frasaco GmbH, Tettngang, Deutschland)
frasaco [Modelle der Wirklichkeit]
Eingesehen am: 21.10.08

10 Anhang

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 22) enthält die Dokumentation über alle in die Auswertung eingegangenen Versuchsreihen. Die Beschreibung des Inhalts ist dem Abschnitt 4.2.7 (Inhalt der Datentabelle) auf S. 72 zu entnehmen.

| Kanal | Gerät | Art | Verlauf | ML Rö [mm] | AL Rö [mm] | AL EM [mm] | EM-phy F [mm] | EM-ana F [mm] | Rö-phy F [mm] | Rö-ana F [mm] | ana-phy [mm] |
|-------|-------|-----|---------|------------|------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 16 | 16,5 | 17,5 | 0,56 | -0,02 | -0,44 | -1,02 | -0,58 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 19,5 | 20 | 21 | 0,65 | -0,05 | -0,35 | -1,05 | -0,7 |
| 3 | 1 | 1 | 2 | 19,5 | 20 | 21 | 0,65 | -0,53 | -0,35 | -1,53 | -1,18 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 19,5 | 19,5 | 20 | -0,2 | -0,49 | -0,7 | -0,99 | -0,29 |
| 5 | 1 | 1 | 2 | 18,5 | 19 | 20 | 0,45 | 0,1 | -0,55 | -0,9 | -0,35 |
| 6 | 1 | 1 | 2 | 18 | 18,5 | 19,5 | 0,13 | -0,86 | -0,87 | -1,86 | -0,99 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 20,5 | 21,5 | 22 | 0,18 | -0,47 | -0,32 | -0,97 | -0,65 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 16,5 | 16,5 | 17 | 0,66 | -0,22 | 0,16 | -0,72 | -0,88 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 22 | 22 | 23 | 0,59 | 0,12 | -0,41 | -0,88 | -0,47 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 17 | 17 | 17,5 | 0,21 | -0,25 | -0,29 | -0,75 | -0,46 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 22 | 22,5 | 23,5 | -0,05 | -0,27 | -1,05 | -1,27 | -0,22 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 18 | 18,5 | 19,5 | 0,44 | 0,21 | -0,56 | -0,79 | -0,23 |
| 13 | 1 | 1 | 1 | 19 | 19,5 | 20,5 | 0,98 | 0,17 | -0,02 | -0,83 | -0,81 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 20 | 21 | 22 | 0,62 | -0,04 | -0,38 | -1,04 | -0,66 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 19 | 19,5 | 20,5 | 0,5 | 0,14 | -0,5 | -0,86 | -0,36 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 19,5 | 20 | 21 | 0,47 | -0,05 | -0,53 | -1,05 | -0,52 |
| 17 | 1 | 2 | 1 | 18,5 | 18,5 | 19 | 0,83 | 0,12 | 0,33 | -0,38 | -0,71 |
