

Aus der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie

(Prof. Dr. Annette Wiegand)

im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

Übereinstimmung der Ergebnisse der elektrischen Bestimmung der
Wurzelkanallänge bei Verwendung von Endometriegeräten derselben
Gerätemarke – eine In-vitro-Studie

INAUGURAL- DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
für Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Franziska Irene Haupt

aus

Hannover

Göttingen 2016

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

I. Berichterstatter/in: Prof. Dr. Michael Hülsmann

II. Berichterstatter/in:

III. Berichterstatter/in:

Tag der mündlichen Prüfung

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Literaturübersicht	3
2.1 Die endodontische Behandlung	3
2.2 Anatomie des Wurzelkanalsystems	5
2.3 Bedeutung der Arbeitslänge	7
2.4 Methoden zur Bestimmung der Arbeitslänge	9
2.4.1 Taktile Methode	9
2.4.2 Röntgenmesstechnik	9
2.4.3 Elektrische Längenmessung	10
3. Ziel der Arbeit	23
4. Material und Methoden	24
4.1 Auswahl der Messgeräte	24
4.1.1 Apex ID	24
4.1.2 Raypex 6	26
4.1.3 Root ZX	27
4.1.4 Dentaport ZX	29
4.1.5 ProPex II	29
4.2 Auswahl der Zähne	31
4.3 Versuchsaufbau	31
4.4 Statistische Auswertung	34
5. Ergebnisse	35
6. Diskussion	49
6.1 Material und Methode	49
6.2 Diskussion der Ergebnisse	52

7. Schlussfolgerungen	55
8. Zusammenfassung	56
9. Literaturverzeichnis	58
Anhang	64
Einverständniserklärung	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Anatomie und Topographie der Wurzelspitze	6
Abbildung 2-2: Schematische Zeichnung der apikalen Konstriktion mit deutlich dargestelltem Übergang von Wurzelzement zu Dentin	7
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Spannungsverlaufs im Wechselstromkreis	11
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Kondensators	12
Abbildung 4-1: Display des Endometriegerätes Apex ID	24
Abbildung 4-2: Display des Endometriegerätes Raypex 6	26
Abbildung 4-3: Display des Endometriegerätes Root ZX	28
Abbildung 4-4: Display des Endometriegerätes Dentaport ZX	29
Abbildung 4-5: Display des Endometriegerätes ProPex II	30
Abbildung 4-6: Festlegung der Länge des Wurzelkanals	32
Abbildung 4-7: Versuchsaufbau zur vergleichenden Messung der Endometriegeräte	33
Abbildung 5-1: Vergleich der unterschiedlichen fünf Gerätetypen	35
Abbildung 5-2: Vergleich der unterschiedlichen Messstationen	37
Abbildung 5-3: Vergleich der unterschiedlichen Konditionen	39
Abbildung 5-4: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps Raypex 6	40
Abbildung 5-5: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps Raypex 6	40
Abbildung 5-6: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps Dentaport ZX	41
Abbildung 5-7: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps Dentaport ZX	41

Abbildung 5-8: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps Apex ID.	42
Abbildung 5-9: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps Apex ID	43
Abbildung 5-10: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps Root ZX	44
Abbildung 5-11: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps Root ZX	44
Abbildung 5-12: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps ProPex II	45
Abbildung 5-13: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps ProPex II	46
Abbildung 5-14: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse bei Messstation 3 in Abhängigkeit vom Gerätetyp	47
Abbildung 5-15: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse bei Messstation 6 in Abhängigkeit vom Gerätetyp	47
Abbildung 5-16: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse bei Messstation 7 in Abhängigkeit vom Gerätetyp	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Messgenauigkeit von Apexlokalisatoren. <i>In-vivo</i> -Studien der letzten Jahre	22
Tabelle 4-1: Für jedes Endometriegerät verwendetes Messprotokoll	33
Tabelle 5-1: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse bei Betrachtung der einzelnen Gerätetypen	36
Tabelle 5-2: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse innerhalb einer Messstation	38

1. Einleitung

Die Endodontie beschäftigt sich sowohl mit der Anatomie, Funktion und Gesundheit als auch mit der Prävention, Diagnostik und Therapie von Erkrankungen der Zahnpulpa und der angrenzenden periradikulären Gewebe. Da das Endodont über das Foramen apicale und akzessorische Seitenkanäle mit dem Parodont in Verbindung steht, greifen Erkrankungen der Pulpa bei ausbleibenden therapeutischen Maßnahmen vor allem im Bereich des Apex auf das Parodont über (Hellwig et al. 2009). Ist die Pulpa irreversibel erkrankt oder durch Traumata geschädigt, soll die Therapie der Wurzelkanalbehandlung zum Erhalt des Zahnes und gesunder periradikulärer Strukturen führen oder, im Falle von bereits erkranktem umgebendem Gewebe, dessen Heilung bewirken (European Society of Endodontology 2006).

Nachdem die Wurzelkanalbehandlung sich bis vor einigen Jahrzehnten aus technischen Gründen auf einwurzelige Zähne beschränkte, hat sie sich heutzutage durch Verfeinerung und Verbesserung des Instrumentariums sowie durch zunehmende Spezialisierung in diesem Fachgebiet als Therapiemethode im gesamten Gebiss manifestiert.

Auch wenn die Endodontie innerhalb der zahnärztlichen Disziplinen einen kleinen Teilbereich umfasst, ist sie sowohl für die Schmerztherapie als auch für die unmittelbare Versorgung traumatisch geschädigter Zähne von großer Bedeutung (Guldener und Langeland 1993).

Kernpunkt einer zeitgemäßen endodontischen Behandlung ist die möglichst weitgehende Reinigung des anatomisch sehr komplexen endodontischen Hohlraumsystems von Geweberesten und Mikroorganismen. Dies setzt eine möglichst präzise Vermessung der räumlichen Ausdehnung des Endodonts voraus, die überwiegend anhand von Röntgenaufnahmen vorgenommen wird. Zusätzlich können elektrische Messgeräte zu Hilfe genommen werden, die eine Abschätzung der Zahnlänge in koronal-apikaler Richtung ermöglichen. In zahlreichen Studien wurde nachgewiesen, dass sich die Messgenauigkeit solcher Apexlokalisatoren (*apex locators*) in der Bestimmung der Lage des Foramen physiologicum durchaus im Bereich von 90% bewegen kann. In allen

vorliegenden Studien wurde aber immer nur mit einem Gerät eines bestimmten Gerätetyps gearbeitet, so dass die berichteten Werte nur für dieses spezielle Gerät betrachtet, nicht aber für den Gerätetyp generalisiert werden dürfen. Inwieweit die Messgenauigkeit innerhalb einer Geräteserie konstant ist, wurde bislang nicht untersucht.

2. Literaturübersicht

2.1 Die endodontische Behandlung

Der Begriff Endodontie bezeichnet die Diagnostik und Therapie von Erkrankungen des Endodonts sowie des periradikulären Gewebes. Die Ziele der endodontischen Behandlung sind sehr umfassend: Je nach Erkrankung zielt die Therapie auf die Vitalerhaltung der Pulpa, die Vermeidung von Schäden der periapikalen Gewebe oder die Heilung letzterer. Vorrangig soll sie aber die langfristige Erhaltung des Zahnes und dessen Funktionalität realisieren. Eine Behandlung wird als erfolgreich bewertet, wenn keine Schmerzen, Schwellungen, Fistelgänge oder Funktionsverlust vorliegen. Das Röntgenbild zeigt nach erfolgreicher Therapie keine apikale oder laterale Aufhellung sowie einen Parodontalspalt mit physiologischer Breite. Verändert sich eine Läsion röntgenologisch nur geringfügig oder bleibt unverändert bestehen, kann die Behandlung nicht als erfolgreich bewertet werden. In diesem Fall sind weitere röntgenologische Kontrollen notwendig. Wenn nach vier Jahren keine vollständige Ausheilung zu erkennen ist, muss die Therapie als Misserfolg eingestuft werden (European Society of Endodontology 2006).

Klinisch zu differenzierende Erkrankungen des Endodonts sind die reversible und irreversible Pulpitis sowie die Pulpanekrose. Meistens entsteht eine Nekrose als Folge kariöser Läsionen und folgender bakterieller Besiedlung des Dentins und der Pulpa. Sterile Nekrosen treten nur in Ausnahmefällen nach Traumata auf. Bei ausbleibender Therapie führt eine Nekrose zur Entzündung des periapikalen Gewebes mit der röntgenologisch sichtbaren Konsequenz einer Parodontitis apicalis. Jedoch stellt diese nicht die einzige Folgeerscheinung entzündlicher Prozesse des Endodonts dar. Auch interradiäre oder laterale Läsionen sowie interne und apikale Resorptionen müssen bei der Suche nach pathologischen Befunden in Erwägung gezogen werden. Gabor et al. stellten ein erhöhtes Auftreten interner Resorptionen bei Zähnen mit Inflammation oder Nekrose der Pulpa fest (Gabor et al. 2012).

Die Erkrankung des Endodonts stellt einen entzündlichen Fokus dar und kann den Gesamtorganismus erheblich beeinträchtigen. Daher ist es umso wichtiger, die systemischen Probleme, die eine intraorale Entzündung hervorrufen kann, zu berücksichtigen. So werden beispielsweise kardiovaskuläre Erkrankungen, Arteriosklerose, Diabetes und Osteoporose mit entzündlichen Prozessen endodontischer Ursache in Verbindung gebracht (Hülsmann 2008).

Um das Risiko einer Bakteriämie während der Wurzelkanalbehandlung zu verringern, sind anatomische Kenntnisse des Zahns für den Behandlungserfolg sehr wichtig. Nach Debelian et al. (1998) kann die endodontische Behandlung durch Verschleppung von Bakterien zur Bakteriämie führen (Debelian et al. 1998). Nach einer weiteren Studie von Debelian et al. (1992) steigt das Risiko der Bakteriämie nach Überinstrumentierung in den periapikalen Bereich (Debelian et al. 1992). Auch Bender et al. (2003) konnten in 25% der untersuchten Fälle nach Überinstrumentierung Bakterienkulturen im Blut nachweisen (Bender et al. 2003). Diese Ergebnisse zeigen, dass die korrekte Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge und damit die Vermeidung des Überpressens von Debris und Mikroorganismen aus dem infizierten Wurzelkanal in den periradikulären Knochen unabdingbar sind.

Es ist das Ziel der Wurzelkanalbehandlung, die Ausweitung entzündlicher Prozesse in das periapikale Gewebe zu vermeiden. Meistens zeigt diese Ausbreitung über den Periapex hinaus einen chronischen Verlauf. Die mögliche akute Exazerbation der Entzündung kann zur Abszessbildung und Logenausbreitung führen. Bei bereits etablierter Entzündung in der periapikalen Region bewirkt die vollständige Entfernung pathogener Substanzen aus dem Kanalsystem mit großer Wahrscheinlichkeit die Heilung der Läsion. Bereits Hippocrates berichtete um 460 v. Chr. über die *Austrocknung des Zahninneren durch Hitze* als mögliche Therapie endodontischer Beschwerden (Hülsmann 2008).

Die endodontische Behandlung nach heutigen Standards umfasst die Entfernung infizierten und nekrotischen Gewebes mit Hilfe chemischer und mechanischer Methoden und abschließend den bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanalsystems. Der Erfolg der Behandlung wird klinisch und röntgenologisch beurteilt. Zum einen sollte ein erfolgreich behandelter Zahn

klinisch beschwerdefrei und funktionell belastbar sein, zum anderen ist aber auch die röntgenologische Kontrolle des periapikalen Gewebes wichtig, um die Heilung präoperativ existierender Läsionen einschätzen zu können. Die Erfolgsquoten endodontischer Behandlungen sind vor allem von der Ausgangssituation des Zahnes und von intraoperativen Komplikationen abhängig. So geben Imura et al. einen Erfolg von 94,5% für endodontische Initialbehandlungen an, sofern präoperativ röntgenologisch keine apikale Läsion zu erkennen war. Bei vorliegender apikaler Beteiligung liegt der Erfolg nur noch bei 81,2%. Traten intraoperative Komplikationen auf, sinkt die Erfolgswahrscheinlichkeit auf 64,7% (Imura et al. 2007). Auch Marquis et al. nennen eine Erfolgsquote von 93% bei gesundem Parodont und eine reduzierte Erfolgsrate von 83% bei existierender apikaler Läsion. Wird eine Revisionsbehandlung vorgenommen, muss ebenfalls von einer reduzierten Erfolgsrate ausgegangen werden (Marquis et al. 2006). So liegt der Heilungserfolg für wiederholte Behandlungen laut Torabinejad et al. nach 4-6 Jahren postoperativ bei 83% (Torabinejad et al. 2009).

2.2 Anatomie des Wurzelkanalsystems

Eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung erfordert ausreichende Kenntnisse über die Anatomie des Zahnes und vor allem des Kanalsystems. Abhängig vom Zahntyp müssen verschiedene anatomische Merkmale wie die Anzahl und Form der Wurzeln und Wurzelkanäle sowie die Lage der Kronenpulpa und der Kanaleingänge beachtet werden. Wurzelkanäle können innerhalb einer Wurzel getrennt verlaufen oder sich vor dem Apex vereinigen. Genauso kann sich ein Kanal innerhalb der Wurzel aufzweigen und in getrennten apikalen Foramina oder als apikales Delta enden. Nach Gutierrez und Aguayo (1995) variiert die Anzahl der Foramina von 1 bis 6. Diese enden etwa 0,2 - 3,8 mm koronal des Apex (Gutierrez und Aguayo 1995). Das Foramen apicale ist in der röntgenologischen Einzelzahnaufnahme aufgrund der Zweidimensionalität und Überlagerung nicht eindeutig zu lokalisieren und kann möglicherweise koronal des röntgenologischen Apex liegen (Hellwig et al. 2009).

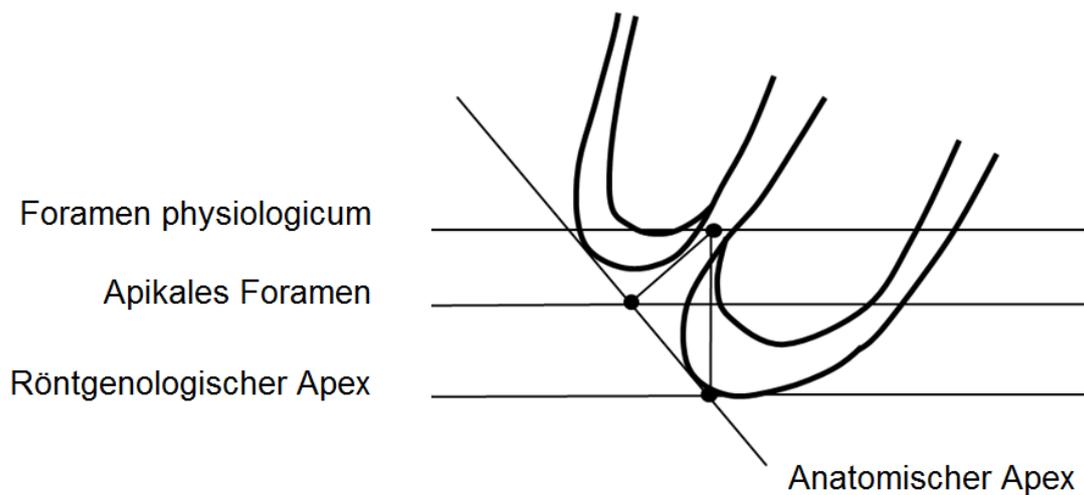


Abbildung 2-1: Anatomie und Topographie der Wurzelspitze.

In mehr als 60% der Fälle liegt das apikale Foramen nicht am Apex der Wurzel. Auch die Lage des Foramen physiologicum, des idealen Endpunktes einer Wurzelkanalfüllung, ist röntgenologisch nicht zu identifizieren. Einige Studien geben Mittelwerte über die Distanzen an. So ermittelten Vande Voorde und Björndahl zwischen dem anatomischen Apex und dem Foramen apicale einen gemittelten Abstand von 0,3 mm sowie zwischen dem Foramen apicale und dem Foramen physiologicum einen Abstand von 0,8 mm. Dummer et al. gaben einen ähnlichen Wert für die Distanz vom anatomischen Apex zum Foramen apicale von 0,38 mm an. Zwischen dem anatomischen Apex und dem Foramen physiologicum betragen die Abstände nach Dummer et al. 0,89 mm und nach Vande Voorde und Björndahl 1,1 mm (Vande Voorde und Björndahl 1969, Dummer et al. 1984). Chapman gab eine Distanz von 0,5 mm in 92% der Fälle an (Chapman 1969). Häufig stellt das Foramen apicale nicht die einzige Kommunikation zwischen dem Endodont und Parodont dar; zusätzlich können sich Seitenkanäle weiter koronal der Wurzelspitze oder sogar auf Höhe der Furkation befinden (Hülsmann 2008). Diese Seitenkanäle stellen Nischen für Bakterien dar, deren Desinfektion mit Hilfe chemischer und mechanischer Methoden nicht gewährleistet werden kann.

2.3 Bedeutung der Arbeitslänge

Die korrekte Länge der Präparation und der Wurzelkanalfüllung wurde in der Literatur schon sehr ausgiebig diskutiert. Bei näherer Betrachtung des anatomischen Aufbaus der Wurzelspitze kann der Grund für die kontroverse Diskussion verdeutlicht werden. So kann die Wurzelspitze in verschiedene Bereiche eingeteilt werden. Der am weitesten koronal liegende Bereich ist das Foramen physiologicum oder synonym die apikale Konstriktion. An dieser Stelle geht das Zement der äußeren Wurzeloberfläche in das Dentin der Wurzelkanalwand über (Ricucci 1998).

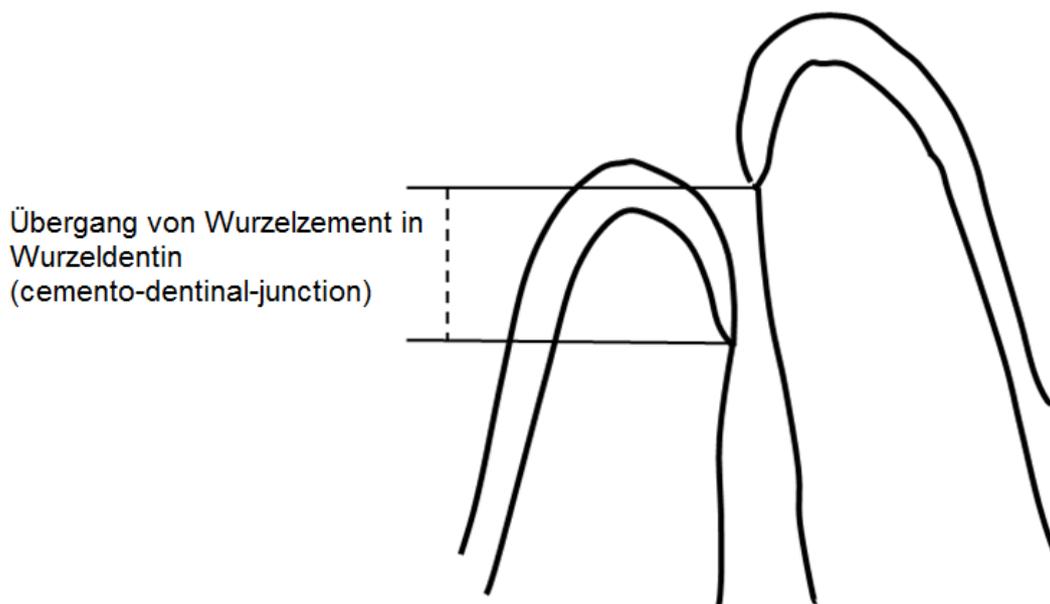


Abbildung 2-2: Schematische Zeichnung der apikalen Konstriktion mit deutlich dargestelltem Übergang von Wurzelzement zu Dentin.