| 18 | 1 | 2 | 2 | 16,5 | 16,5 | 17 | 0,53 | -1,37 | 0,03 | -1,87 | -1,9 |
| 19 | 1 | 2 | 1 | 17,5 | 17,5 | 18,5 | 0,81 | -0,39 | -0,19 | -1,39 | -1,2 |
| 20 | 1 | 2 | 2 | 16,5 | 17,5 | 18 | 0 | -0,6 | -0,5 | -1,1 | -0,6 |
| 21 | 1 | 2 | 2 | 16,5 | 17 | 18,5 | 1,11 | 0,26 | -0,39 | -1,24 | -0,85 |
| 22 | 1 | 2 | 2 | 16,5 | 16,5 | 17,5 | 0,83 | 0,08 | -0,17 | -0,92 | -0,75 |
| 23 | 1 | 2 | 2 | 17 | 18 | 19 | 0,54 | 0,05 | -0,46 | -0,95 | -0,49 |
| 24 | 1 | 2 | 2 | 16 | 17 | 17,5 | 0,5 | -0,11 | 0 | -0,61 | -0,61 |
| 25 | 1 | 2 | 1 | 16,5 | 17,5 | 18 | 0,16 | -0,36 | -0,34 | -0,86 | -0,52 |
| 26 | 1 | 2 | 2 | 17 | 18 | 19 | 0,37 | 0,09 | -0,63 | -0,91 | -0,28 |
| 27 | 1 | 2 | 2 | 18,5 | 19 | 20 | 0,68 | -0,28 | -0,32 | -1,28 | -0,96 |
| 28 | 1 | 2 | 2 | 17 | 17,5 | 18,5 | 0,67 | 0,15 | -0,33 | -0,85 | -0,52 |
| 29 | 1 | 2 | 2 | 16,5 | 17 | 17 | 0,08 | -0,57 | 0,08 | -0,57 | -0,65 |
| 30 | 1 | 2 | 1 | 14,5 | 15,5 | 16 | 0,46 | -0,2 | -0,04 | -0,7 | -0,66 |
| 31 | 1 | 2 | 2 | 15,5 | 16,5 | 17 | 0,42 | -0,16 | -0,08 | -0,66 | -0,58 |
| 32 | 1 | 2 | 2 | 14 | 14 | 15 | 0,89 | 0,12 | -0,11 | -0,88 | -0,77 |
| 33 | 1 | 2 | 2 | 12,5 | 12,5 | 13,5 | 0,93 | 0,05 | -0,07 | -0,95 | -0,88 |
| 34 | 1 | 2 | 2 | 12 | 12 | 13 | 0,63 | -0,08 | -0,37 | -1,08 | -0,71 |
| 35 | 1 | 2 | 2 | 15,5 | 16 | 17 | 0,46 | -0,09 | -0,54 | -1,09 | -0,55 |
| 36 | 1 | 2 | 2 | 15 | 15 | 16 | 0,11 | -0,09 | -0,89 | -1,09 | -0,2 |
| 37 | 1 | 2 | 2 | 17 | 18 | 19 | 0,6 | 0,11 | -0,4 | -0,89 | -0,49 |
| 38 | 1 | 2 | 1 | 14,5 | 15 | 16 | 0,3 | 0 | -0,7 | -1 | -0,3 |
| 39 | 1 | 2 | 2 | 15,5 | 17 | 18 | 0,6 | 0,1 | -0,4 | -0,9 | -0,5 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 40 | 1 | 2 | 2 | 17,5 | 17,5 | 18 | -0,19 | -0,77 | -0,69 | -1,27 | -0,58 |
| 41 | 1 | 2 | 2 | 19 | 19,5 | 20 | 0,39 | -0,86 | -0,11 | -1,36 | -1,25 |
| 42 | 1 | 2 | 2 | 19 | 19 | 19 | 0,19 | -0,64 | 0,19 | -0,64 | -0,83 |
| 43 | 1 | 2 | 2 | 14 | 15 | 15,5 | 0,18 | -0,33 | -0,32 | -0,83 | -0,51 |
| 44 | 1 | 2 | 1 | 13 | 14 | 14 | -0,28 | -1,53 | -0,28 | -1,53 | -1,25 |
| 45 | 1 | 2 | 2 | 14,5 | 15 | 16 | 0,65 | 0,21 | -0,35 | -0,79 | -0,44 |
| 46 | 1 | 2 | 2 | 13 | 13 | 13 | 0,34 | -0,55 | 0,34 | -0,55 | -0,89 |
| 47 | 1 | 2 | 2 | 19 | 19,5 | 20 | 0,38 | -0,4 | -0,12 | -0,9 | -0,78 |
| 48 | 1 | 2 | 2 | 17,5 | 18 | 19 | 0,59 | 0,08 | -0,41 | -0,92 | -0,51 |
| 49 | 1 | 2 | 2 | 13 | 14 | 15 | 0,52 | 0,21 | -0,48 | -0,79 | -0,31 |
| 50 | 1 | 2 | 2 | 14 | 15 | 16 | 0,32 | 0,18 | -0,68 | -0,82 | -0,14 |
| 51 | 1 | 2 | 2 | 17 | 17,5 | 18 | 0,66 | 0,13 | 0,16 | -0,37 | -0,53 |
| 52 | 1 | 2 | 2 | 17 | 17,5 | 19 | 0,46 | 0,19 | -1,04 | -1,31 | -0,27 |
| 53 | 1 | 2 | 1 | 18 | 18,5 | 19 | 0,47 | -0,06 | -0,03 | -0,56 | -0,53 |
| 54 | 1 | 2 | 1 | 19,5 | 20 | 21 | 0,45 | 0,13 | -0,55 | -0,87 | -0,32 |
| 55 | 1 | 2 | 2 | 19 | 20 | 21 | 0,63 | 0,15 | -0,37 | -0,85 | -0,48 |
| 56 | 1 | 2 | 1 | 19 | 19,5 | 20 | 0,13 | -0,27 | -0,37 | -0,77 | -0,4 |
| 57 | 1 | 2 | 2 | 16 | 17 | 18 | 0,44 | 0,06 | -0,56 | -0,94 | -0,38 |
| 58 | 1 | 2 | 2 | 16 | 17 | 18 | 0,52 | 0,15 | -0,48 | -0,85 | -0,37 |
| 59 | 2 | 1 | 1 | 17 | 17,5 | 18 | 0,93 | -0,4 | 0,43 | -0,9 | -1,33 |
| 60 | 2 | 1 | 1 | 15 | 16 | 17 | 0,25 | -0,16 | -0,75 | -1,16 | -0,41 |
| 61 | 2 | 1 | 1 | 17 | 18 | 19,5 | 1,13 | 0,11 | -0,37 | -1,39 | -1,02 |
| 62 | 2 | 1 | 1 | 15 | 16 | 17 | 0,24 | -0,59 | -0,76 | -1,59 | -0,83 |
| 63 | 2 | 1 | 1 | 16 | 16,5 | 17,5 | 0,51 | -0,08 | -0,49 | -1,08 | -0,59 |
| 64 | 2 | 1 | 1 | 13 | 14 | 15 | 0,42 | 0,05 | -0,58 | -0,95 | -0,37 |
| 65 | 2 | 1 | 1 | 18 | 19 | 20 | 0,31 | 0 | -0,69 | -1 | -0,31 |
| 66 | 2 | 1 | 1 | 19 | 19 | 20 | 0,54 | -0,03 | -0,46 | -1,03 | -0,57 |
| 67 | 2 | 1 | 1 | 17 | 18 | 18 | 0,18 | -0,82 | 0,18 | -0,82 | -1 |
| 68 | 2 | 1 | 1 | 19 | 19,5 | 20 | 0,43 | 0 | -0,07 | -0,5 | -0,43 |
| 69 | 2 | 1 | 1 | 19,5 | 20,5 | 21,5 | 0,59 | -0,08 | -0,41 | -1,08 | -0,67 |
| 70 | 2 | 1 | 1 | 17 | 18 | 19 | 0,43 | 0,18 | -0,57 | -0,82 | -0,25 |
| 71 | 2 | 1 | 1 | 18,5 | 19,5 | 20 | 0,38 | -0,22 | -0,12 | -0,72 | -0,6 |
| 72 | 2 | 1 | 1 | 17 | 17 | 18 | 0,75 | -0,35 | -0,25 | -1,35 | -1,1 |
| 73 | 2 | 1 | 2 | 17 | 17 | 18 | 0,5 | 0 | -0,5 | -1 | -0,5 |
| 74 | 2 | 1 | 1 | 20 | 20,5 | 21 | 0,33 | -0,54 | -0,17 | -1,04 | -0,87 |
| 75 | 2 | 2 | 1 | 14,5 | 15 | 15,5 | 0,33 | -0,38 | -0,17 | -0,88 | -0,71 |
| 76 | 2 | 2 | 1 | 15 | 16 | 17 | 0,81 | 0,17 | -0,19 | -0,83 | -0,64 |
| 77 | 2 | 2 | 2 | 16 | 16,5 | 17 | 0,3 | 0,03 | -0,2 | -0,47 | -0,27 |