Die apikale Konstriktion stellt nur in wenigen Fällen eine singuläre Einschnürung dar. Häufiger verläuft sie leicht konisch oder parallel (Dummer et al. 1984). Weiter apikal eröffnet sie sich in das Foramen apicale. Der röntgenologische Apex ist der im Röntgenbild am weitesten apikal liegende Punkt der Wurzel. Um die Erfolgsaussicht einer Wurzelkanalbehandlung zu erhöhen, ist die möglichst vollständige Desinfektion des Wurzelkanals unabdingbar. Wird der apikale Anteil der Wurzel nicht ausreichend mit

Natriumhypochloritlösungen desinfiziert, können in diesem Bereich Bakterien verbleiben und unter Umständen zum Misserfolg der Behandlung führen. Bei Überpressung der Spülflüssigkeit oder der Wurzelfüllmaterialien über den Apex hinaus kann dies Irritationen und damit einhergehende Beschwerden verursachen (Wu und Wesselink 2001). Weine (1982) legte dar, dass die Präparation und Füllung des Kanals an der apikalen Konstriktion enden sollten (Weine 1982). Diese Forderung wurde von Ingle (1983) und Nguyen (1985) bestätigt (Ingle 1983, Nguyen 1985) Um klinisch diese Vorgabe möglichst genau zu erreichen, wird eine Arbeitslänge von 0,5 - 1 mm koronal des röntgenologischen Apex angestrebt. Bei Zähnen mit bestehender parodontaler Läsion empfiehlt Weine (1982) aufgrund möglicher apikaler Resorptionen einen Abstand von 1,5 mm vom röntgenologischen Apex und Guldner (1985) eine Distanz von 0,5 mm (Weine 1982, Guldner 1985). Pecchioni (1983) sieht im Gegensatz dazu eine Füllung über den Apex hinaus als akzeptabel an (Pecchioni 1983). Wu und Wesselink (2001) schlussfolgern, dass je nach Ausgangszustand des Zahnes die Arbeitslänge variieren kann. So muss bei der Diagnose einer irreversiblen Pulpitis der Wurzelkanal nicht auf voller Länge präpariert und gefüllt werden, da sich die Infektion der Pulpa in solchen Fällen auf den koronalen Anteil beschränkt. Vielmehr verhindert apikal verbliebenes nicht infiziertes Pulpagewebe den Kontakt der Spülflüssigkeiten und Füllmaterialien mit dem Periapex und kann so Irritationen reduzieren. Im Gegensatz dazu sollte bei vorliegender Nekrose die Wurzelkanalfüllung nicht kürzer ausfallen als die Ausdehnung der bakteriellen Besiedelung nach apikal, da dies unter Umständen zum Verbleib von Bakterien im apikalen Bereich und damit zum Voranschreiten der Infektion führen kann. Nach Wu und Wesselink (2001) führt bei vorliegender Nekrose sowohl die Behandlung über den Apex hinaus als auch die zu kurze Wurzelkanalfüllung zu signifikant niedrigeren Erfolgsquoten. In diesen Fällen ist die genaue Lokalisation der apikalen Konstriktion von großer Bedeutung (Wu und Wesselink 2001).

2.4 Methoden zur Bestimmung der Arbeitslänge

2.4.1 Taktile Methode

Die taktile Methode zur Bestimmung der Wurzelkanallänge gilt heutzutage nicht mehr als Mittel der Wahl. Zum einen führt der erhöhte Reibungswiderstand in gekrümmten und kalzifizierten Kanälen häufig fälschlicherweise zum vorzeitigen Ertasten einer real nicht vorhandenen Konstriktion (Khan und Sobhi 2003), zum anderen kann bei Zähnen mit apikaler Läsion das Foramen durch resorptive Prozesse verändert und die apikale Konstriktion erweitert sein, so dass sie mit Handinstrumenten nicht mehr zu tasten ist. Letztere Komplikation tritt auch bei Zähnen mit nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum auf.

Auch die Schmerzreaktion des Patienten bei Überinstrumentierung ist kein adäquater Anhaltspunkt für die Bestimmung der Arbeitslänge. Bei vitaler Pulpa liegt der schmerzauslösende Punkt an der koronalsten Stelle zwischen Foramen apicale und Wurzelkanaleingang, an der noch vitales Gewebe vorliegt. Bei nicht-vitaler Pulpa mit apikaler Läsion führt jedoch erst der Kontakt mit gesundem periapikalem Gewebe zur Schmerzreaktion (Guldener und Langeland 1993). Aber auch Druckveränderungen, verursacht durch die Bewegungen der Instrumente, können Schmerzreaktionen provozieren.

2.4.2 Röntgenmesstechnik

Die Röntgenmesstechnik basiert genau genommen nicht auf einer exakten Messung, sondern auf einer Schätzung der Wurzelkanallänge. Der Grund hierfür sind Ungenauigkeiten, die bei einer Einzelaufnahme nicht zu vermeiden sind. Zum einen ist die apikale Konstriktion im Röntgenbild nicht eindeutig zu lokalisieren, da die einzige genau zu erkennende Region der röntgenologische Apex ist, also der im Röntgenbild am weitesten apikal liegende Punkt, dessen Lage im Röntgenbild aber von der jeweiligen Strahlengeometrie abhängt. Es handelt sich somit nicht um eine real existierende anatomische Struktur. Zum anderen wird eine dreidimensionale Struktur zweidimensional abgebildet. Demzufolge führt dies zu einer Überlagerung von anatomischen Strukturen, die eine genaue Beurteilung des

Röntgenbildes erschwert. Verschiedene Methoden zur radiologischen Messung der Wurzelkanallänge wurden bereits von Bramante und Berbert (1974) ausführlich untersucht (Bramante und Berbert 1974). Laut Ravanshad et al. liegt die Erfolgsrate der Röntgenmesstechnik bei 82,1%; 7,1% der Kanäle waren unterinstrumentiert, bei 10,7% der Kanäle lag eine Überinstrumentierung vor (Ravanshad et al. 2010). Diese Erfolgsquote stimmt mit der Angabe von Olson et al. von 82% überein (Olson et al. 1991). Im Gegensatz dazu geben ElAyouti et al. (2001) an, dass bei sichtbarem Abstand der Instrumentenspitze vom röntgenologischen Apex von 0 - 2 mm bereits eine Überinstrumentierung vorliegen kann. Die Wahrscheinlichkeit hierfür liegt für Prämolaren bei 51% und für Molaren bei 22% (ElAyouti et al. 2001). Diese Aussage wird durch Stein und Corcoran (1992) mit der Angabe unterstützt, dass die Lage der Instrumentenspitze röntgenologisch etwa 0,7 mm kürzer erscheint als tatsächlich inseriert (Stein und Corcoran 1992).

2.4.3 Elektrische Längenmessung

Die elektrische Längenmessung stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Wurzellänge zu bestimmen. Allerdings wird sie häufig mit der Röntgenmesstechnik kombiniert, um einerseits Wurzelkanalkrümmungen darzustellen und andererseits etwaige falsche Ergebnisse durch beispielsweise Perforationen, Querströme oder versehentlichen Kontakt des Messinstrumentes mit metallischen Restaurationen auszuschließen.

2.4.3.1 Physikalische Grundlagen

Grundsätzlich bestehen Endometriegeräte aus zwei Polen, zwischen denen eine Spannung (U) angelegt wird, einer Spannungsquelle und einem Messinstrument. Mit Hilfe des Messinstrumentes kann der Widerstand zwischen beiden Polen bestimmt werden. Um die Länge des Wurzelkanals bestimmen zu können, berührt der eine Pol die Wangenschleimhaut des Patienten, während der andere Pol, ein Stahlinstrument, im Inneren des Zahnes liegt. Das zwischen den Polen liegende Gewebe (Desmodont und Wangenschleimhaut) dient als leitendes Medium. Das Prinzip der Messung beruht auf der Veränderung des Widerstandes abhängig von der Position der Feile im Wurzelkanal. Die

Zahnhartsubstanz bildet einen höheren Widerstand als das Desmodont, dementsprechend sinkt der Widerstand bei Überschreiten der apikalen Konstriktion durch die Instrumentenspitze.

Wird zwischen zwei Polen Gleichstrom angelegt, handelt es sich bei einem zwischengeschalteten Widerstand um einen Ohmschen Widerstand ($R\Omega$).

Dieser kann mit Hilfe der Formel

$$R\Omega = \frac{U}{I} \quad (1)$$

dargestellt werden und wird in der Messeinheit Ohm (Ω) angegeben, wobei U die Stromspannung und I die Stromstärke definiert.

Im Gleichstromkreis fließt bei gleichbleibender Stromstärke eine bestimmte Menge Strom pro Zeit. Die Stromstärke und Stromspannung nehmen also über einen längeren Zeitraum konstante Werte an. Im Gegensatz dazu ändert sich bei Wechselstrom die Stromstärke innerhalb einer Zeiteinheit in Form einer Sinuskurve (Nekoofar et al. 2006) (Abbildung 2-3).

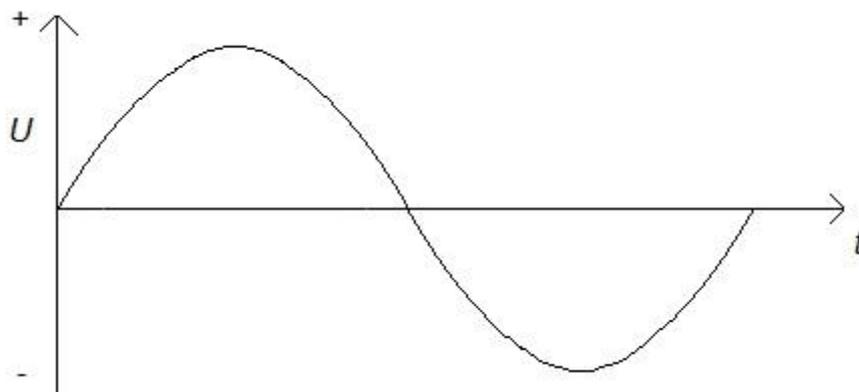


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Spannungsverlaufs im Wechselstromkreis.

Der Widerstand in einem Wechselstromkreis wird durch das Zwischenschalten eines Kondensators erzeugt, der einen kapazitiven Widerstand (R_c) darstellt.

Enthält ein Wechselstromkreis sowohl Ohmsche Widerstände ($R\Omega$) als auch kapazitive Widerstände (Rc), wird die Gesamtheit beider als Impedanz Z bezeichnet (Hör und Attin 2001, Nekoofar et al. 2006).

Demnach folgt

$$Z = \sqrt{(R\Omega^2 + Rc^2)} \quad (2)$$

Ein Kondensator im Gleichstromkreis, in dem die Pole entweder als Kathode oder als Anode festgelegt sind, lädt sich innerhalb einer bestimmten Zeit so weit auf, dass die Spannung zwischen den Platten des Kondensators so groß ist wie die angelegte Spannung U (Abbildung 2-4).

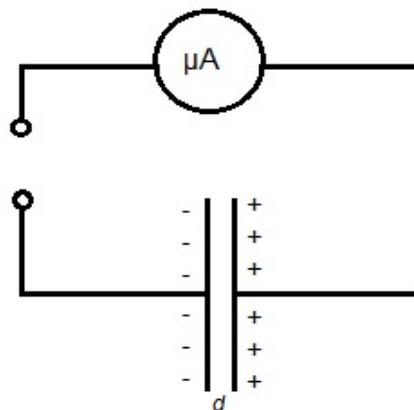


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Kondensators, d = Distanz zwischen beiden Kondensatorplatten.

Die Ladungsmenge, die ein Kondensator aufnehmen kann, wird durch seine Kapazität C bestimmt. Diese ist abhängig von der Materialkonstante ϵ , der Größe der Kondensatorplatten A und deren Abstand zueinander d .

$$C = \frac{\varepsilon \times A}{d} \quad (3)$$

Ein Kondensator ist für Gleichspannung nicht durchlässig und bildet im Gleichstromkreis einen unendlich großen Widerstand.

Im Wechselstromkreis wird ein Kondensator durch den Wechsel der Pole auf- und abgeladen. Dadurch verhält er sich wie ein kapazitiver Widerstand, dargestellt durch die Formel

$$R_c = \frac{1}{2\pi \times f \times C} \quad (4)$$

wobei f die Frequenz des sinusoidalen Wechselstroms und C die Kapazität des Kondensators darstellen.

Der kapazitive Widerstand ist im Gegensatz zum Ohmschen Widerstand von der Kapazität des Kondensators und der Frequenz der Wechselstromquelle abhängig.

Je höher die Frequenz f ist, desto kleiner wird der kapazitive Widerstand R_c (Nekoofar et al. 2006).

Endometrische Messungen, die auf Gleichspannung beruhen, sind mit bestimmten Ungenauigkeiten assoziiert. Zum einen kommt es bei Kontakt mit Elektrolytlösungen zur Polarisierung der Pole und damit zu instabilem Ionenfluss, da sich die Ionenanzahl um die Pole herum verändert (Hör und Attin 2001). Zum anderen sind Gleichstromgeräte abhängig vom umgebenden Milieu. Bereits bei geringer Flüssigkeitsmenge im Wurzelkanal sinkt der gemessene Widerstand vor dem Erreichen der apikalen Konstriktion und das Messgerät gibt einen verfrühten apikalen Endpunkt an.

Durch Wechselspannung mit hohen Frequenzen lässt sich die Polarisierung verhindern, da es durch den ständigen und raschen Wechsel der Pole nicht zu messbaren Änderungen der Elektrolytkonzentration kommt (Nekoofar et al. 2006).

Das Prinzip der absoluten Impedanzmessung

Bei Betrachtung eines idealisierten trockenen Wurzelkanals mit nur einer apikalen Verbindung zum parodontalen Ligament und seinen umgebenden Strukturen stellt die Zahnwurzel aus Dentin und Zement einen Isolator dar, der die Richtung des Stromflusses zwischen Instrumentenspitze und parodontalem Ligament vorgibt. Wird ein Messgerät mit Wechselstromkreis angeschlossen, das mit nur einer Frequenz misst, kann bei Kontakt der Instrumentenspitze mit dem parodontalen Gewebe die Gewebeimpedanz ZG gemessen werden. Diese besteht aus einem konstanten (ohmschen) Gewebewiderstand ($R\Omega G$) und einem kapazitiven Anteil (RcG). Bei bekanntem konstantem Gewebewiderstand von etwa $6\text{ k}\Omega$ kann die kapazitive Komponente ermittelt werden (Pahncke und Voß 1991, Hör und Attin 2001).

Im feuchten Wurzelkanal existieren durch den Kontakt des Handinstrumentes mit der leitenden Flüssigkeit zusätzlich zur Gewebeimpedanz weitere Impedanzen, die Elektrodenimpedanzen ZE . Der Übergang von dem metallischen Leiter zum flüssigen Medium stellt einen Widerstand dar, der ebenfalls aus einem ohmschen ($R\Omega E$) und einem kapazitiven Widerstand (RcE) besteht (Visser et al. 1991, Hör und Attin 2001). Die Gesamtimpedanz Z im flüssigkeitsgefüllten Kanal setzt sich demnach aus der Gewebeimpedanz (ZG) und der Elektrodenimpedanz (ZE) zusammen.

$$Z = ZG + ZE$$

(5)

Da die Elektrodenimpedanz abhängig von der Kontaktfläche des Instrumentes und der Leitfähigkeit der umgebenden Flüssigkeit ist, stellt sie keinen konstanten Wert dar. Aus diesem Grund kann im flüssigkeitsgefüllten Wurzelkanal die Gewebeimpedanz als Referenzwert zur Lokalisierung der apikalen Konstriktion aus der Gesamtimpedanz nicht ermittelt werden (Hör und Attin 2001). Folglich funktioniert die absolute Impedanzmessung nur im trockenen Wurzelkanal.

Das Prinzip der relativen Impedanzmessung

In klinischen Situationen kann ein komplett trockener Wurzelkanal kaum gewährleistet werden. Durch die relative Impedanzmessung werden zwei Messungen mit unterschiedlichen Frequenzen (fH) und (fL) entweder durch Differenzen- oder Quotientenbildung in Relation gesetzt. Während Flüssigkeiten im Kanal den absoluten Impedanzwert verändern, führt dies bei relativen Messungen nicht zu Ungenauigkeiten, da das Verhältnis der zu vergleichenden Impedanzen gleich bleibt (Nekoofar et al. 2006). Differenzmessungen werden bei 1 kHz und 5 kHz durchgeführt (Kobayashi 1995). Wird ein Impedanzquotient gebildet, werden die Frequenzen 0,4 kHz und 8 kHz verwendet (Kobayashi und Suda 1994). Durch die Isolation der Kanalwände ist die Querschnittsfläche, über die der Strom fließen kann, klein und die Fließrichtung vorgegeben. Durch die Verengung des Wurzelkanals nach apikal vergrößert sich die Impedanz beim Vorschub der Feile.

Da die Impedanz durch den kapazitiven Anteil frequenzabhängig ist, erhält man zwei unterschiedliche Impedanzen, $Z(fH)$ und $Z(fL)$.

Bei der Differenzenbildung wird die Differenz beider Gesamtimpedanzen $Z(fH)$ und $Z(fL)$ ermittelt.

$$Diff = Z(fH) - Z(fL)$$

(6)

Je näher die Instrumentenspitze der apikalen Konstriktion kommt, desto größer wird die Differenz. Beide Gesamtimpedanzen enthalten, wie oben erläutert, nicht frequenzabhängige ohmsche Widerstände, die sich rechnerisch aufheben. Da die Elektrodenimpedanz stärker von der Frequenz abhängig ist als die Gewebeimpedanz, kann erstere als Referenzwert für die Messung genutzt werden (Hör und Attin 2001).

Der Nachteil bei Messgeräten mit Differenzenbildung ist die nötige individuelle Kalibrierung des Messgerätes einige Millimeter vor dem Apex, um weiter koronal liegende Seitenkanäle innerhalb des Kanalsystems auszuschließen (Kobayashi 1995).

Eine weitere relative Messung kann mit Hilfe der Quotientenbildung vorgenommen werden, bei der keine individuelle Kalibrierung nötig ist.

$$Ratio = \frac{Z(fH)}{Z(fL)} \quad (7)$$

Wie bei der Differenzmessung heben sich die ohmschen Widerstände rechnerisch auf. Befindet sich die Instrumentenspitze im koronalen Anteil des Wurzelkanals, kann aufgrund der großen Distanz der Pole [siehe Gleichung (3)] der Einfluss der Kapazität C auf die Impedanz vernachlässigt werden. Daher liegt der Quotient annähernd bei 1. Erst bei Annäherung an den Apex wird der Einfluss der Kapazität bemerkbar. Nach der Formel (4) ist bei hohen Frequenzen der Wert der Impedanz $Z(fH)$ kleiner als bei niedrigen Frequenzen $Z(fL)$. Daher nimmt der Quotient bis zur apikalen Konstriktion immer kleinere Werte an (Kobayashi und Suda 1994). Bei Vorschub des Instrumentes über den Apex hinaus vergrößert sich die Querschnittsfläche der Elektrode und der Strom kann in alle Richtungen fließen. Somit sinkt schlagartig die Impedanz und das Messgerät zeigt die Überinstrumentierung an.