| 78 | 2 | 2 | 2 | 16 | 17 | 18 | 0,84 | -0,09 | -0,16 | -1,09 | -0,93 |
| 79 | 2 | 2 | 2 | 17 | 18 | 18,5 | 0,2 | -0,41 | -0,3 | -0,91 | -0,61 |
| 80 | 2 | 2 | 2 | 16 | 17 | 17,5 | 0,14 | -0,38 | -0,36 | -0,88 | -0,52 |
| 81 | 2 | 2 | 2 | 15 | 15 | 16 | 0,66 | 0 | -0,34 | -1 | -0,66 |
| 82 | 2 | 2 | 2 | 15 | 16 | 17 | 0,37 | 0 | -0,63 | -1 | -0,37 |
| 83 | 2 | 2 | 2 | 17 | 18 | 19 | 0,9 | 0,2 | -0,1 | -0,8 | -0,7 |
| 84 | 2 | 2 | 1 | 15 | 16 | 17 | 0,52 | 0 | -0,48 | -1 | -0,52 |
| 85 | 2 | 2 | 2 | 16 | 17 | 18 | 0 | -0,22 | -1 | -1,22 | -0,22 |
| 86 | 2 | 2 | 2 | 15 | 16 | 16 | -0,13 | -0,71 | -0,13 | -0,71 | -0,58 |
| 87 | 2 | 2 | 2 | 15 | 15,5 | 16 | 0,41 | -0,36 | -0,09 | -0,86 | -0,77 |
| 88 | 2 | 2 | 2 | 17 | 18 | 18 | -0,12 | -1,37 | -0,12 | -1,37 | -1,25 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 89 | 2 | 2 | 2 | 16 | 16 | 16 | 0 | -0,99 | 0 | -0,99 | -0,99 |
| 90 | 2 | 2 | 2 | 16 | 16 | 17 | 0,95 | -0,34 | -0,05 | -1,34 | -1,29 |
| 91 | 2 | 2 | 2 | 15,5 | 16,5 | 17 | 0,39 | -0,39 | -0,11 | -0,89 | -0,78 |
| 92 | 2 | 2 | 2 | 16 | 17 | 17,5 | 0,36 | -0,32 | -0,14 | -0,82 | -0,68 |
| 93 | 2 | 2 | 2 | 15 | 15,5 | 16 | 0,41 | -0,03 | -0,09 | -0,53 | -0,44 |
| 94 | 2 | 2 | 1 | 14 | 14,5 | 15 | 0,31 | -1 | -0,19 | -1,5 | -1,31 |
| 95 | 2 | 2 | 1 | 15 | 16 | 16,5 | 0,2 | -0,25 | -0,3 | -0,75 | -0,45 |
| 96 | 2 | 2 | 2 | 15 | 16 | 16,5 | 0,09 | -0,59 | -0,41 | -1,09 | -0,68 |
| 97 | 2 | 2 | 2 | 15,5 | 16 | 16,5 | 0,48 | -0,4 | -0,02 | -0,9 | -0,88 |
| 98 | 2 | 2 | 2 | 15,5 | 16 | 16,5 | 0,39 | -0,08 | -0,11 | -0,58 | -0,47 |
| 99 | 2 | 2 | 1 | 16 | 16 | 16,5 | 0,28 | -0,82 | -0,22 | -1,32 | -1,1 |
| 100 | 2 | 2 | 1 | 18 | 18 | 18,5 | 0,38 | -0,7 | -0,12 | -1,2 | -1,08 |
| 101 | 2 | 2 | 2 | 16 | 16 | 16,5 | 0,29 | -0,62 | -0,21 | -1,12 | -0,91 |
| 102 | 2 | 2 | 2 | 17 | 17,5 | 17,5 | -0,1 | -0,98 | -0,1 | -0,98 | -0,88 |
| 103 | 2 | 2 | 2 | 14,5 | 15 | 16 | 0,39 | -0,31 | -0,61 | -1,31 | -0,7 |
| 104 | 2 | 2 | 1 | 14 | 14 | 14,5 | 0,16 | -0,37 | -0,34 | -0,87 | -0,53 |
| 105 | 2 | 2 | 2 | 15 | 15 | 15,5 | 0,77 | -0,16 | 0,27 | -0,66 | -0,93 |
| 106 | 2 | 2 | 1 | 16,5 | 17 | 17,5 | 0,5 | -0,24 | 0 | -0,74 | -0,74 |
| 107 | 2 | 2 | 1 | 17 | 17,5 | 18 | 1,2 | -0,72 | 0,7 | -1,22 | -1,92 |
| 108 | 2 | 2 | 2 | 17 | 17,5 | 18,5 | 0,25 | -0,08 | -0,75 | -1,08 | -0,33 |
| 109 | 2 | 2 | 2 | 17 | 17,5 | 18 | 0,79 | 0,16 | 0,29 | -0,34 | -0,63 |
| 110 | 2 | 2 | 2 | 17 | 17 | 17,5 | 0,24 | -0,4 | -0,26 | -0,9 | -0,64 |
| 111 | 2 | 2 | 2 | 17 | 17,5 | 18,5 | 0,57 | -0,05 | -0,43 | -1,05 | -0,62 |
| 112 | 3 | 1 | 2 | 17,5 | 18 | 18,5 | 0,17 | -0,23 | -0,33 | -0,73 | -0,4 |
| 113 | 3 | 1 | 1 | 17,5 | 18,5 | 19 | 0,84 | -0,07 | 0,34 | -0,57 | -0,91 |
| 114 | 3 | 1 | 1 | 20 | 21 | 22 | 0,23 | 0 | -0,77 | -1 | -0,23 |
| 115 | 3 | 1 | 1 | 19,5 | 20,5 | 21,5 | 0,71 | 0,04 | -0,29 | -0,96 | -0,67 |
| 116 | 3 | 1 | 1 | 18 | 19 | 19,5 | 0,1 | -0,57 | -0,4 | -1,07 | -0,67 |
| 117 | 3 | 1 | 1 | 19 | 20 | 21 | 0,74 | 0,04 | -0,26 | -0,96 | -0,7 |
| 118 | 3 | 1 | 1 | 19 | 20 | 20 | 0 | -0,41 | 0 | -0,41 | -0,41 |
| 119 | 3 | 1 | 1 | 19,5 | 20 | 20 | 0,48 | -1,55 | 0,48 | -1,55 | -2,03 |
| 120 | 3 | 1 | 1 | 17,5 | 17,5 | 18 | 0,46 | -0,28 | -0,04 | -0,78 | -0,74 |
| 121 | 3 | 1 | 1 | 19 | 19,5 | 20,5 | 0,42 | -0,13 | -0,58 | -1,13 | -0,55 |
| 122 | 3 | 1 | 2 | 15,5 | 16,5 | 17 | 0,69 | -0,56 | 0,19 | -1,06 | -1,25 |
| 123 | 3 | 1 | 1 | 18 | 19 | 20 | 0,49 | -0,23 | -0,51 | -1,23 | -0,72 |
| 124 | 3 | 1 | 1 | 15 | 15,5 | 16 | 0,26 | -0,46 | -0,24 | -0,96 | -0,72 |
| 125 | 3 | 1 | 1 | 19 | 19,5 | 20 | 0,41 | -0,31 | -0,09 | -0,81 | -0,72 |
| 126 | 3 | 1 | 1 | 14 | 14 | 15 | 0,83 | -0,51 | -0,17 | -1,51 | -1,34 |
| 127 | 3 | 1 | 1 | 19 | 19 | 20 | 1,29 | -0,09 | 0,29 | -1,09 | -1,38 |
| 128 | 3 | 1 | 1 | 17 | 18 | 19 | 0,8 | 0 | -0,2 | -1 | -0,8 |
| 129 | 3 | 1 | 1 | 14 | 15 | 15,5 | 0,32 | -0,61 | -0,18 | -1,11 | -0,93 |
| 130 | 3 | 2 | 2 | 17,5 | 17,5 | 18 | 0 | -0,24 | -0,5 | -0,74 | -0,24 |
| 131 | 3 | 2 | 2 | 17 | 17 | 17,5 | 0,23 | -0,12 | -0,27 | -0,62 | -0,35 |
| 132 | 3 | 2 | 2 | 18 | 19 | 19 | -0,21 | -0,98 | -0,21 | -0,98 | -0,77 |
| 133 | 3 | 2 | 2 | 17 | 18 | 17 | 0,51 | -1,08 | 1,51 | -0,08 | -1,59 |
| 134 | 3 | 2 | 2 | 17 | 17,5 | 18 | 0,3 | -0,48 | -0,2 | -0,98 | -0,78 |
| 135 | 3 | 2 | 2 | 16 | 16,5 | 17,5 | 0,65 | -0,31 | -0,35 | -1,31 | -0,96 |
| 136 | 3 | 2 | 2 | 14 | 15 | 16,5 | 0,6 | 0 | -0,9 | -1,5 | -0,6 |