2.4.3.2 Entwicklung der Endometrie

Messung des Widerstandes

Bereits im Jahr 1942 führte Suzuki experimentelle Studien zur Längenmessung des Wurzelkanals an Hunden durch und registrierte konstante elektrische Widerstände zwischen einer Elektrode im Kanalinneren und einer zweiten Elektrode mit Kontakt zur Mundschleimhaut (Gordon und Chandler 2004). Sunada griff 1958 dieses Messprinzip auf und ermittelte mit Hilfe eines Gleichstromkreises einen Gewebewiderstand zwischen dem parodontalen Ligament und der Mundschleimhaut von 6,5 k Ω . Dieser Wert wurde als charakteristischer und reproduzierbarer Widerstand zwischen dem parodontalen Ligament und der Mundschleimhaut angenommen (Sunada 1962). Das Ziel der Messung war es, diesen Zahlenwert, der die Länge des Wurzelkanals definierte, zu erreichen. Eines der größten Probleme dieser

Messgeräte war die Abhängigkeit von den Bedingungen im Wurzelkanal. Bereits geringste Flüssigkeitsmengen führten zu verfälschten Widerständen und eine zu kurze Angabe der Wurzelkanallänge war die Folge. Ist aufgrund pathologischer Prozesse im periapikalen Bereich das Desmodont zerstört, führt die reine Messung des Widerstandes nicht zu genauen Ergebnissen. Auch die bei Gleichstrom auftretende Polarisierung der Elektroden und die damit einhergehende Konzentrationsveränderung der Ionen im leitenden Milieu führen zu Messungenauigkeiten (Hör und Attin 2001).

Messungen der absoluten Impedanz

Um die Polarisierung der Elektroden im Gleichstromkreis und die damit einhergehende Messungenauigkeit zu verhindern, wurde eine Wechselstromquelle angelegt. Folglich wird bei diesen Geräten nicht der Widerstand sondern die Impedanz gemessen. Wie bei der Widerstandsmessung wird auch hier mit Hilfe einer gemittelten fest eingestellten Vergleichsimpedanz gemessen (Hör und Attin 2001). Eines der ersten Geräte war das Root Canal Meter aus dem Jahr 1969 (Onuki Medicao, Tokyo, Japan), welches mit einer Frequenz von 150 Hz arbeitete. Da die Stromstärke bei diesem Messgerät relativ hoch lag, wurden häufig Schmerzen während der Messung verspürt. Die Weiterentwicklung, der Endodontic Meter S II, wurde von der gleichen Firma kurze Zeit später eingeführt und arbeitete mit einer Stromstärke von weniger als 5 μA (Kobayashi 1995, Hör und Attin 2001).

Das erste Gerät, welches im hochfrequenten Bereich bei 400 kHz arbeitete, war der von Hasegawa im Jahr 1979 entwickelte Endocater (Yamaura Seisokushu, Tokyo, Japan). Dieser zeichnete sich durch hohe Elektrodenstabilität aus. Zusätzlich wurde eine kunststoffummantelte Elektrode in den Kanal eingeführt, um sie vor Feuchtigkeit zu schützen und Messungenauigkeiten zu vermeiden. Die Ummantelung war jedoch nicht sterilisationsbeständig und verhinderte den Gebrauch in engen Kanälen (Fouad et al. 1990, Himel und Schott 1993).

Die Messgenauigkeit der absoluten Impedanzmessung wird in der Literatur mit sehr abweichenden Werten angegeben. Während McDonald und Hovland die Lokalisierung der apikalen Konstriktion ($\pm 0,5$ mm) mit Hilfe des Endocaters mit

einer Häufigkeit von 93,4% angeben (McDonald und Hovland 1990), nennen Keller et al. einen Wert von 67,7% (± 1 mm) (Keller et al. 1991).

Schon früher wurde der Grund für die Ungenauigkeiten in der gemittelten geräteintegrierten Vergleichsimpedanz vermutet, die als Referenzwert für den apikalen Endpunkt fungierte. Bereits 1971 entwickelte Inoue den Sono-Explorer (Hayashi Dental Supply, Tokyo, Japan), dessen Referenzwert vor der Messung in der parodontalen Tasche kalibriert werden musste (Gordon und Chandler 2004). Huang widerlegte 1987 die These Sunadas, dass von einem reproduzierbaren Referenzwert ausgegangen werden kann (Huang 1987).

Impedanzgradientenmessung

Ushiyama stellte 1983 eine neue Methode der Längenmessung vor. Diese beruht auf dem Prinzip der Impedanzgradientenmessung, wobei statt absoluten Impedanzen Spannungsdifferenzen gemessen werden. Mit Hilfe einer bipolaren Elektrode, deren Pole 0,11 - 0,26 mm voneinander entfernt liegen, wird durch einen Pol ein Wechselstrom mit einer Frequenz von 400 Hz eingeleitet; der zweite Pol registriert die Spannungsänderung im Vergleich zu ersterem (Ushiyama 1983). Das Messprinzip besteht darin, dass bei konstantem Stromfluss der Spannungsgradient mit kleiner werdendem Querschnitt zunimmt (Hör und Attin 2001). Auf die Wurzelkanalanatomie bezogen bedeutet dies, dass das Messsignal des Gerätes dann am größten ist, wenn die apikale Konstriktion, also die engste Stelle des Wurzelkanalsystems, zwischen beiden Elektroden liegt.

Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode ist die Größe der bipolaren Elektrode, die in engen Kanälen nicht verwendet werden kann. Des Weiteren signalisiert das Gerät nicht nur die apikale Konstriktion, sondern auch jede weitere Engstelle im Wurzelkanalsystem (Kobayashi 1995).

Relative Impedanzmessung

Wie in Kapitel 2.4.3.1 beschrieben, können entweder mit Hilfe der Differenzenbildung oder der Quotientenbildung zwei Messungen in Relation gesetzt werden. 1984 entwickelte Yamashita die Differenzenmessung. Hierbei werden mit Hilfe zweier Wechselstromsinuswellen mit der Frequenz von 1 kHz und 5 kHz zwei Impedanzen gemessen. Über die Differenz der Impedanzen kann die Lage der apikalen Konstriktion ermittelt werden (Kobayashi 1995, Pagavino et al. 1998). Das erste Gerät, das mit dieser Methode arbeitete, war das Apit (Osada Electronics, Tokyo, Japan); dieses wurde auf dem amerikanischen Markt unter dem Namen Endex vertrieben. Nach Saito und Yamashita wird die Längenmessung durch die Größe des Messinstruments oder unterschiedliche Konditionen und Spülflüssigkeiten im Wurzelkanal nicht beeinflusst (Saito und Yamashita 1990). Nachteilig war die notwendige Kalibrierung einige Millimeter vor der apikalen Konstriktion (Kobayashi 1995).

Mit der Weiterentwicklung der Methode der Quotientenbildung konnte die Kalibrierung unmittelbar vor der apikalen Konstriktion umgangen werden. Diese wurde von Kobayashi 1991 eingeführt (Kobayashi 1995). Da keine Kalibrierung vorgenommen werden musste, ermöglichte diese Methode die simultane Längenmessung und Präparation des Kanals mit rotierendem Instrumentarium (Steffen et al. 1999). Eines der ersten Messgeräte, die mit der Quotientenmethode mit Hilfe zweier unterschiedlicher Frequenzen (0,4 kHz und 8 kHz) arbeiteten, ist das Gerät Root ZX (J. Morita, Kyoto, Japan).

Weitere Geräte, wie der AFA Apex Finder 7005 (Analytic Endodontics, Sybron Dental, Orange, CA, USA) oder der Endo Analyzer Model 8005 (Analytic Endodontics, Sybron Dental, Orange, CA, USA), nutzen bis zu fünf unterschiedliche Frequenzen, anhand derer die Lokalisation der apikalen Konstriktion ermittelt wird. Welk et al. gaben in einer Vergleichsstudie von Root ZX und Endo Analyzer Model 8005 jedoch eine Messgenauigkeit von 90,7% für das Gerät Root ZX gegenüber 34,4% für den Endo Analyzer an (Welk et al. 2003). In einer Studie von Pommer et al. wird für das Gerät AFA Apex Finder 7005 eine höhere Messgenauigkeit in vitalen Zähnen angegeben (Pommer et al. 2002).

Bei der relativen Impedanzmessung sollen anatomische oder pathologische Strukturen wie ein weites apikales Foramen oder die Parodontitis apicalis keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit haben, da das parodontale Ligament nicht als Referenzwert fungiert (Fouad et al. 1993, Katz et al. 1996).

2.4.3.3 Genauigkeit der Messung

Bereits im Jahr 1995 gaben Czerw et al. für die Lokalisierung des Foramen apicale eine Messgenauigkeit von 100% mit einer Toleranz von 0,5 mm für das Gerät Root ZX an (Czerw et al. 1995). Die Genauigkeit für den gleichen Gerätetyp wurde von Ounsi und Naaman mit 84,72% für die Ermittlung der Lage des Foramen apicale ($\pm 0,5$ mm) und mit 50% für die Bestimmung der Lage der apikalen Konstriktion ($\pm 0,5$ mm) angegeben (Ounsi und Naaman 1999). Einen ähnlichen Wert für das Gerät Root ZX nennen Meares und Steiman mit 83% für die Lokalisierung des Foramen apicale (Meares und Steiman 2002). In einer *In-vivo*-Vergleichsstudie von Vieyra und Acosta wurde festgestellt, dass das Gerät Root ZX mit einer Erfolgsquote von 69,1% - 89% die Lage der apikalen Konstriktion ($\pm 0,5$ mm) ermittelt. Das Gerät Raypex 5 (VDW Antaeos, München, Deutschland) lokalisierte die apikale Konstriktion mit einer Genauigkeit von 43,9% - 81,8%. Bei beiden Geräten lag die Präzision bei der Messung von Frontzähnen höher (Vieyra und Acosta 2011).

Eine weitere *In-vivo*-Studie von Somma et al. nennt eine Messgenauigkeit von 20% für das Gerät Raypex 5 und 60% für das Gerät Dentaport ZX (J. Morita, Kyoto, Japan) (Somma et al. 2012). Letzteres ist von demselben Hersteller wie das Root ZX und arbeitet in der gleichen Art und Weise. Ebenfalls für die Geräte Dentaport ZX und Raypex 5 geben Pascon et al. in einer *In-vitro*-Studie für eine Lokalisierung der apikalen Konstriktion ($\pm 0,5$ mm) Messgenauigkeiten von 39% und 31% an (Pascon et al. 2009).

Stoll et al. untersuchten den Einfluss der Instrumentengrößen ISO 10 und ISO 15 auf die Messgenauigkeit. In einer *In-vitro*-Studie zur Lokalisierung des Foramen apicale mit einer Toleranz von $\pm 0,38$ mm ergaben die Messwerte mit Instrumenten der Größe ISO 10 für die Geräte Dentaport ZX und Raypex 5 Genauigkeiten von 86,8% und 75%, während die Präzision für die Messung mit Instrumenten der Größe 15 bei 90,4% und 82,1% lag (Stoll et al. 2010).

In einer ähnlichen Studie mit größerer Fallzahl von Briseño-Marroquín et al. werden für die Bestimmung der apikalen Konstriktion mit Hilfe von Instrumenten der Größe ISO 10 und ISO 15 für das Gerät Raypex 5 Messgenauigkeiten von 39,31% und 39,06% genannt. In der gleichen Studie geben Briseño-Marroquín et al. für das Gerät ProPex II einen Wert von 43,45% mit Instrumenten der Größe ISO 10 und 40,63% mit Instrumenten der Größe ISO 15 an (Briseño-Marroquín et al. 2008).

Es wurde in der Literatur viel über den Einfluss von Spülflüssigkeiten oder apikalen pathologischen Prozessen diskutiert. Nach Carvalho et al. beeinflussen verschiedene Spülflüssigkeiten nicht die Messgenauigkeit (Carvalho et al. 2010). Angwaravong und Panitvisai geben für die Längenmessung an Milchzähnen mit apikalen Resorptionen eine Genauigkeit von 96,7% an (Angwaravong und Panitvisai 2009). Im Gegensatz dazu nennen Bodur et al. für die Längenmessung von Milchzähnen mit apikalen Resorptionen eine erheblich geringere Präzision von 25,8% (Bodur et al. 2008).

Goldberg et al. untersuchten die Lokalisierung einer Wurzelquerfraktur und gaben für die Geräte Root ZX, ProPex (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) und Novapex (Forum Technologies, Rishon Le-Zion, Israel) Messgenauigkeiten von 60%, 80% und 70% an (Goldberg et al. 2008).

Saatchi et al. untersuchten in einer *In-vivo*-Studie den Einfluss der Parodontitis apicalis auf die Messgenauigkeit und geben eine genaue Lokalisierung der apikalen Konstriktion ($\pm 0,5$ mm) für das Gerät Root ZX von 93,8% bei vorliegender Parodontitis apicalis und von 93,3% bei nicht bestehender Erkrankung an; für das Gerät Raypex 5 werden Werte von 81,3% und 86,7% genannt (Saatchi et al. 2014).

In nachfolgender Tabelle wird eine Übersicht über *In-vivo*-Untersuchungen der letzten Jahre gegeben (Tabelle 2-1).

Jahr	Autor	Fallzahl	Messgerät	Ergebnisse	Messpunkt	Toleranzbereich
2011	Vieyra und Acosta	693 Kanäle	Root ZX	69,01%- 89,09%	Apikale Konstriktion	0 mm
			Raypex 5	43,93%-81,81%		
2012	Somma et al.	30 Kanäle	Dentaport ZX	60%	Apikales Foramen	0 mm
			ProPex II	40%		
			Raypex 5	20%		
2012	Duran-Sindreu et al.	23 Kanäle	Root ZX	78,3%	Apikale Konstriktion	±0,5 mm
2009	Chevalier et al.	209 Kanäle	ApexPointer	86,6%	Radiologischer Apex	0-2 mm
			Novapex	82,8%		
2014	Saatchi et al.	32 Kanäle	Root ZX	93,3%-93,8%	Apikale Konstriktion	±0,5 mm
			Raypex 5	81,3%-86,7%		
2003	Welk et al.	32 Kanäle	Root ZX	90,7%	Apikale Konstriktion	±0,5 mm
1999	Steffen und Löw	211 Kanäle	Root ZX	21,2%	Apikale Konstriktion	±0,5 mm

Tabelle 2-1: Messgenauigkeit von Apexlokalisatoren. *In-vivo*-Studien der letzten Jahre (Steffen und Löw 1999, Welk et al. 2003, Chevalier et al. 2009, Vieyra und Acosta 2011, Duran-Sindreu et al. 2012, Somma et al. 2012, Saatchi et al. 2014).

3. Ziel der Arbeit

Endometrische Messgeräte wurden bereits Mitte des 20. Jahrhunderts in der Praxis verwendet und unterliegen seitdem ständiger Forschung und Weiterentwicklung. Der Großteil der Studien vergleicht unterschiedliche Geräte und deren Messgenauigkeit (Steffen und Löw 1999, Welk et al. 2003, Chevalier et al. 2009, Vieyra und Acosta 2011, Duran-Sindreu et al. 2012, Somma et al. 2012, Saatchi et al. 2014). In der Literatur wird auch die Genauigkeit der endometrischen Messung mit der der röntgenologischen Messung verglichen. Vorteile der endometrischen Messung liegen hierbei in der Vermeidung der Strahlenexposition und der Verringerung von Ungenauigkeiten bei der Lagebestimmung der apikalen Konstriktion, die durch die Zweidimensionalität des Röntgenbildes bedingt ist (Katz et al. 1991).

Wenngleich in der Literatur viele Studien zur endometrischen Messung vorliegen, geben diese keine Aussage darüber, ob Messungen identischer Geräte desselben Herstellers übereinstimmen.

Die vorliegende Studie soll zeigen, inwieweit identische Messgeräte desselben Typs und Herstellers unter unterschiedlichen Bedingungen übereinstimmende oder divergierende Messwerte liefern. Abhängig von unterschiedlichen Parametern wie der inserierten Instrumentenlänge, der Wurzelperforation, dem nicht abgeschlossenen Wurzelwachstum, unterschiedlichen ISO-Größen oder Spülflüssigkeiten sollen die Messwerte der einzelnen Geräte miteinander verglichen und auf die Übereinstimmung untereinander überprüft werden. Dabei geht es nicht um die Genauigkeit der Messung, sondern um den Vergleich der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse identischer Geräte untereinander.

4. Material und Methoden

Die Studie wurde von der Ethikkommission der UMG unter der Antragsnummer 7/7/14 genehmigt.

4.1 Auswahl der Messgeräte

In der vorliegenden Studie wurden jeweils vier Geräte des identischen Typs von fünf Herstellern geprüft. Folgende Geräte wurden einbezogen:

Apex ID (SybronEndo, Glendora, Kalifornien, USA)

Raypex 6 (VDW Antaeos, München, Deutschland)

Dentaport ZX (J. MORITA, Kyoto, Japan)

Root ZX (J. MORITA, Kyoto, Japan)

ProPex II (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz)

4.1.1 Apex ID

Das Gerät Apex ID (Abbildung 4-1) wurde von der Firma SybronEndo im Februar 2013 in den Markt eingeführt.



Abbildung 4-1: Display des Endometriegerätes Apex ID.

Es gibt die Messlänge sowohl numerisch von 30 bis - 05 als auch graphisch mit blauen, grünen und roten Balken an. Der Wert 00 sowie der erste rote Balken geben den anatomischen Apex an. Minuswerte signalisieren die Überinstrumentierung. Zusätzlich ertönen je nach Lage der Feilenspitze Tonsignale zur auditiven Kontrolle. Als Messelektrode sollte ein dünnes Handinstrument gewählt werden. Ein Lippenhaken dient als Gegenelektrode. Je näher die Feilenspitze dem Apex kommt, desto kleiner werden die Intervalle der Signaltöne. Die vom Hersteller eingestellte Arbeitslänge liegt bei 05, da diese die Nähe zur apikalen Konstriktion darstellt. Diese Messlänge kann mit den Buttons „up“ und „down“ variiert werden.

Der Hersteller empfiehlt zur genauen Messung eine leichte Überinstrumentierung und anschließend das Zurückziehen des Instrumentes auf die gewünschte Länge. Ebenfalls können zu trockene Konditionen im Wurzelkanal sowie nekrotisches Gewebe zu Ungenauigkeiten führen. Daher wird mehrmaliges Messen zur Kontrolle empfohlen. Das Gerät misst mit Hilfe zweier Frequenzen bei 0,5 und 5 kHz.

Die Stromzufuhr erfolgt über Batterien der Größe „AAA“. Der Ladezustand wird oben rechts im Display angezeigt.

4.1.2 Raypex 6

Das Endometriegerät Raypex 6 der Firma VDW Antaeos (Abbildung 4-2) besitzt einen aufklappbaren Touch-Screen.



Abbildung 4-2: Display des Endometriegerätes Raypex 6.

Angeschlossen wird das Gerät über ein Stahlinstrument und einen Lippenhaken, der den Kontakt zur Schleimhaut gewährleistet. Die Lage der Instrumentenspitze wird graphisch in unterschiedlich farbigen Balken dargestellt und durch Audiosignale unterstützt. Je näher die Instrumentenspitze dem Apex kommt, desto kürzer werden die Intervalle des Tonsignals. Vor der Messung wird der Messschaltkreis überprüft und bei korrekter Verbindung als grünes Symbol angezeigt. Während der Messung zeigt der Bildschirm folgende Symbole an:

- ein vollständiges Kanalbild, welches die Instrumentenbewegung im Kanal darstellt,
- den apikalen Zoom für die genaue Messung im apikalen Kanalteil. Der apikale Abschnitt gliedert sich in einen blauen, grünen und gelben Teil.
- ein Symbol für die Lautstärke des Tonsignals.

Das koronale und mittlere Kanaldrittel werden im vollständigen Kanalbild dargestellt, der apikale Abschnitt ist in vergrößerter Form sichtbar. Die Position

der Feilenspitze wird als Indikationslinie angezeigt. Erreicht die Feilenspitze den anatomischen Apex, wird die Indikationslinie rot und zusätzlich ist ein konstanter Ton wahrnehmbar. Bei Überinstrumentierung erscheint zeitgleich mit Warntönen ein roter Warnpunkt im apikalen Zoom.

Die Lautstärke der Audiosignale kann über das entsprechende Symbol eingestellt werden.

Über das Symbol „Einstellungen“ und den Unterpunkt „Dr`s Choice“ kann die gewünschte Endposition der Feile gewählt werden. Die apikale Linie kann zwischen dem ersten grünen und dem letzten gelben Balken festgelegt werden. Bei Überschreitung dieser Linie wird dies durch ein Tonsignal angezeigt.