| 137 | 3 | 2 | 1 | 14,5 | 15,5 | 16 | -0,14 | -0,46 | -0,64 | -0,96 | -0,32 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 138 | 3 | 2 | 2 | 16 | 17 | 18 | 0,61 | 0,17 | -0,39 | -0,83 | -0,44 |
| 139 | 3 | 2 | 1 | 16 | 16 | 17,5 | 1,12 | 0,41 | -0,38 | -1,09 | -0,71 |
| 140 | 3 | 2 | 2 | 16 | 17 | 18,5 | 0,58 | 0,18 | -0,92 | -1,32 | -0,4 |
| 141 | 3 | 2 | 2 | 16 | 16,5 | 17 | 0,49 | -0,17 | -0,01 | -0,67 | -0,66 |
| 142 | 3 | 2 | 1 | 15,5 | 16,5 | 17,5 | 0,37 | -0,15 | -0,63 | -1,15 | -0,52 |
| 143 | 3 | 2 | 1 | 14 | 14 | 15 | 1,1 | -0,49 | 0,1 | -1,49 | -1,59 |
| 144 | 3 | 2 | 2 | 14 | 14,5 | 14,5 | 0,18 | -0,45 | 0,18 | -0,45 | -0,63 |
| 145 | 3 | 2 | 2 | 13 | 14 | 14,5 | 0,43 | -0,43 | -0,07 | -0,93 | -0,86 |
| 146 | 3 | 2 | 2 | 14 | 14,5 | 15 | 0,27 | -0,21 | -0,23 | -0,71 | -0,48 |
| 147 | 3 | 2 | 2 | 15 | 15,5 | 16 | 0,21 | -0,47 | -0,29 | -0,97 | -0,68 |
| 148 | 3 | 2 | 1 | 15 | 15,5 | 16 | 0,29 | -0,77 | -0,21 | -1,27 | -1,06 |
| 149 | 3 | 2 | 2 | 18 | 19 | 19,5 | 0,52 | -0,24 | 0,02 | -0,74 | -0,76 |
| 150 | 3 | 2 | 2 | 13,5 | 14,5 | 15,5 | 0,1 | -0,02 | -0,9 | -1,02 | -0,12 |
| 151 | 3 | 2 | 2 | 13 | 14 | 14,5 | 0,19 | -0,39 | -0,31 | -0,89 | -0,58 |
| 152 | 3 | 2 | 2 | 14 | 14 | 15 | 0,37 | 0 | -0,63 | -1 | -0,37 |
| 153 | 3 | 2 | 2 | 14 | 14,5 | 14,5 | 0 | -1,19 | 0 | -1,19 | -1,19 |
| 154 | 3 | 2 | 1 | 14 | 14,5 | 15 | 0,25 | -0,89 | -0,25 | -1,39 | -1,14 |
| 155 | 3 | 2 | 2 | 16,5 | 17 | 17,5 | 0,21 | -0,42 | -0,29 | -0,92 | -0,63 |
| 156 | 3 | 2 | 2 | 14 | 14,5 | 15,5 | 0,88 | -0,47 | -0,12 | -1,47 | -1,35 |
| 157 | 3 | 2 | 2 | 18,5 | 19,5 | 20 | 0,36 | -0,52 | -0,14 | -1,02 | -0,88 |
| 158 | 3 | 2 | 2 | 18 | 19 | 20 | 0,62 | 0,1 | -0,38 | -0,9 | -0,52 |
| 159 | 3 | 2 | 2 | 16 | 16 | 16,5 | 0,71 | -0,23 | 0,21 | -0,73 | -0,94 |
| 160 | 3 | 2 | 2 | 16 | 16,5 | 17,5 | 0,33 | -0,32 | -0,67 | -1,32 | -0,65 |
| 161 | 3 | 2 | 2 | 18 | 18 | 19 | 0,51 | 0,08 | -0,49 | -0,92 | -0,43 |
| 162 | 3 | 2 | 2 | 16,5 | 16,5 | 17 | 0,37 | -0,22 | -0,13 | -0,72 | -0,59 |
| 163 | 3 | 2 | 2 | 17,5 | 17,5 | 18 | 0,14 | -0,31 | -0,36 | -0,81 | -0,45 |
| 164 | 3 | 2 | 1 | 17 | 17,5 | 18 | 0,17 | -0,8 | -0,33 | -1,3 | -0,97 |
| 165 | 3 | 2 | 2 | 18 | 18 | 19 | 0,48 | -0,04 | -0,52 | -1,04 | -0,52 |