Das Raypex 6 misst mit Hilfe von mehr als zwei Frequenzen und ist daher ein Beispielgerät für die Multifrequenzmessung.

Die Stromversorgung erfolgt über wieder aufladbare Batterien, deren Ladezustand über ein Symbol im Display angezeigt wird. Das dazugehörige Ladegerät wird mitgeliefert. Während des Ladevorgangs kann keine Messung durchgeführt werden.

4.1.3 Root ZX

Das Gerät Root ZX der Firma Morita (Abbildung 4-3) arbeitet mit dem Impedanzquotientenmessverfahren und benötigt laut Herstellerangaben vor der Verwendung keine Kalibrierung am Patienten und kann unabhängig von den Konditionen im Wurzelkanal, ob trocken oder mit Elektrolyten wie Blut/Kochsalzlösung oder ähnlichen Lösungen gefüllt, verwendet werden. Das Root ZX wird durch „AA“ Batterien betrieben, deren Ladezustand oben rechts im Display angegeben wird. Das Root ZX arbeitet mit Hilfe von zwei Frequenzen bei 0,4 und 8 kHz.



Abbildung 4-3: Display des Endometriegerätes Root ZX.

Als Messelektrode wird ein Handinstrument verwendet, das mit Hilfe des Feilenhalters mit dem Gerät verbunden ist. Die Gegenelektrode wird über einen Lippenhaken in den Mundwinkel des Patienten eingehängt und gewährleistet so den Schleimhautkontakt.

Die Lage der Instrumentenspitze wird auf der Messanzeige in Form von Balken angezeigt. Je näher die Feilenspitze dem Apex kommt, desto mehr Balken erscheinen auf der Anzeige. Sobald das Niveau 2 erreicht ist, wird ein Audiosignal hörbar, dessen Intervalle mit zunehmender Näherung an die Wurzelspitze kürzer werden. Bei Erreichen eines bestimmten Impedanzquotienten beginnt der Hinweis „Apex“ mit dem Messwert 0 zu blinken. In diesem Fall hat die Feilenspitze den anatomischen Apex erreicht und das Audiosignal ist als durchgehender Ton wahrnehmbar.

Der Wert 0,5 gibt an, dass die Instrumentenspitze sich in der Nähe des Foramens befindet. Da sich in Apexnähe die Empfindlichkeit des Gerätes erhöht, ist es wichtig zu beachten, dass die Messwerte keine Millimeteranzeige darstellen. Laut Herstellerangaben beträgt die Differenz zwischen den Messwerten 0,5 und 1,0 etwa 0,2 bis 0,5 mm.

Mit einer Schraube am Boden des Gerätes kann sowohl das Tonsignal verändert als auch die gewünschte Endposition der Feilenspitze von der Werkseinstellung 0,5 auf 1,0 verkürzt oder auf „Apex“ verlängert werden.

4.1.4 Dentaport ZX

Die Handhabung des Dentaport ZX (Abbildung 4-4) der Firma Morita funktioniert in der gleichen Art und Weise wie die des vom selben Hersteller gelieferten Gerätes Root ZX.



Abbildung 4-4: Display des Endometriegerätes Dentaport ZX.

Unterschiedlich zum Root ZX ist die mögliche Erweiterung des Messgeräts um einen Mikromotor (Tri-Auto-ZX-Modul), der die gleichzeitige elektrische Messung und rotierende Präparation des Kanals zulässt. Bei alleiniger Verwendung des Messgeräts dient ein Handinstrument als Messelektrode. Die Gegenelektrode ist ein Lippenhaken. Wie auch beim Root ZX wird das Niveau 0,5 als Endpunkt empfohlen; die Markierung ist aber ebenfalls verstellbar. Unter drei verschiedenen Modi (M1, M2, M3) können bestimmte Einstellungen zur gewünschten Messlänge und die Lautstärke des Audiosignals gespeichert werden.

4.1.5 ProPex II

Das ProPex II (Abbildung 4-5) der Firma Dentsply Maillefer misst mit Hilfe mehrerer Frequenzen. Es gibt die Messwerte numerisch und mit Hilfe einer graphischen Skala aus blauen, orangefarbenen und roten Balken an.

Zahlenwerte in einem Bereich zwischen 2,0 und 0,0 sind möglich, wobei 0,0 den anatomischen Apex darstellt.

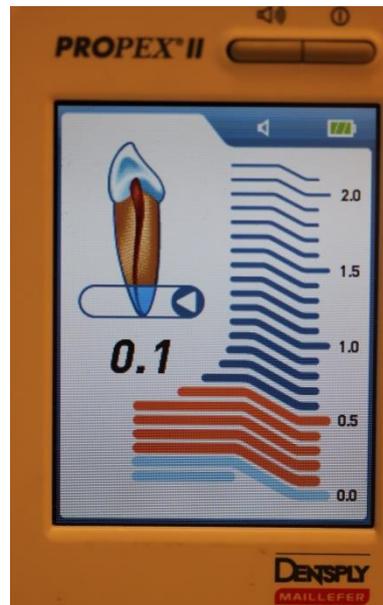


Abbildung 4-5: Display des Endometriegerätes ProPex II.

Als Messelektrode wird ein Handinstrument angeschlossen, die Gegenelektrode wird in Form eines Schleimhauthakens in den Mundwinkel des Patienten eingehängt. Um die Verbindung überprüfen zu können, wird bei geschlossenem Stromkreis unten links im Display ein Symbol zweier sich zuwendender Pfeile angezeigt. Zur Orientierung wird die Messung zusätzlich anhand eines dargestellten Zahnes verdeutlicht. Ein Cursor am Zahnsymbol zeigt die Position der Instrumentenspitze an. Zur akustischen Messkontrolle ist ein Tonsignal wahrnehmbar, dessen Intervalle mit zunehmender Messtiefe kürzer werden. Ab dem Niveau 0,5 erscheinen die Balken orange, bei Überinstrumentierung rot. Bei Erreichen des Wertes 0,0 zeigt der Cursor am Zahnsymbol „Apex“ an, gleichzeitig ist ein Dauerton zu hören. Bei Überinstrumentierung erscheint das Wort „Over“, zeitgleich mit einem akustischen Warnsignal. Das Tonsignal ist durch die Lautstärke-Taste einstellbar.

Das ProPex II wird mit einem Akku geliefert und kann bei Nichtgebrauch mit dem beigegeführten Ladegerät aufgeladen werden.

4.2 Auswahl der Zähne

Für den Versuchsaufbau wurden acht extrahierte Zähne verwendet, die unterschiedliche Messsituationen darstellten. Bei sieben Zähnen handelte es sich um einwurzelige Inzisivi oder Prämolaren, der achte Zahn war ein Unterkiefermolar. Alle Zähne wurden erst nach unterschriebener Einwilligung seitens der Patienten in die Verwendung zu wissenschaftlichen Zwecken anonymisiert für die Studie verwendet.

4.3 Versuchsaufbau

Die Messungen wurden an acht extrahierten Zähnen durchgeführt. Nach Präparation einer okklusalen Zugangskavität wurden Wurzelkanalinstrumente der Größen ISO 10 und ISO 25 eingebracht und in unterschiedlichen Positionen mit Komposit fixiert:

Zahn 1: Instrumentenspitze schließt mit dem anatomischen Apex ab

Zahn 2: Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 0,5 mm

Zahn 3: Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 1,5 mm

Zahn 4: Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 3,0 mm

Zahn 5: Instrumentenspitze auf Wurzellänge + 1 mm

Zahn 6: Perforation auf Höhe der Wurzelmitte, Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 0,5 mm

Zahn 7: Nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, Instrumentenlänge bis zum Foramen

Zahn 8: Mehrwurzeliger Zahn mit 3 Kanälen, Instrumentenspitze im mesiobukkalen Wurzelkanal auf Wurzellänge – 0,5 mm fixiert

Der Zahn 8 war ein UK-Molar; bei den Zähnen 1-7 handelte es sich um einwurzelige Inzisivi oder Prämolaren, die einen geraden Wurzelverlauf aufwiesen. Um die Reproduktion des Referenzpunktes zu gewährleisten, wurde in die Zahnkrone mit Diamantschleifern ein Plateau präpariert. Die tatsächliche Länge der Zähne wurde unter 5-facher Vergrößerung mit Hilfe eines Dental-

Mikroskopes (Zeiss, Oberkochen) bestimmt. Sobald die Instrumentenspitze am Apex sichtbar wurde, wurde die Länge durch das Einstellen des Stoppers am koronalen Plateau festgelegt (Abbildung 4-6).



Abbildung 4-6: Festlegung der Länge des Wurzelkanals unter dem Dental-Mikroskop.

Um das Verrutschen des Stoppers zu verhindern, wurde dieser an jedem Messinstrument mit Sekundenkleber befestigt.

Jeder Zahn wurde in den Deckel eines Kunststoffreagenzglases eingegliedert und mit Sekundenkleber befestigt. Um den Stromfluss zu gewährleisten, wurde am unteren Ende der Reagenzgläser, ein stromleitender Nagel durchgestoßen, sodass dieser direkten Kontakt zur Elektrolytflüssigkeit im Reagenzglas hatte. An diesem Nagel konnte mit Hilfe einer Metallklammer der Lippenhalter befestigt werden. Alle acht Reagenzgläser wurden in einem Haltemodell fixiert. Als leitendes Medium diente 0,9%ige Kochsalzlösung (NaCl). Die Zahnwurzel war zum Zeitpunkt der Messung immer vollständig von NaCl umgeben (Abbildung 4-7).

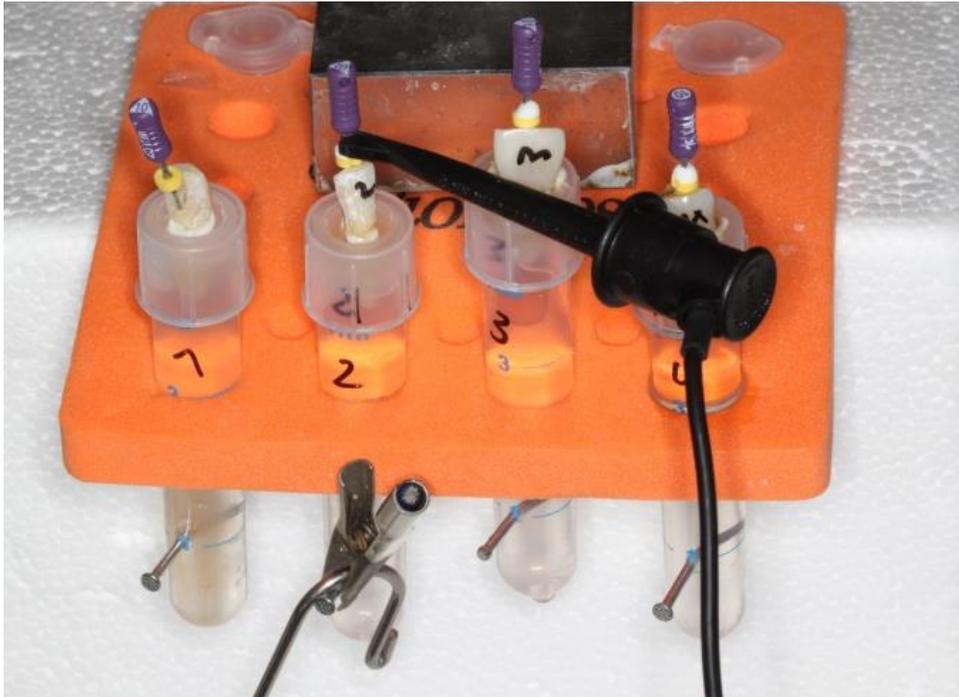


Abbildung 4-7: Versuchsaufbau zur vergleichenden Messung der Endometriegeräte.

Es wurden jeweils 4 Geräte eines der fünf Gerätetypen untersucht. Jedes Gerät wurde nacheinander an die acht Zähne angeschlossen. Die Voraussetzung für die Registrierung der jeweiligen Messwerte war eine stabile Anzeige des Wertes über mindestens 10 Sekunden. Um den Einfluss verschiedener Instrumentengrößen (ISO 10 und ISO 25) und unterschiedlicher Spülflüssigkeiten [Natriumhypochlorit 3% (NaOCl), Ethylendiamintetraessigsäure 17% (EDTA), Chlorhexidin (CHX)] einzubeziehen, wurde folgendes Messprotokoll für jedes Gerät durchgeführt. Insgesamt umfasst das Protokoll 40 Messungen pro Gerät (Tabelle 4-1):

Gerät X	ISO	Zahn 1	Zahn 2	Zahn 3	Zahn 4	Zahn 5	Zahn 6	Zahn 7	Zahn 8
NaOCl	10								
	25								
Trocken nach NaOCl	10								
EDTA	10								
CHX	10								

Tabelle 4-1: Für jedes Endometriegerät verwendetes Messprotokoll.

Bei der Messung am Unterkiefermolaren (Zahn 8) wurden unter feuchten Konditionen alle drei Kanäle und das Pulpakavum mit der jeweiligen Flüssigkeit befeuchtet. Für die Messung unter trockenen Konditionen wurden zuvor sowohl der zu messende Kanal als auch die beiden anderen mit Papierspitzen getrocknet.

4.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe der Software STATISTICA 12.5. Die Anzahl unterschiedlicher Messungen innerhalb der vier Geräte eines Herstellers wurde vermerkt, wobei

0 = keine Unterschiede, alle vier Geräte zeigen dasselbe Ergebnis

1 = ein abweichender, drei identische Messwerte

2 = jeweils zwei Geräte zeigen identische Messwerte

3 = drei unterschiedliche Messwerte, ein Messwert wiederholt sich

4 = vier unterschiedliche Messwerte.

Die prozentuale Verteilung der Ergebnisse wurde tabellarisch dargestellt und übliche statistische Werte wie der Mittelwert und die Standardabweichung wurden errechnet, um statistisch signifikante Unterschiede zu ermitteln. Diese wurden mit Hilfe des Kruskal-Wallis-Tests erhoben. Das Signifikanzniveau wurde für $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Schließlich wurde untersucht, inwiefern unterschiedliche Parameter die Übereinstimmung der Messungen beeinflussen.

5. Ergebnisse

Beim Vergleich der Gerätetypen unabhängig von der Messstation und der Kondition im Wurzelkanal zeigen die Geräte Apex ID und Raypex 6 die größte Übereinstimmung, das heißt, sie weisen die geringste Anzahl von Unterschieden auf. Beide Gerätetypen zeigen eine statistisch signifikant höhere „interne“ Übereinstimmung als Dentaport ZX und Root ZX. Der Gerätetyp ProPex II zeigt nur einen statistisch signifikanten Unterschied zum Gerätetyp Root ZX (Abbildung 5-1).

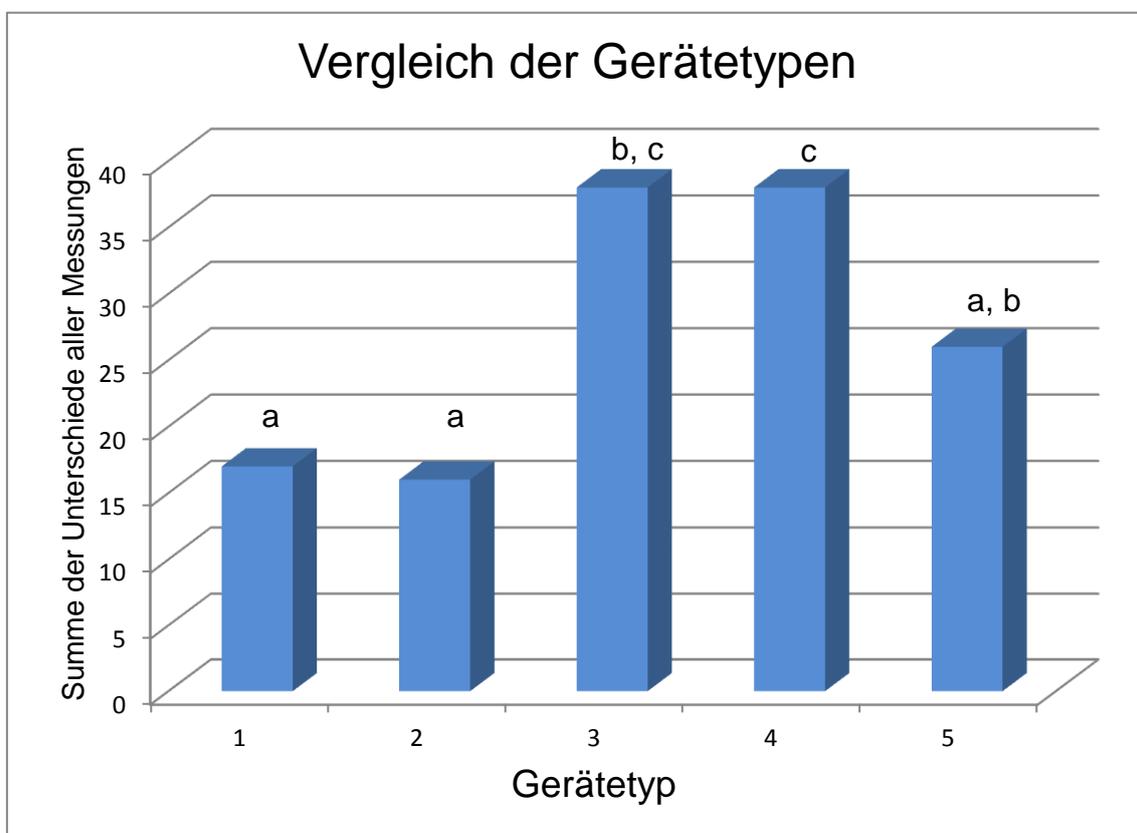


Abbildung 5-1: Vergleich der unterschiedlichen fünf Gerätetypen. Die Balken stellen die Summe der Unterschiede 0 - 4 dar. Gleiche Buchstaben bedeuten das Fehlen eines signifikanten Unterschieds. Bei 5 Messungen an 8 Stationen (= 40 Stationen pro Gerätetyp) mit max. 4 unterschiedlichen Ergebnissen beträgt der Minimalwert 0, der Maximalwert 160.

- 1 = Apex ID,
- 2 = Raypex 6,
- 3 = Dentaport ZX,
- 4 = Root ZX,
- 5 = ProPex II

Die Tabelle 5-1 zeigt die prozentuale Verteilung der Ergebnisse innerhalb eines jeden Gerätetyps unabhängig von der Kondition im Wurzelkanal oder der Messstation. Jede Messreihe hat den Umfang von 40 Messungen pro Gerät. Die absoluten Zahlenwerte geben dabei an, wie häufig die jeweilige Anzahl der Unterschiede registriert wurde (Tabelle 5-1).

Anzahl der Unterschiede	Gerätetyp					Gesamt
	Apex ID	Raypex 6	Dentaport ZX	Root ZX	ProPex II	
0	28	29	20	14	27	118
	70,00%	72,50%	50,00%	35,00%	67,50%	
1	9	8	8	18	6	49
	22,50%	20,00%	20,00%	45,00%	15,00%	
2	1	1	6	4	4	16
	2,50%	2,50%	15,00%	10,00%	10,00%	
3	2	2	6	4	0	14
	5,00%	5,00%	15,00%	10,00%	0,00%	
4	0	0	0	0	3	3
	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	7,50%	
Messungen pro Messgerät	40	40	40	40	40	200

Tabelle 5-1: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse bei Betrachtung der einzelnen Gerätetypen.

Bei Betrachtung der Messergebnisse abhängig von der jeweiligen Messstation findet sich die größte Übereinstimmung bei der Überinstrumentierung (Zahn 5), mit statistisch signifikantem Unterschied zu den Stationen 1, 2, 3, 6 und 8, und nicht statistisch signifikantem Unterschied zu den Stationen 4 und 7 (Abbildung 5-2).