Tab. 22: Darstellung der Messergebnisse für alle Versuchsreihen (**Gerät 1** = VDW.Gold, 2 = Dentaport ZX, 3 = EndoPilot; **Art 1** = einwurzelig, 2 = mehrwurzelig; **Kanalverlauf 1** = gerade, 2 = gebogen)

11 Danksagung

An erster Stelle gilt mein Dank meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. Ursula Platzer, Direktorin der Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde der Klinik und Poliklinik für Zahn,- Mund,- und Kieferheilkunde Eppendorf, für die Überlassung des Themas und die Möglichkeit in der von ihr geleiteten Abteilung im Rahmen dieser Dissertation zu forschen.

Ebenso herzlicher Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dr. Rüdiger Lemke, Oberarzt dieser Abteilung, der mich nicht nur von der ersten Idee bis zur Fertigstellung der Dissertation fürsorglich begleitet hat, sondern auch schon im Rahmen meines Studiums am Universitätsklinikum Eppendorf einen prägenden Einfluss auf mich hatte. Frau Prof. Dr. Platzer und Herr Dr. Lemke haben schon frühzeitig mein besonderes Interesse für die Endodontie geweckt; durch die Führung und Freiheit, die sie mir gaben, ist diese Arbeit möglich geworden.

Frau Famouri und Frau Schwarz danke ich für die vielen aufmunternden Worte während der Materialausgabe in der Zeit der praktischen Versuche.

Herrn Prof. Dr. Uwe J. Rother und Herrn Dr. Andreas Fuhrmann aus der Poliklinik für Röntgendiagnostik schulde ich Dank für die Vermittlung des theoretischen Wissens über die Radiologie während meines Studiums und die Überlassung der technischen Geräte zur praktischen Versuchsdurchführung.

Herrn Fischer danke ich für seine Anleitung und Hilfestellung bezüglich der mikroskopischen Auswertung, ebenso Herrn Kersten für die sorgsame und geduldige Betreuung in allen Fragen der Statistik.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden dafür, dass sie mich mit viel Zuspruch auf dem Weg der Promotion begleitet haben.

12 Lebenslauf

12.1 Persönliche Angaben

Name: Marc Cord Roderjan
Geburtstag: 24.08.1982
Geburtsort: Hamburg

12.2 Werdegang

| | |
|-------------|---|
| 14.06.2002 | Erwerb der Allgemeinen Hochschulreife |
| 2002 – 2003 | Zivildienst |
| 2003 | Beginn des Zahnmedizinstudiums am Universitätsklinikum Hamburg Eppendorf |
| 23.03.2004 | Naturwissenschaftliche Vorprüfung (gut) |
| 02.11.2005 | Physikum (sehr gut) |
| 14.07.2008 | Staatsexamen (gut) |

EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG:

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Unterschrift: Marc Roderjan