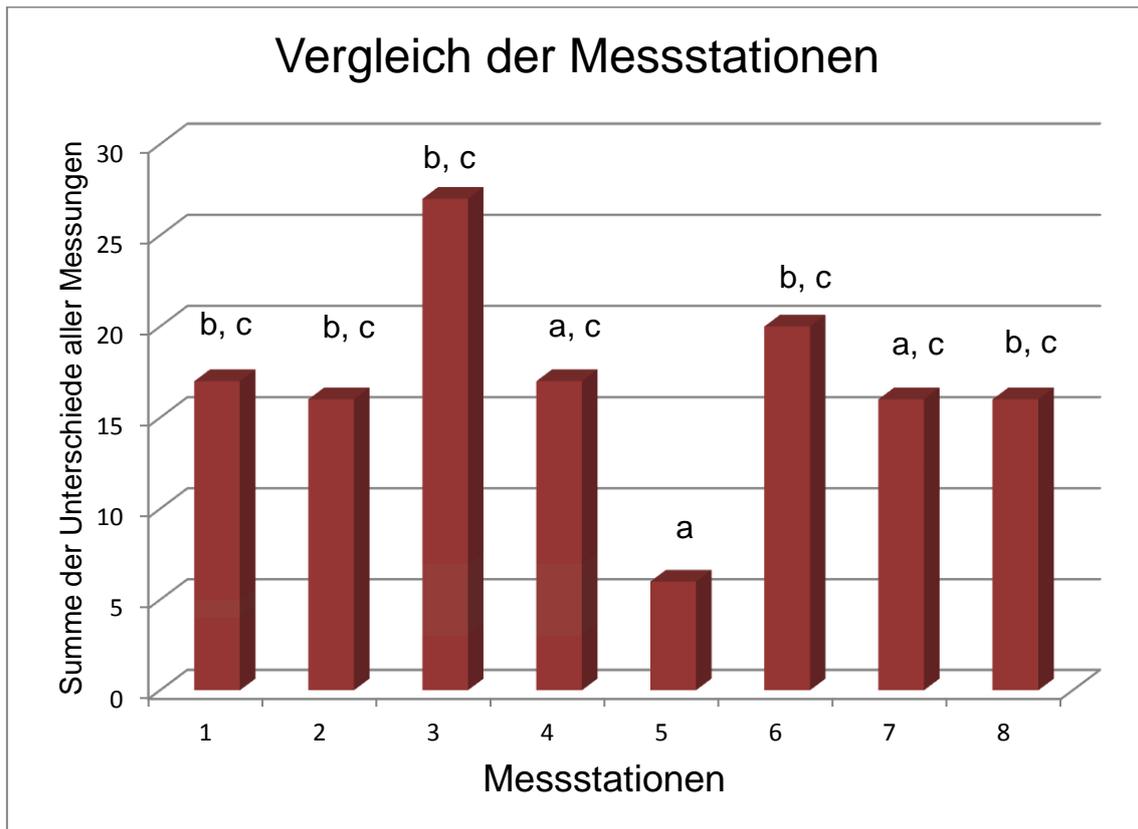


Abbildung 5-2: Vergleich der unterschiedlichen Messstationen. Die Balken stellen die Summe der Unterschiede 0 - 4 dar. Gleiche Buchstaben bedeuten das Fehlen eines signifikanten Unterschieds. Bei 5 Messungen pro Gerätetyp (25 Messungen) mit max. 4 unterschiedlichen Ergebnissen beträgt der Minimalwert 0, der Maximalwert 100.

- 1 = Instrumentenspitze schließt mit dem anatomischen Apex ab,
- 2 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 0,5 mm,
- 3 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 1,5 mm,
- 4 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 3 mm,
- 5 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge + 1 mm,
- 6 = Perforation auf Höhe der Wurzelmitte, Instrumentenspitze auf Wurzellänge - 0,5 mm,
- 7 = Nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, Instrumentenspitze bis zum Foramen,
- 8 = Mehrwurzeliger Zahn mit 3 Kanälen, Instrumentenspitze im mesiobukkalen Wurzelkanal auf Wurzellänge – 0,5 mm fixiert.

Die Tabelle 5-2 zeigt die prozentuale Verteilung der Anzahl der Unterschiede für die jeweilige Messstation. An jeder Messstation wurden insgesamt 25 Messungen durchgeführt (Tabelle 5-2).

Anzahl der Unterschiede	Messstation								Gesamt
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0	14	14	10	16	21	15	15	13	118
	56%	56%	40%	64%	84%	60%	60%	52%	
1	7	7	8	4	3	5	6	9	49
	28%	28%	32%	16%	12%	20%	24%	36%	
2	2	3	3	3	0	1	2	2	16
	8%	12%	12%	12%	0%	4%	8%	8%	
3	2	0	3	1	1	3	2	1	14
	8%	4%	12%	4%	4%	12%	8%	4%	
4	0	0	1	1	0	1	0	0	3
	0%	0%	4%	4%	0%	4%	0%	0%	
Messungen pro Messstation	25	25	25	25	25	25	25	25	200

Tabelle 5-2: Prozentuale Verteilung der Ergebnisse innerhalb einer Messstation.

Vergleicht man die Bedingungen im Wurzelkanal, unabhängig von der Messstation oder dem Gerätetyp, wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt (Abbildung 5-3).

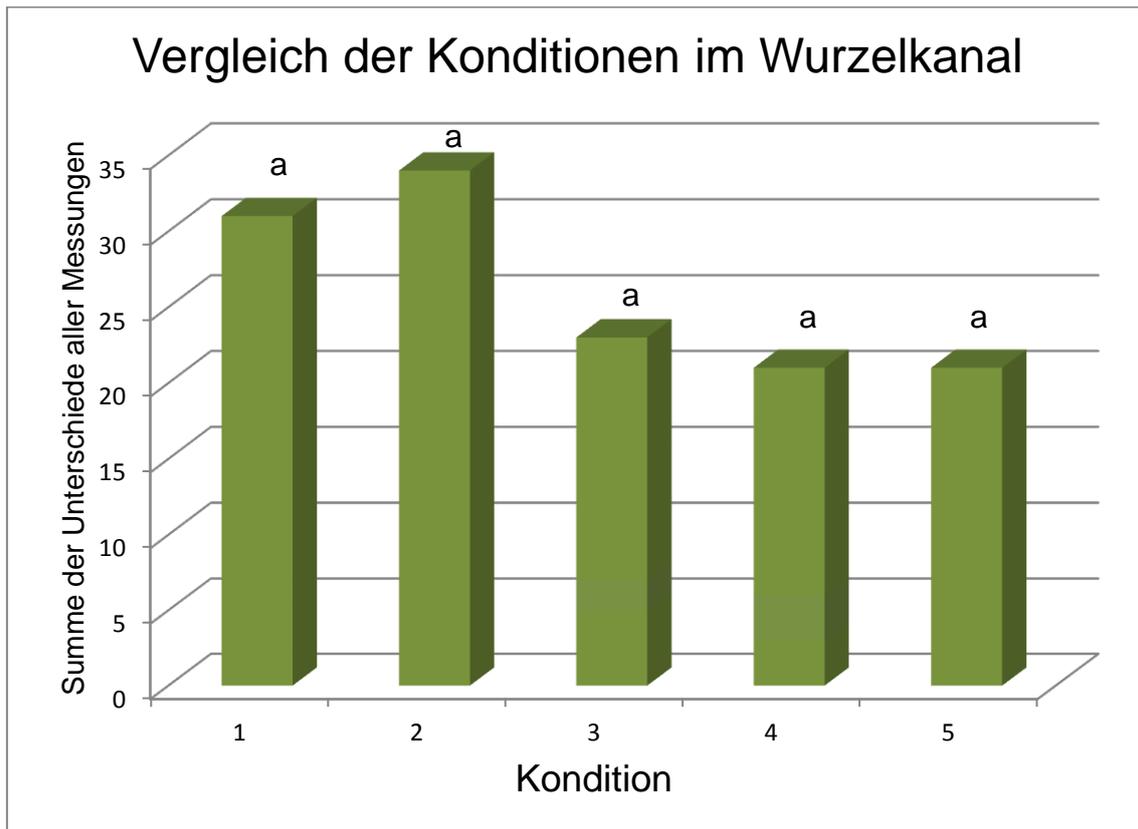


Abbildung 5-3: Vergleich der unterschiedlichen Konditionen. Die Balken stellen die Summe der Unterschiede 0 - 4 dar. Gleiche Buchstaben bedeuten das Fehlen eines signifikanten Unterschieds. Bei 8 Stationen und 5 Gerätetypen wurden pro Kondition 40 Messungen durchgeführt. Durch max. 4 unterschiedliche Ergebnissen beträgt der Minimalwert 0, der Maximalwert 160.

- 1 = NaOCl, Instrument ISO 10
- 2 = NaOCl, Instrument ISO 25
- 3 = getrocknet nach NaOCl
- 4 = EDTA
- 5 = CHX

Bei Betrachtung der Einflussgrößen auf die einzelnen Geräte zeigen die Ergebnisse, dass die Geräte Raypex 6 und Dentaport ZX weder von der Messstation noch von der Kondition im Wurzelkanal (Spülflüssigkeit und ISO-Größe der Handinstrumente) in ihrer Übereinstimmung beeinflusst werden. Bei beiden Gerätetypen wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede ermittelt (Abbildung 5-4, Abbildung 5-5, Abbildung 5-6, Abbildung 5-7).

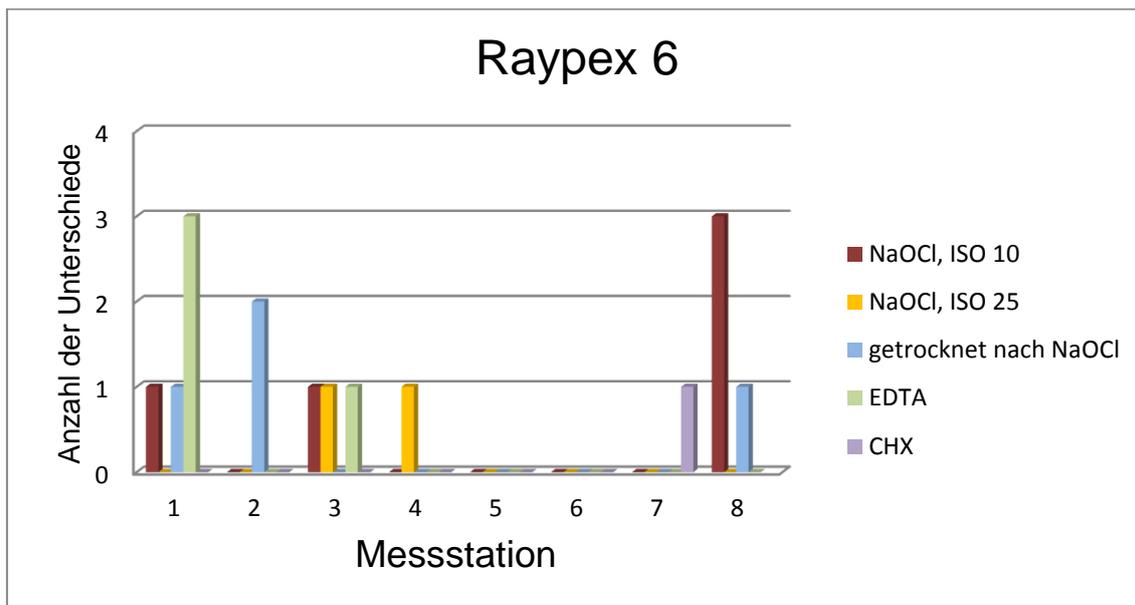


Abbildung 5-4: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps Raypex 6.

- 1 = Instrumentenspitze schließt mit dem anatomischen Apex ab,
- 2 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 0,5 mm,
- 3 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 1,5 mm,
- 4 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 3 mm,
- 5 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge + 1 mm,
- 6 = Perforation auf Höhe der Wurzelmitte, Instrumentenspitze auf Wurzellänge - 0,5 mm,
- 7 = Nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, Instrumentenlänge bis zum Foramen,
- 8 = Mehrwurzeliger Zahn mit 3 Kanälen, Instrumentenspitze im mesiobukkalen Wurzelkanal auf Wurzellänge – 0,5 mm fixiert.

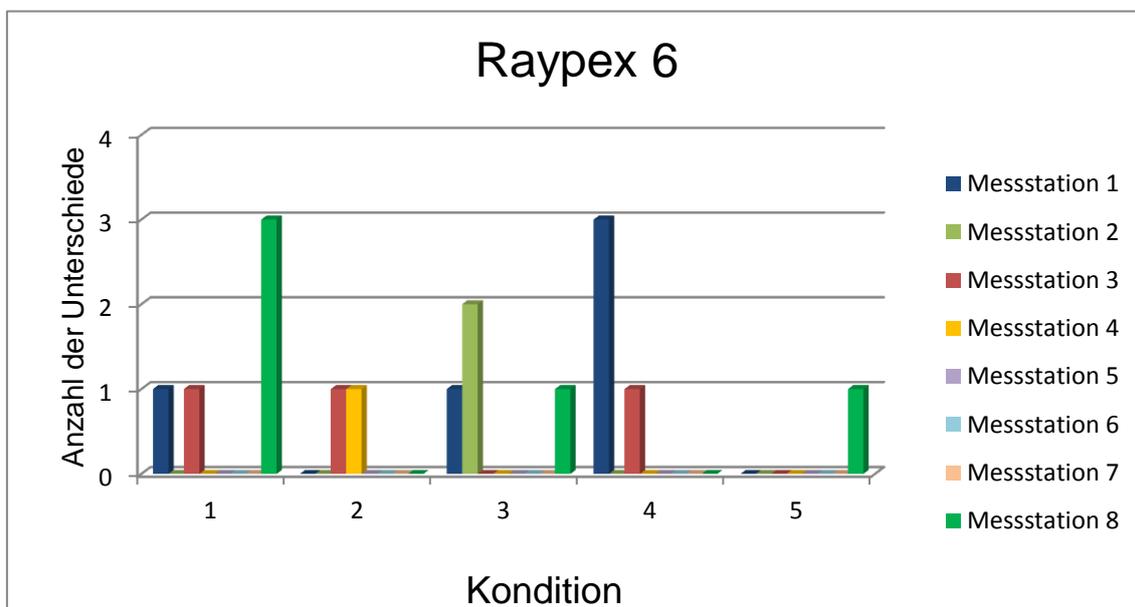


Abbildung 5-5: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps Raypex 6.

- 1 = NaOCl, Instrument ISO 10
- 2 = NaOCl, Instrument ISO 25
- 3 = getrocknet nach NaOCl
- 4 = EDTA
- 5 = CHX

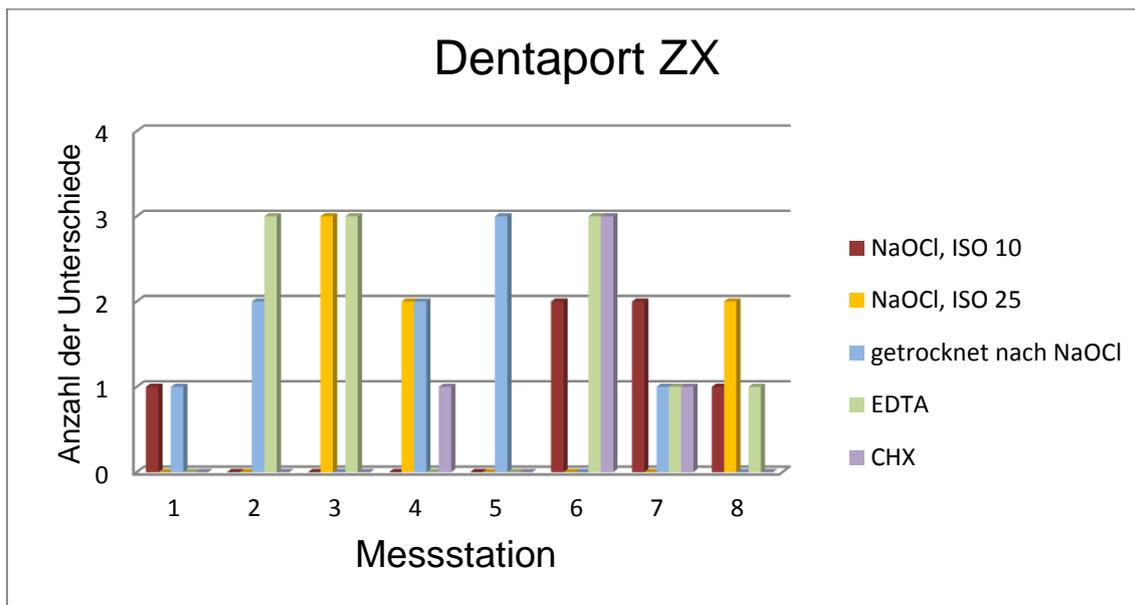


Abbildung 5-6: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps Dentaport ZX.

- 1 = Instrumentenspitze schließt mit dem anatomischen Apex ab,
- 2 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 0,5 mm,
- 3 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 1,5 mm,
- 4 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 3 mm,
- 5 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge + 1 mm,
- 6 = Perforation auf Höhe der Wurzelmitte, Instrumentenspitze auf Wurzellänge - 0,5 mm,
- 7 = Nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, Instrumentenspitze bis zum Foramen,
- 8 = Mehrwurzeliger Zahn mit 3 Kanälen, Instrumentenspitze im mesiobukkalen Wurzelkanal auf Wurzellänge – 0,5 mm fixiert.

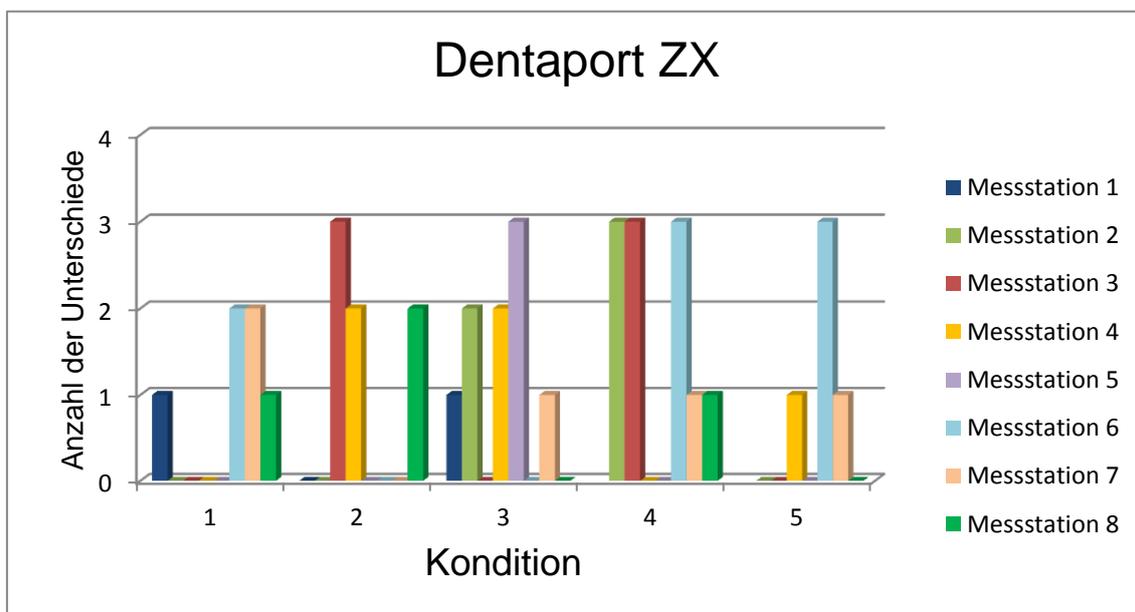


Abbildung 5-7: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps Dentaport ZX.

- 1 = NaOCl, Instrument ISO 10
- 2 = NaOCl, Instrument ISO 25
- 3 = getrocknet nach NaOCl
- 4 = EDTA
- 5 = CHX

Das Gerät Apex ID zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messstationen (Abbildung 5-8), aber eine signifikant schlechtere Übereinstimmung bei Gebrauch von CHX als unter den Konditionen „NaOCl“ und „getrocknet nach NaOCl“, jeweils gemessen mit einem Handinstrument der ISO-Größe 10 (Abbildung 5-9).

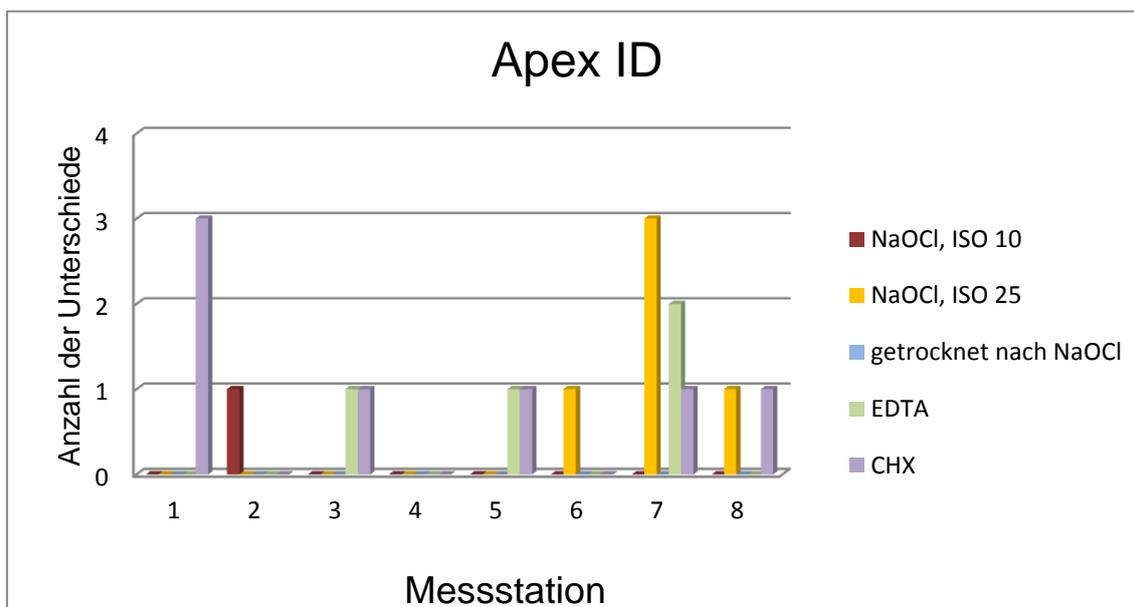


Abbildung 5-8: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps Apex ID.

1 = Instrumentenspitze schließt mit dem anatomischen Apex ab,

2 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 0,5 mm,

3 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 1,5 mm,

4 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 3 mm,

5 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge + 1 mm,

6 = Perforation auf Höhe der Wurzelmitte, Instrumentenspitze auf Wurzellänge - 0,5 mm,

7 = Nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, Instrumentenspitze bis zum Foramen,

8 = Mehrwurzeliger Zahn mit 3 Kanälen, Instrumentenspitze im mesiobukkalen Wurzelkanal auf Wurzellänge – 0,5 mm fixiert.

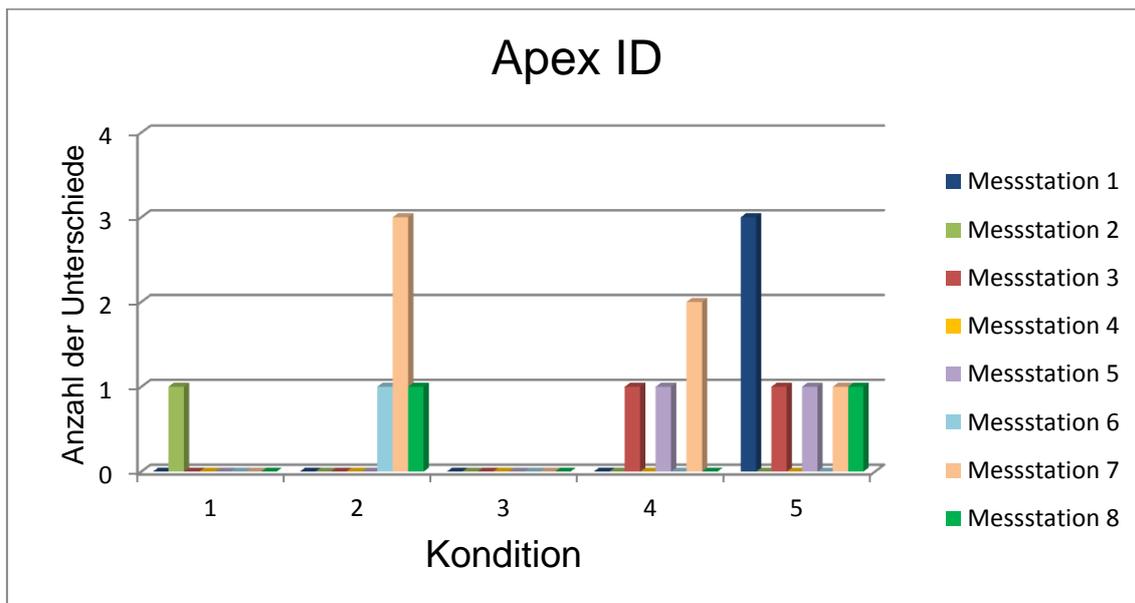


Abbildung 5-9: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps Apex ID.

1 = NaOCl, Instrument ISO 10

2 = NaOCl, Instrument ISO 25

3 = getrocknet nach NaOCl

4 = EDTA

5 = CHX

Das Gerät Root ZX weist sowohl beim Vergleich der Messtationen als auch der Konditionen im Wurzelkanal signifikante Unterschiede auf. So zeigt zum einen die Überinstrumentierung (Station 5) eine höhere Übereinstimmung als die Unterinstrumentierung von 1,5 mm (Station 3) und die Perforation (Station 6) (Abbildung 5-10), zum anderen führt der Gebrauch von EDTA als Spülflüssigkeit zu einer signifikant höheren Übereinstimmung als NaOCl in Kombination mit der Handinstrumentengröße ISO 10 (Abbildung 5-11).

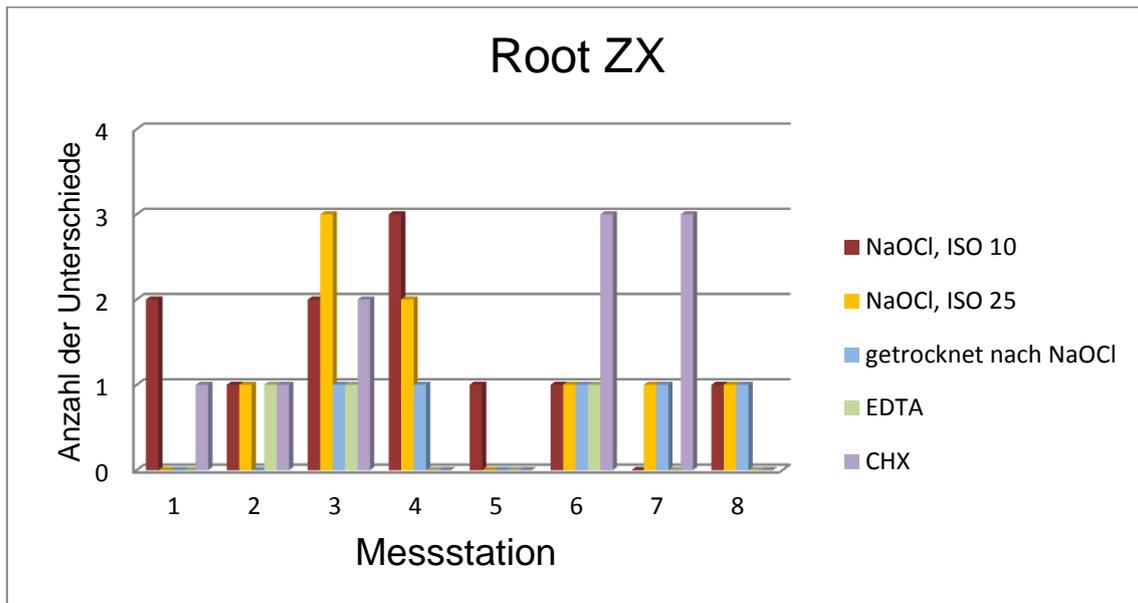


Abbildung 5-10: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps Root ZX.

- 1 = Instrumentenspitze schließt mit dem anatomischen Apex ab,
- 2 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 0,5 mm,
- 3 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 1,5 mm,
- 4 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 3 mm,
- 5 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge + 1 mm,
- 6 = Perforation auf Höhe der Wurzelmitte, Instrumentenspitze auf Wurzellänge - 0,5 mm,
- 7 = Nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, Instrumentenspitze bis zum Foramen,
- 8 = Mehrwurzeliger Zahn mit 3 Kanälen, Instrumentenspitze im mesiobukkalen Wurzelkanal auf Wurzellänge – 0,5 mm fixiert.

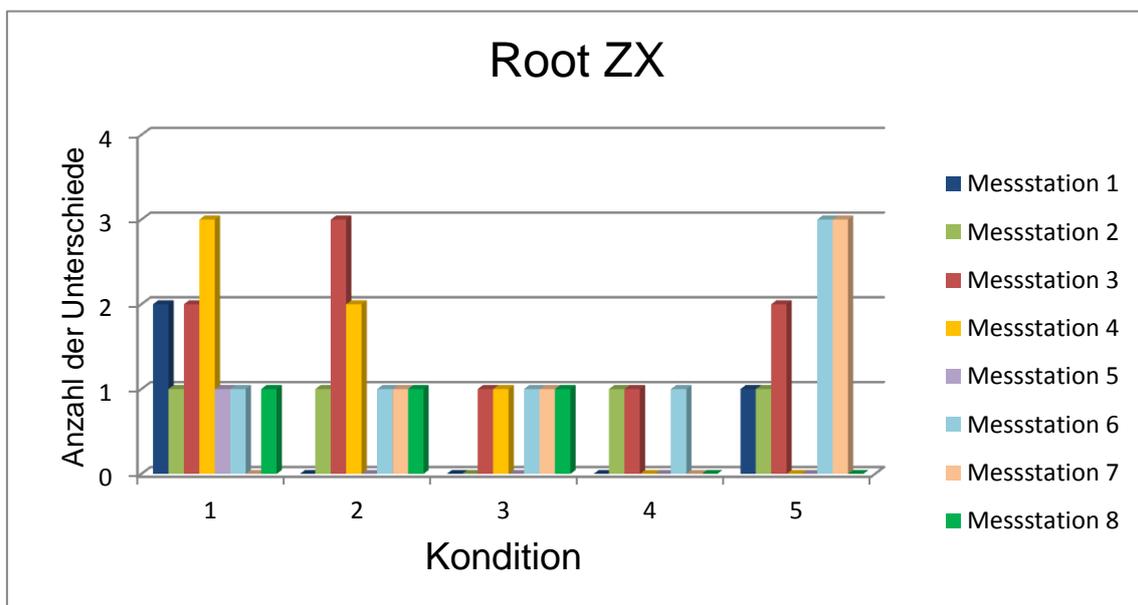


Abbildung 5-11: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps Root ZX.

- 1 = NaOCl, Instrument ISO 10
- 2 = NaOCl, Instrument ISO 25
- 3 = getrocknet nach NaOCl
- 4 = EDTA
- 5 = CHX

Das Gerät ProPex II zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messstationen (Abbildung 5-12). Lediglich bei der Messung mit einem Handinstrument der ISO-Größe 25 unter Gebrauch von NaOCl ist ein signifikant schlechteres Ergebnis nachweisbar als bei Verwendung von EDTA und CHX (Abbildung 5-13).

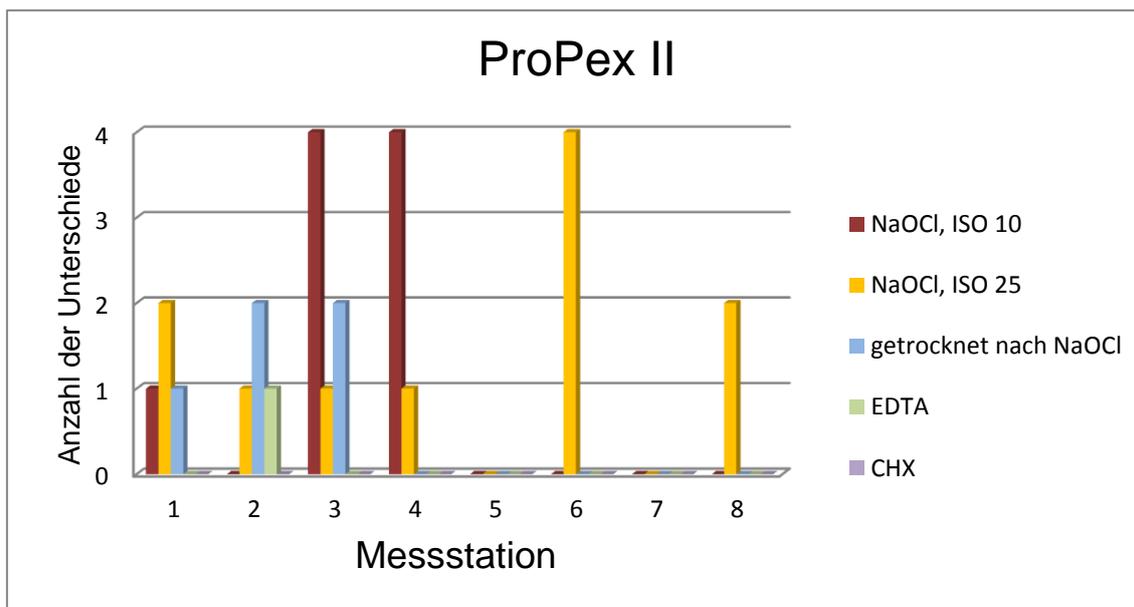


Abbildung 5-12: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Messstation des Gerätetyps ProPex II.

- 1 = Instrumentenspitze schließt mit dem anatomischen Apex ab,
- 2 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 0,5 mm,
- 3 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 1,5 mm,
- 4 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge – 3 mm,
- 5 = Instrumentenspitze auf Wurzellänge + 1 mm,
- 6 = Perforation auf Höhe der Wurzelmitte, Instrumentenspitze auf Wurzellänge - 0,5 mm,
- 7 = Nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, Instrumentenspitze bis zum Foramen,
- 8 = Mehrwurzeliger Zahn mit 3 Kanälen, Instrumentenspitze im mesiobukkalen Wurzelkanal auf Wurzellänge – 0,5 mm fixiert.

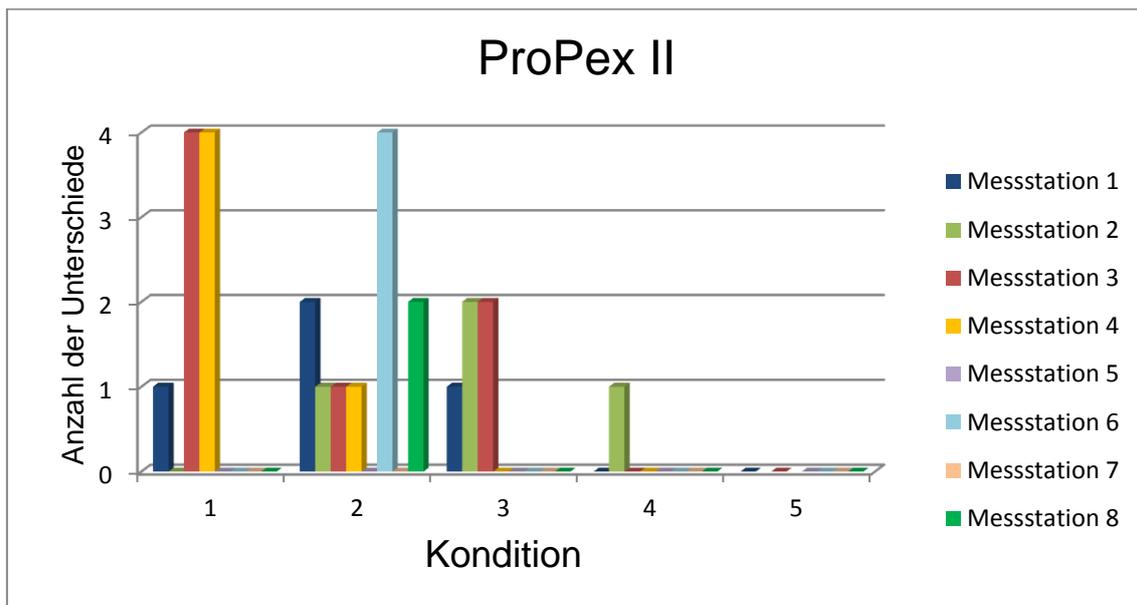


Abbildung 5-13: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse in Abhängigkeit von der Kondition im Wurzelkanal des Gerätetyps ProPex II.

- 1 = NaOCl, Instrument ISO 10
- 2 = NaOCl, Instrument ISO 25
- 3 = getrocknet nach NaOCl, Instrument ISO 10
- 4 = EDTA
- 5 = CHX

Werden innerhalb der Messstationen 1 - 8 die Gerätetypen untereinander verglichen, weisen die Gerätetypen Apex ID und Raypex 6 sowohl bei der Unterinstrumentierung von 1,5 mm (Abbildung 5-14) als auch bei der Perforation (Abbildung 5-15) signifikant bessere Ergebnisse auf als der Gerätetyp Root ZX. Außerdem zeigt das Gerät Raypex 6 in der Situation des nicht abgeschlossenen Wurzelwachstums zusammen mit dem Gerätetyp ProPex II eine signifikant bessere Übereinstimmung als das Gerät Dentaport ZX (Abbildung 5-16). Bei den übrigen Messstationen sind keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gerätetypen nachweisbar.

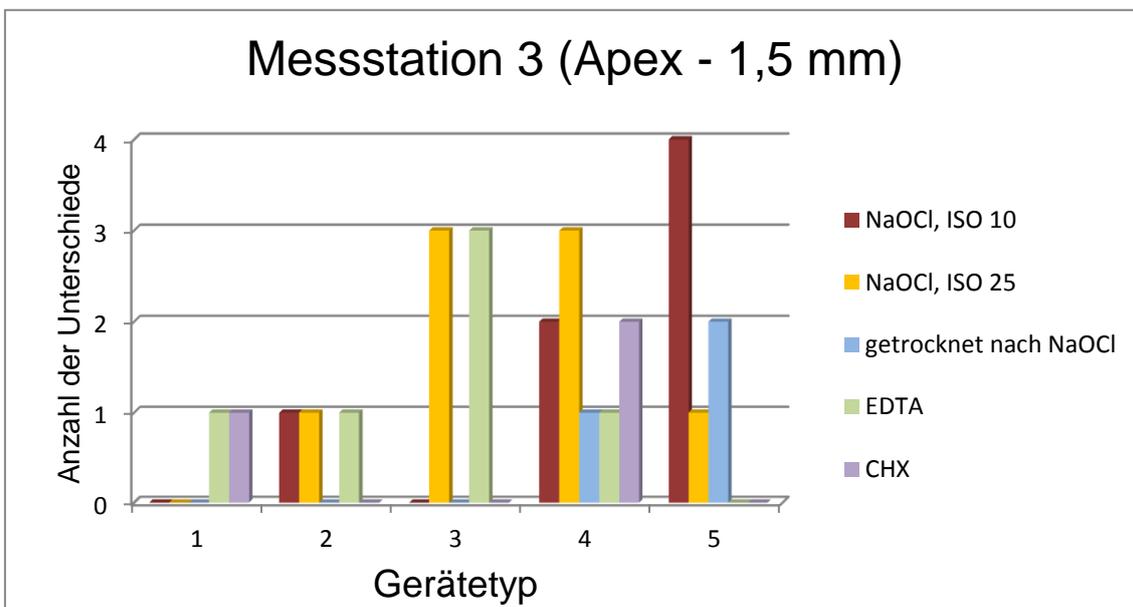


Abbildung 5-14: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse bei Messstation 3 in Abhängigkeit vom Gerätetyp.

- 1 = Apex ID
- 2 = Raypex 6
- 3 = Dentaport ZX
- 4 = Root ZX
- 5 = ProPex II

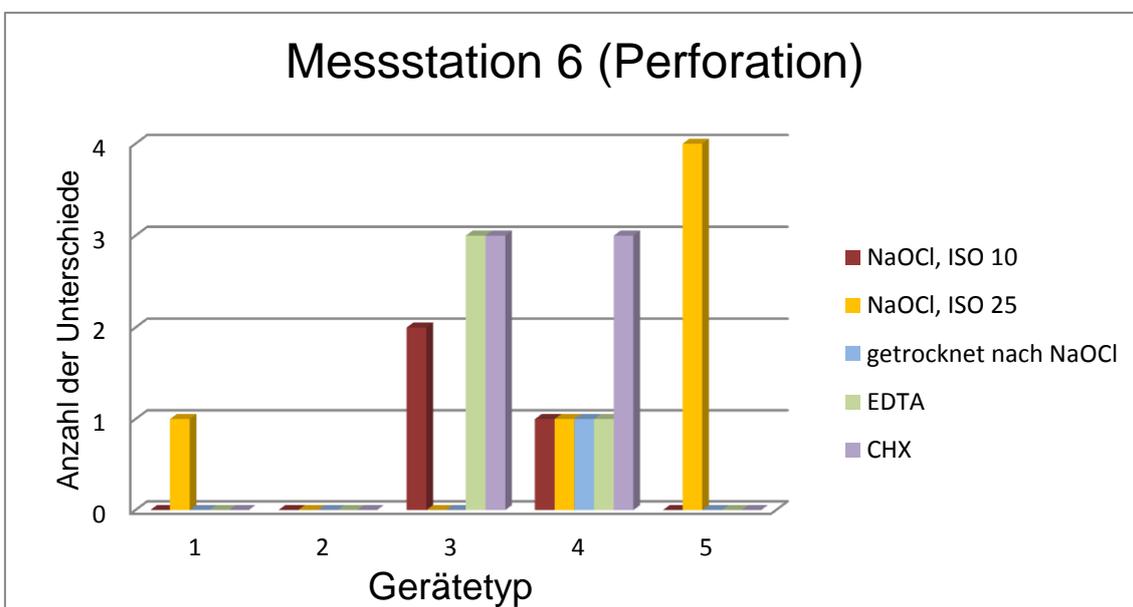


Abbildung 5-15: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse bei Messstation 6 in Abhängigkeit vom Gerätetyp.

- 1 = Apex ID
- 2 = Raypex 6
- 3 = Dentaport ZX
- 4 = Root ZX
- 5 = ProPex II

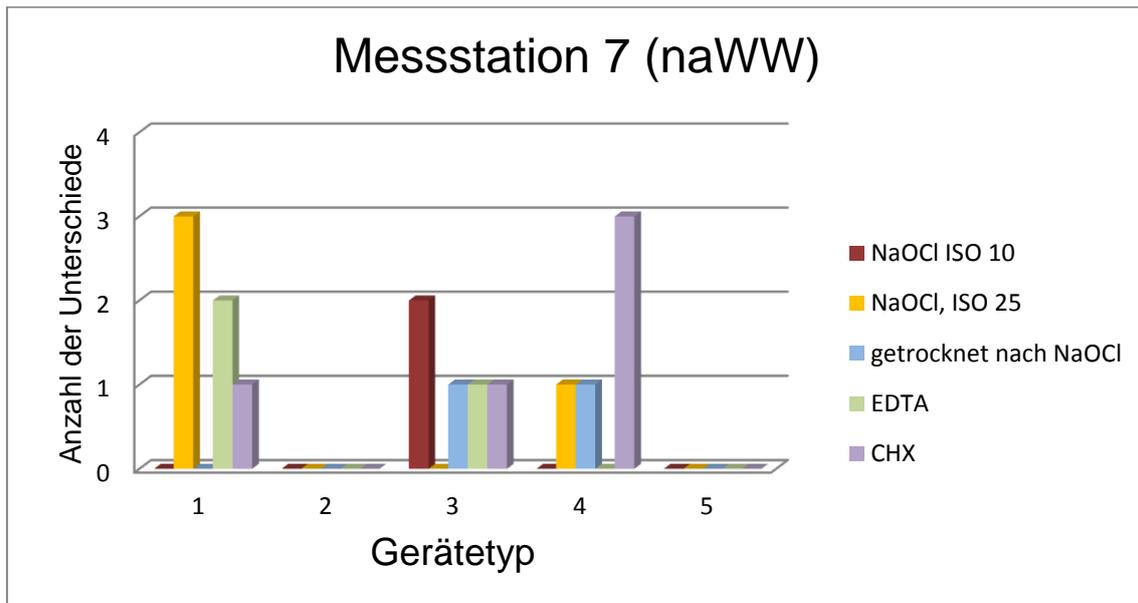


Abbildung 5-16: Vergleich der Anzahl unterschiedlicher Messergebnisse bei Messstation 7 in Abhängigkeit vom Gerätetyp.

- 1 = Apex ID
- 2 = Raypex 6
- 3 = Dentaport ZX
- 4 = Root ZX
- 5 = ProPex II

6. Diskussion

6.1 Material und Methode

Auch wenn diese Untersuchung als *In-vitro*-Studie erhoben wurde, schafft das Modell Bedingungen, die der klinischen Situation sehr nahe kommen. Aurelio et al. stellten bereits 1983 eine Studie für ein *In-vitro*-Modell vor. Dabei wurden, vergleichbar wie in vorliegender Studie, Reagenzgläser aus Kunststoff als Halteelement und Nägel als Verbindungselement zwischen dem Leitmedium und dem Messgerät verwendet. Bezüglich des Leitmediums findet man in der Literatur unterschiedliche Alternativen. Aurelio et al. benutzten Bacto-Agar mit phosphatgepufferter Kochsalzlösung (Aurelio et al. 1983). Czerw et al. (1994), Ounsi und Haddad (1998) und Donnelly (1993) beschrieben den Gebrauch von Jell-O mit 0,9%iger Kochsalzlösung (Donnelly 1993, Czerw et al. 1994, Ounsi und Haddad 1998). De Moor et al. (1999) verwendeten ebenfalls Jell-O zusammen mit 1%iger NaOCl-Lösung (Moor et al. 1999). Baldi et al. (2007) stellten in einer Studie fünf unterschiedliche Modelle vor, die sich in ihrem Leitmedium unterschieden [Alginat, Gelatine, Agar (jeweils mit 0,9%iger NaCl-Lösung), mit NaCl getränkter Schwamm, 0,9%ige Kochsalzlösung], und verglichen diese miteinander. Sie konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede feststellen (Baldi et al. 2007). Chen et al. verglichen Alginat, Gelatine und 0,9%ige Kochsalzlösung als Leitmedium und gaben an, dass Messungen mit dem Gerätetyp Dentaport ZX die größte Genauigkeit bei Verwendung von Gelatine oder Kochsalzlösung zeigten (Chen et al. 2011). Huang (1987) stellte in einer Studie verschiedene Experimente vor, deren Ergebnisse die Vermutung bewiesen, dass der konstante Gewebewiderstand kein biologisches, sondern ein physikalisches Phänomen ist (Huang 1987). Aus diesem Grund können die Ergebnisse von *In-vitro*-Studien, die die Messgenauigkeit von Endometrie-geräten überprüfen, auf den klinischen Alltag übertragen werden.

In vorliegender Studie wurde das Modell von Aurelio et al. übernommen. Das Leitmedium wurde nach einer bestimmten Anzahl an Vorversuchen durch 0,9%ige Kochsalzlösung ersetzt, da nach dem Erkalten des Agars und dessen

Austrocknung kein konstanter Kontakt des Zahnes zum Leitmedium über alle Messreihen hinweg gewährleistet werden konnte.

In die Auswahl der Zähne wurden sieben einwurzelige Zähne mit geradem Verlauf des Wurzelkanals eingeschlossen. Dies wurde aus vorhergegangenen Studien übernommen, um die Versuchsbedingungen der vorliegenden Studie mit denen in der Literatur vergleichbar zu machen (Czerw et al. 1995, Ounsi und Naaman 1999, Hör et al. 2005, Briseño-Marroquín et al. 2008, Chopra et al. 2008, Lipski et al. 2008, Stoll et al. 2010, Vasconcelos et al. 2013). Zusätzlich wurde zur Überprüfung von Querströmen zwischen den einzelnen Wurzelkanälen ein Unterkiefermolar eingeschlossen, wobei immer der mesio-bukkale Kanal den zu messenden Wurzelkanal darstellte. Die tatsächliche Länge des Wurzelkanals wurde unter 5-facher Vergrößerung unter einem Dentalmikroskop festgelegt. Diese Methode gewährleistet die genaue Positionierung der Handinstrumente an der jeweiligen Messstation und verringert dadurch die Fehlerquelle ungenau positionierter Instrumente.

Die unterschiedlichen acht Messstationen wurden ausgewählt, um verschiedene klinische Situationen einzubeziehen und deren Einfluss auf die Übereinstimmung der Messungen zu untersuchen. Zusätzlich wurden durch unterschiedliche Spülflüssigkeiten und ISO-Größen der Handinstrumente unterschiedliche Bedingungen geschaffen, die ebenfalls Einfluss auf die Messgenauigkeit haben können. Dabei wurde sich auf die gängigen und praxisrelevanten Spülflüssigkeiten NaOCl, EDTA und CHX beschränkt.

Huang erwähnte bereits im Jahr 1987, dass ein erweitertes apikales Foramen zu unzuverlässigen Messungen führt, da Flüssigkeiten durch Adhäsionskräfte von apikal in den Kanaleingang eindringen und fälschlicherweise verfrüht das Erreichen des Apex angezeigt wird. Folglich empfahl Huang Gelatine als Leitmedium, obwohl keine signifikanten Unterschiede zu flüssigen Leitmedien nachgewiesen werden konnten (Huang 1987). Czerw et al. kamen 1994 zu dem Ergebnis, dass auch Gelatine zur vorzeitigen Lokalisation des Apex führt (Czerw et al. 1994). Auch Akisue et al. gaben an, dass die endometrische Messung an Zähnen mit erweitertem Foramen apicale das verfrühte Anzeigen des Apex zur Folge hat (Akisue et al. 2014).

Bei allen Messstationen wurde die Wurzelkanallänge, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, unter 5-facher Vergrößerung mit Hilfe eines Dental-Mikroskopes festgelegt und anschließend die Insertionslänge des Handinstrumentes bei den Stationen der Über- und Unterinstrumentierung ermittelt. Trotz der Befestigung mit Sekundenkleber kann ein Verrutschen des Stoppers und die damit einhergehende Bewegung des Instrumentes über alle Messreihen hinweg nicht vollständig ausgeschlossen werden. Nur die Station der Überinstrumentierung erlaubt die visuelle Kontrolle der Instrumentenposition. Um die Bewegung der Instrumente möglichst einzuschränken, wurden alle Messungen von demselben Untersucher durchgeführt.

Die Messstation des Molars wurde zusätzlich in den Versuchsaufbau integriert, um eventuell auftretende Querströme zwischen Seitenkanälen oder über die Pulpakammer zu berücksichtigen. Dafür wurden Messungen in einem Wurzelkanal durchgeführt, während alle drei Wurzelkanäle entweder trocken oder mit der jeweiligen Spülflüssigkeit gefüllt waren. Eine mögliche Fehlerquelle bei dieser Messstation stellt im Kanalsystem verbliebene Restflüssigkeit dar, die eventuell zu unterschiedlichen Messergebnissen führen kann. Diese Fehlerquelle beschränkt sich jedoch nicht nur auf eine *In-vitro*-Messung, sondern kann auch im klinischen Alltag zu Messungenauigkeiten führen.

Die Auswahl der Endometriegeräte orientierte sich vor allem an den marktüblichen Herstellern und der Verfügbarkeit. Weiterhin wurden die Hersteller und Geräte eingeschlossen, zu denen bereits Literatur zugänglich war.

Zur statistischen Auswertung wurde der Kruskal-Wallis-Test angewendet. Da nur vier Geräte pro Hersteller eingeschlossen wurden, war der X^2 -Test aufgrund der geringeren statistischen Teststärke nicht ausreichend, um statistisch signifikante Unterschiede festzustellen. Bei einer höheren Fallzahl hätte letzterer wie in ähnlichen Studien verwendet werden können.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Beim Vergleich der Gerätetypen zeigt unsere Studie eine signifikant bessere Übereinstimmung innerhalb der Gerätetypen Apex ID und Raypex 6 als bei den Geräten des Typs Root ZX und Dentaport ZX. ProPex II wies nur signifikant bessere Werte auf als das Gerät Root ZX.

In der Literatur der letzten Jahre sind zahlreiche Studien über die Genauigkeit von Endometriegeräten zu finden. Dabei ist die Bandbreite der Ergebnisse sehr groß. Untersuchungen des Gerätetyps Root ZX variieren beispielsweise zwischen 69% und 97% Messgenauigkeit (Meares und Steiman 2002, Vasconcelos et al. 2010, Vieyra und Acosta 2011, Duran-Sindreu et al. 2012, Vasconcelos et al. 2013). Angaben in der Literatur zur Messgenauigkeit des Gerätes ProPex II fallen tendenziell niedriger aus. So geben Vasconcelos et al. eine genaue Lokalisation der apikalen Konstriktion in 67,6% der Fälle und Briseño-Marroquín et al., je nach ISO-Größe des Handinstrumentes, eine Messgenauigkeit von 38 - 43% an (Briseño-Marroquín et al. 2008, Vasconcelos et al. 2013). Kontroverse Ergebnisse erzielten Cianconi et al.. Sie untersuchten ebenfalls die Messgenauigkeit der Geräte ProPex II und Root ZX und gaben eine höhere Präzision für ProPex II an. Sie evaluierten auch den Einfluss der ISO-Größe der Messinstrumente auf die Messgenauigkeit, konnten aber keinen statistisch signifikanten Unterschied feststellen (Cianconi et al. 2011). Auch wenn die vorliegende Studie nicht die Genauigkeit der Messgeräte überprüft, sondern die Übereinstimmung gleicher Geräte untereinander, spiegeln die vorliegenden Ergebnisse die der Studie von Cianconi et al. wieder.

Die Auswertung der Ergebnisse unserer Studie bezüglich der Kondition im Wurzelkanal zeigt, dass unabhängig von dem Gerätetyp und der Messstation keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten.

Betrachtet man die Abhängigkeit der einzelnen Gerätetypen von der Messstation und der Kondition im Wurzelkanal, fällt auf, dass die Übereinstimmung der Geräte Raypex 6 und Dentaport ZX weder von der Messstation noch von der Spülflüssigkeit beeinflusst werden. Das Gerät Apex ID weist jedoch bei Verwendung von NaOCl eine signifikant bessere Übereinstimmung auf als bei Benutzung von CHX. Im Gegensatz dazu zeigt

das Gerät ProPex II schlechtere Werte bei der Verwendung von NaOCl in Kombination mit Instrumenten der ISO-Größe 25 als bei Spülung mit EDTA und CHX. Auch das Gerät Root ZX zeigt bei Verwendung von NaOCl in Verbindung mit der Instrumentengröße ISO 10 eine signifikant schlechtere Übereinstimmung als bei Verwendung von EDTA. Diese Tendenz zeigt auch eine Studie von Kang und Kim, in der die Geräte Root ZX und ProPex II bei Verwendung von NaOCl zu kurze Wurzelkanallängen angaben. Einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen NaOCl und CHX konnten sie jedoch nicht feststellen (Kang und Kim 2008). Pilot und Pitts untersuchten ebenfalls den Einfluss von Spülflüssigkeiten und bemerkten eine sich verändernde Impedanz bei Gebrauch von NaOCl. Den Grund dafür vermuteten sie in der hohen Konduktivität der Flüssigkeit (Pilot und Pitts 1997). Im Gegensatz dazu konnte in anderen Studien kein Einfluss von NaOCl auf die Messgenauigkeit des Gerätetyps Root ZX nachgewiesen werden (Weiger et al. 1999, Jenkins et al. 2001, Carvalho et al. 2010).

Bezüglich der einzelnen Messstationen geht aus vorliegender Studie hervor, dass bei den Situationen der eindeutigen Unterinstrumentierung von 3 mm, der Überinstrumentierung und des nicht abgeschlossenen Wurzelwachstums die Übereinstimmungen am höchsten waren. Dabei zeigte die Überinstrumentierung die meisten Übereinstimmungen, allerdings ohne statistisch signifikanten Unterschied zu den beiden anderen genannten Messstationen. Akisue et al. untersuchten in einer *In-vitro*-Studie die Messgenauigkeit von Endometriegeräten an Zähnen mit erweiterten Foramina. Hierbei zeigte das Gerät ProPex II unzuverlässige Messwerte (Akisue et al. 2014). In unserer Studie weist der Gerätetyp ProPex II in der Messsituation des nicht abgeschlossenen Wurzelwachstums zusammen mit dem Gerätetyp Raypex 6 die höchste Übereinstimmung auf. Diese Tatsache spricht für eine hohe Sicherheit beider Gerätetypen.

EIAyouti et al. untersuchten die Stabilität der Anzeige des Gerätetyps Root ZX und gaben an, dass zu 91,2% eine konsistente Lokalisierung des Apex möglich war (EIAyouti et al. 2009). Im Gegensatz zu anderen Studien untersuchten

ElAyouti et al. nicht die Genauigkeit, sondern die Stabilität der Anzeige. Dies Ergebnis lässt auf ein sicheres Gerät schlussfolgern. Der Vergleich zu unserer Studie lässt jedoch die Vermutung zu, dass nicht alle Geräte dieses Typs identische Messungen liefern, auch wenn die Konsistenz des einzelnen Gerätes sehr hoch ist.

Auch wenn das Modell der vorliegenden *In-vitro*-Studie die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der endometrischen Messung am Patienten nachahmen kann, fehlen doch einige Parameter und biologische Bedingungen, um alle Einflussfaktoren einbeziehen zu können. So kann beispielsweise nekrotisches Gewebe im Wurzelkanal zu veränderten Messwerten führen (Arora und Gulabivala 1995). Mayeda et al. konnten die Beeinflussung von nekrotischem Gewebe jedoch nicht nachweisen und Saatchi et al. gaben an, dass die Parodontitis apicalis auf die endometrische Messung keine Auswirkungen hat (Mayeda et al. 1993, Saatchi et al. 2014). Ein weiterer Einflussfaktor ist die Resorption. Eine Studie von Bodur et al. gibt an, dass die Genauigkeit der endometrischen Messung bei Zähnen der ersten Dentition mit vorliegender Resorption abnimmt (Bodur et al. 2008). Dies konnte wiederum von Angwaravong und Panitvisai nicht bestätigt werden (Angwaravong und Panitvisai 2009). Dennoch sollten mögliche biologische Faktoren nicht außer Acht gelassen werden.

Auf Nachfrage bei den Herstellern, die die Geräte für die vorliegende Studie zur Verfügung stellten, konnten keine Angaben zum Alter der Geräte und zur Häufigkeit vergangener Anwendungen gemacht werden. Möglicherweise hat dieser Faktor einen Einfluss auf die Konstanz der Messgenauigkeit über die Zeit.

7. Schlussfolgerungen

Verschiedene Endometriegeräte desselben Gerätetyps eines Herstellers zeigen zwar eine hohe, aber keine vollständige Übereinstimmung der Messergebnisse.

Studien zur Messgenauigkeiten von Endometriegeräten, die mit nur jeweils einem Gerät eines Gerätetyps durchgeführt wurden, können daher nicht umstandslos auf den gesamten Gerätetyp übertragen werden. Inwieweit das Alter eines Gerätes und Häufigkeit seiner Anwendung Auswirkungen auf die Konstanz der Messgenauigkeit haben, bedarf weiterer Überprüfung.

Zwischen einzelnen Gerätetypen waren signifikante Unterschiede in der Übereinstimmung zwischen den einzelnen Geräten zu erkennen.

Die verwendete Spüllösung hatte keinen Einfluss auf die Übereinstimmung zwischen den Geräten.

In bestimmten klinischen Situationen (Überinstrumentierung, nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum, ...) ist mit einer hohen Übereinstimmung der Messungen verschiedener Geräte desselben Gerätetyps zu rechnen.

Durch verbesserte Qualitätskontrollen der Hersteller sollte eine erhöhte Übereinstimmung der Messergebnisse verschiedener Geräte desselben Gerätetyps sichergestellt werden.

8. Zusammenfassung

Die endometrische Messung des Wurzelkanals hat sich in den letzten Jahren im klinischen Alltag zusätzlich zur röntgenologischen Messung etabliert. Durch die rasche Weiterentwicklung und Verbesserung der Messgeräte wird in der Literatur für die endometrische Messung eine Messgenauigkeit von bis zu 93% angegeben. Die Kombination der Befunde beider Messtechniken soll zum einen zu einer genaueren Lokalisierung der apikalen Konstriktion führen und zum anderen einen Einblick in die Komplexität des Wurzelkanalsystems und etwaiger Komplikationen geben.

In der Literatur existieren zahlreiche *In-vitro*- und *In-vivo*-Studien zur Messgenauigkeit einzelner Geräte. Um diese Studien miteinander vergleichen zu können, muss von identischen Messergebnissen von Geräten desselben Typs ausgegangen werden. Eine Studie zur Vergleichbarkeit innerhalb einer Gruppe identischer Geräte liegt in der Literatur bisher nicht vor.

Ziel der Untersuchung war es somit, die Übereinstimmung von Endometrie-geräten derselben Gerätemarke unter unterschiedlichen Bedingungen *in vitro* zu überprüfen. Dabei sollte überprüft werden, ob zum einen bestimmte Situationen, wie unterschiedliche Insertionslängen der Handinstrumente, die Perforation oder nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum und zum anderen unterschiedliche Spüllösungen oder die ISO-Größen der Handinstrumente Einfluss auf die Übereinstimmung nehmen.

Die Übereinstimmung der Messungen wurde an fünf Gerätetypen untersucht und die Ergebnisse in ein Messprotokoll eingetragen.

Es wurden folgende Gerätetypen eingeschlossen:

Apex ID (SybronEndo, Glendora, Kalifornien, USA)

Raypex 6 (VDW Antaeos, München, Deutschland)

Dentaport ZX (J. MORITA, Kyoto, Japan)

Root ZX (J. MORITA, Kyoto, Japan)

ProPex II (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz)

Die Versuche wurden mit Hilfe eines Modells aus acht Zähnen durchgeführt. Diese stellten unterschiedliche Messsituationen dar, an die jeweils vier identische Geräte eines Typs angeschlossen wurden. Zusätzlich wurde der Einfluss verschiedener Spüllösungen und ISO-Größen der Handinstrumente untersucht.

Die Spüllösung als alleiniger Faktor hat keinen Einfluss auf die Übereinstimmung innerhalb der Gerätetypen. Bei Betrachtung der Messstationen konnte die größte Übereinstimmung bei der Überinstrumentierung (+1 mm) gefolgt von der Unterinstrumentierung (-3 mm) und dem nicht abgeschlossenen Wurzelwachstum nachgewiesen werden. Der Vergleich zwischen den Herstellern ergab die größte Übereinstimmung innerhalb der Gerätetypen Apex ID und Raypex 6. Besonders bei den Messstationen der Unterinstrumentierung von 1,5 mm und der Perforation zeigten die Gerätetypen Apex ID und Raypex 6 eine signifikant bessere Übereinstimmung als der Typ Root ZX. Bei der Überinstrumentierung wiesen alle verwendeten Gerätetypen eine ähnliche Übereinstimmung auf.

Zusammenfassend erzielten alle Geräte Ergebnisse, die in einem guten Bereich der Übereinstimmung liegen. Je nach Einflussgröße sind dennoch statistisch signifikante Unterschiede nachweisbar.

Studien zu einzelnen Gerätetypen müssen umsichtig interpretiert werden, da die Messwerte eines einzelnen Gerätes nicht auf alle Geräte eines Typs übertragen werden können. Zur weiteren Überprüfung sind Studien nötig, die auch klinische und biologische Aspekte und Einflussfaktoren auf die Messung einbeziehen können.

9. Literaturverzeichnis

- Akisue E, Gratieri SD, Barletta FB, Caldeira CL, Grazziotin-Soares R, Gavini G (2014): Not all electronic foramen locators are accurate in teeth with enlarged apical foramina: an in vitro comparison of 5 brands. *J Endod* 40, 109–112
- Angwaravong O, Panitvisai P (2009): Accuracy of an electronic apex locator in primary teeth with root resorption. *Int Endod J* 42, 115–121
- Arora RK, Gulabivala K (1995): An in vivo evaluation of the ENDEX and RCM Mark II electronic apex locators in root canals with different contents. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 79, 497–503
- Aurelio JA, Nahmias Y, Gerstein H (1983): A model for demonstrating an electronic canal length measuring device. *J Endod* 9, 568–569
- Baldi JV, Victorino FR, Bernardes RA, de Moraes IG, Bramante CM, Garcia RB, Bernardineli N (2007): Influence of embedding media on the assessment of electronic apex locators. *J Endod* 33, 476–479
- Bender I, Seltzer S, Yermish M (2003): The incidence of bacteremia in endodontic manipulation: preliminary report. *J Endod* 29, 697–700
- Bodur H, Odabaş M, Tulunoğlu O, Tinaz AC (2008): Accuracy of two different apex locators in primary teeth with and without root resorption. *Clin Oral Investig* 12, 137–141
- Bramante C, Berbert A (1974): A critical evaluation of some methods of determining tooth length. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 37, 463–473
- Briseño-Marroquín B, Frajlích S, Goldberg F, Willershausen B (2008): Influence of instrument size on the accuracy of different apex locators: an in vitro study. *J Endod* 34, 698–702
- Carvalho ALP, Moura-Netto C, Moura AAM de, Marques MM, Davidowicz H (2010): Accuracy of three electronic apex locators in the presence of different irrigating solutions. *Braz Oral Res* 24, 394–398
- Chapman CE (1969): A microscopic study of the apical region of human anterior teeth. *J Br Endod Soc* 3, 52–58
- Chen E, Kaing S, Mohan H, Ting S-Y, Wu J, Parashos P (2011): An ex vivo comparison of electronic apex locator teaching models. *J Endod* 37, 1147–1151

- Chevalier V, Arbab-Chirani R, Nicolas M, Morin V (2009): Occurrence of no-function of two electronic apex locators: an in vivo study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 108, e61–65
- Chopra V, Grover S, Prasad SD (2008): In vitro evaluation of the accuracy of two electronic apex locators. *J Conserv Dent JCD* 11, 82–85
- Cianconi L, Angotti V, Felici R, Conte G, Mancini M (2011): Precisione nella determinazione della lunghezza di lavoro mediante localizzatori elettronici d'apice, radiologia digitale e prova visiva: presentazione di una nuova metodica sperimentale di indagine — uno studio ex-vivo. *Exact determination of the working length by electronic apex locators, digital radiology, and visual test: presentation of a new experimental research strategy — an ex-vivo study. G Ital Endod Vol 25 P 24-32* 25, 24–32
- Czerw RJ, Fulkerson MS, Donnelly JC (1994): An in vitro test of a simplified model to demonstrate the operation of electronic root canal measuring devices. *J Endod* 20, 605–606
- Czerw RJ, Fulkerson MS, Donnelly JC, Walmann JO (1995): In vitro evaluation of the accuracy of several electronic apex locators. *J Endod* 21, 572–575
- Debelian GJ, Olsen I, Tronstad L (1992): Profiling of Propionibacterium acnes recovered from root canal and blood during and after endodontic treatment. *Endod Dent Traumatol* 8, 248–254
- Debelian GJ, Olsen I, Tronstad L (1998): Anaerobic bacteremia and fungemia in patients undergoing endodontic therapy: an overview. *Ann Periodontol Am Acad Periodontol* 3, 281–287
- Donnelly JC (1993): A simplified model to demonstrate the operation of electronic root canal measuring devices. *J Endod* 19, 579–580
- Dummer PM, McGinn JH, Rees DG (1984): The position and topography of the apical canal constriction and apical foramen. *Int Endod J* 17, 192–198
- Duran-Sindreu F, Stöber E, Mercadé M, Vera J, Garcia M, Bueno R, Roig M (2012): Comparison of in vivo and in vitro readings when testing the accuracy of the Root ZX apex locator. *J Endod* 38, 236–239
- EIAyouti A, Weiger R, Löst C (2001): Frequency of overinstrumentation with an acceptable radiographic working length. *J Endod* 27, 49–52
- EIAyouti A, Dima E, Ohmer J, Sperl K, von Ohle C, Löst C (2009): Consistency of apex locator function: a clinical study. *J Endod* 35, 179–181
- European Society of Endodontology (2006): Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 39, 921–930
- Fouad AF, Krell KV, McKendry DJ, Koorbusch GF, Olson RA (1990): Clinical evaluation of five electronic root canal length measuring instruments. *J Endod* 16, 446–449

- Fouad AF, Rivera EM, Krell KV (1993): Accuracy of the Endex with variations in canal irrigants and foramen size. *J Endod* 19, 63–67
- Gabor C, Tam E, Shen Y, Haapasalo M (2012): Prevalence of internal inflammatory root resorption. *J Endod* 38, 24–27
- Goldberg F, Frajlích S, Kuttler S, Manzur E, Briseño-Marroquín B (2008): The evaluation of four electronic apex locators in teeth with simulated horizontal oblique root fractures. *J Endod* 34, 1497–1499
- Gordon MPJ, Chandler NP (2004): Electronic apex locators. *Int Endod J* 37, 425–437
- Guldener P, Langeland K: *Endodontologie: Diagnostik und Therapie*. 3. neubearbeitete Auflage; Thieme, Stuttgart 1993
- Gutierrez JH, Aguayo P (1995): Apical foraminal openings in human teeth. Number and location. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 79, 769–777
- Hellwig E, Klimek J, Attin T: *Einführung in die Zahnerhaltung*. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage; Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln 2009
- Himel VT, Schott RN (1993): An evaluation of the durability of apex locator insulated probes after autoclaving. *J Endod* 19, 392–394
- Hör D, Attin T (2001): Die elektrische Längenbestimmung des Wurzelkanals. *Endodontie* 1, 39–56
- Hör D, Krusy S, Attin T (2005): Ex vivo comparison of two electronic apex locators with different scales and frequencies. *Int Endod J* 38, 855–859
- Huang L (1987): An experimental study of the principle of electronic root canal measurement. *J Endod* 13, 60–64
- Hülsmann M: *Checklisten der Zahnmedizin - Endodontie*. Thieme, Stuttgart 2008
- Imura N, Pinheiro ET, Gomes BPFA, Zaia AA, Ferraz CCR, Souza-Filho FJ (2007): The outcome of endodontic treatment: a retrospective study of 2000 cases performed by a specialist. *J Endod* 33, 1278–1282
- Jenkins JA, Walker WA, Schindler WG, Flores CM (2001): An in vitro evaluation of the accuracy of the root ZX in the presence of various irrigants. *J Endod* 27, 209–211
- Kang J-A, Kim SK (2008): Accuracies of seven different apex locators under various conditions. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 106, e57–62
- Katz A, Tamse A, Kaufman AY (1991): Tooth length determination: a review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 72, 238–242

- Katz A, Mass E, Kaufman AY (1996): Electronic apex locator: a useful tool for root canal treatment in the primary dentition. *ASDC J Dent Child* 63, 414–417
- Keller ME, Brown CE, Newton CW (1991): A clinical evaluation of the Endocater--an electronic apex locator. *J Endod* 17, 271–274
- Khan IU, Sobhi MB (2003): Detecting the apical constriction in curved mandibular molar roots--preflared versus nonflared canals. *J Ayub Med Coll Abbottabad JAMC* 15, 47–49
- Kobayashi C (1995): Electronic canal length measurement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 79, 226–231
- Kobayashi C, Suda H (1994): New electronic canal measuring device based on the ratio method. *J Endod* 20, 111–114
- Lipski M, Woźniak K, Lichota D, Jamroszczyk K, Nowicka A, Góra M, Trabska-Swistelnicza M, Sobolewska E, Tomasik M, Buczkowska-Radlińska J (2008): A comparative evaluation of Apex D.S.P. and Root ZX Apex locators. An in vitro study. *Ann Acad Med Stetin* 54, 33–36
- Marquis VL, Dao T, Farzaneh M, Abitbol S, Friedman S (2006): Treatment outcome in endodontics: the Toronto Study. Phase III: initial treatment. *J Endod* 32, 299–306
- Mayeda DL, Simon JHS, Aimar DF, Finley K (1993): In vivo measurement accuracy in vital and necrotic canals with the endex apex locator. *J Endod* 19, 545–548
- McDonald NJ, Hovland EJ (1990): An evaluation of the Apex Locator Endocater. *J Endod* 16, 5–8
- Meares WA, Steiman HR (2002): The influence of sodium hypochlorite irrigation on the accuracy of the Root ZX electronic apex locator. *J Endod* 28, 595–598
- Moor RJ de, Hommez GM, Martens LC, Boever JG de (1999): Accuracy of four electronic apex locators: an in vitro evaluation. *Endod Dent Traumatol* 15, 77–82
- Nekoofar M, Ghandi M, Hayes S, Dummer P (2006): The fundamental operating principles of electronic root canal length measurement devices. *Int Endod J* 39, 595–609
- Olson AK, Goerig AC, Cavataio RE, Luciano J (1991): The ability of the radiograph to determine the location of the apical foramen. *Int Endod J* 24, 28–35
- Ounsi HF, Haddad G (1998): In vitro evaluation of the reliability of the Endex electronic apex locator. *J Endod* 24, 120–121

- Ounsi HF, Naaman A (1999): In vitro evaluation of the reliability of the Root ZX electronic apex locator. *Int Endod J* 32, 120–123
- Pagavino G, Pace R, Baccetti T (1998): A SEM study of in vivo accuracy of the Root ZX electronic apex locator. *J Endod* 24, 438–441
- Pahncke D, Voß A (1991): Die Abhängigkeit endometrischer Messungen von den Bedingungen im Wurzelkanal. *Dtsch Zahnärztliche Z* 46, 635–636
- Pascon EA, Marrelli M, Congi O, Ciancio R, Miceli F, Versiani MA (2009): An ex vivo comparison of working length determination by 3 electronic apex locators. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 108, e147–151
- Pilot TF, Pitts DL (1997): Determination of impedance changes at varying frequencies in relation to root canal file position and irrigant. *J Endod* 23, 719–724
- Pommer O, Stamm O, Attin T (2002): Influence of the canal contents on the electrical assisted determination of the length of root canals. *J Endod* 28, 83–85
- Ravanshad S, Adl A, Anvar J (2010): Effect of working length measurement by electronic apex locator or radiography on the adequacy of final working length: a randomized clinical trial. *J Endod* 36, 1753–1756
- Ricucci D (1998): Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 1. Literature review. *Int Endod J* 31, 384–393
- Saatchi M, Aminozarbian MG, Hasheminia SM, Mortaheb A (2014): Influence of apical periodontitis on the accuracy of 3 electronic root canal length measurement devices: an in vivo study. *J Endod* 40, 355–359
- Saito T, Yamashita Y (1990): Electronic determination of root canal length by newly developed measuring device. Influences of the diameter of apical foramen, the size of K-file and the root canal irrigants. *Dent Jpn (Tokyo)* 27, 65–72
- Somma F, Castagnola R, Lajolo C, Paternò Holtzman L, Marigo L (2012): In vivo accuracy of three electronic root canal length measurement devices: Dentaport ZX, Raypex 5 and ProPex II. *Int Endod J* 45, 552–556
- Steffen H, Löw A (1999): Klinische Bewertung der Messgenauigkeit des Root ZX im Vergleich zur Röntgenmessaufnahme. *Dtsch Zahnärztliche Z* 54, 559–562
- Steffen H, Splieth CH, Behr K (1999): Comparison of measurements obtained with hand files or the Canal Leader attached to electronic apex locators: an in vitro study. *Int Endod J* 32, 103–107
- Stein TJ, Corcoran JF (1992): Radiographic „working length“ revisited. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 74, 796–800

- Stoll R, Urban-Klein B, Roggendorf MJ, Jablonski-Momeni A, Strauch K, Frankenberger R (2010): Effectiveness of four electronic apex locators to determine distance from the apical foramen. *Int Endod J* 43, 808–817
- Sunada I (1962): New Method for Measuring the Length of the Root Canal. *J Dent Res* 41, 375–387
- Torabinejad M, Corr R, Handysides R, Shabahang S (2009): Outcomes of nonsurgical retreatment and endodontic surgery: a systematic review. *J Endod* 35, 930–937
- Ushiyama J (1983): New principle and method for measuring the root canal length. *J Endod* 9, 97–104
- Vande Voorde HE, Bjorndahl AM (1969): Estimating endodontic “working length” with paralleling radiographs. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 27, 106–110
- Vasconcelos BC de, Vale TM do, Menezes AST de, Pinheiro-Junior EC, Vivacqua-Gomes N, Bernardes RA, Hungaro Duarte MA (2010): An ex vivo comparison of root canal length determination by three electronic apex locators at positions short of the apical foramen. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 110, e57–61
- Vasconcelos BC de, Medeiros Bueno M, Luna-Cruz SM, Duarte MAH, Fernandes CA de O (2013): Accuracy of five electronic foramen locators with different operating systems: an ex vivo study. *J Appl Oral Sci Rev FOB* 21, 132–137
- Vieyra JP, Acosta J (2011): Comparison of working length determination with radiographs and four electronic apex locators. *Int Endod J* 44, 510–518
- Visser H, Kramer I, Hülsmann M, Krüger W (1991): Physikalische Charakterisierung von Endometriegeräten. *Zahnärztliche Welt* 100, 458–462
- Weiger R, John C, Geigle H, Löst C (1999): An in vitro comparison of two modern apex locators. *J Endod* 25, 765–768
- Welk AR, Baumgartner JC, Marshall JG (2003): An in vivo comparison of two frequency-based electronic apex locators. *J Endod* 29, 497–500
- Wu M, Wesselink P (2001): Überlegungen zum apikalen Endpunkt der Wurzelkanalbehandlung. *Endodontie* 10, 9–71

Anhang

Einverständniserklärung

Universitätsmedizin Göttingen, 37099 Göttingen
Zentrum für Zahn- Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie

Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Präventive Zahnmedizin,
Parodontologie und Kariologie

Direktorin
Prof. Dr. A. Wiegand
37099 Göttingen **Briefpost**
Robert-Koch-Straße 40, 37075 Göttingen **Adresse**
0551 / 39-22884 **Telefon**
0551 / 39-22037 **Fax**
Annette.wiegand@med.uni-goettingen.de **E-Mail**

Informationsbogen und Einverständniserklärung zur Verwendung extrahierter Zähne

Sehr geehrte Patientin, sehr geehrter Patient,

die Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie der Universitätsmedizin Göttingen möchte sowohl die zahnmedizinische Ausbildung als auch die Durchführung wissenschaftlicher Projekte auf hohem Niveau gewährleisten. Hierzu bitten wir nachfolgend um Ihre Unterstützung: Da für eine möglichst realitätsnahe Ausbildung und Forschung die Verwendung extrahierter Zähne unerlässlich ist, möchten wir Sie bitten, Ihre(n) extrahierten oder operativ entfernten Zahn/Zähne der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie zur Verfügung zu stellen.

Bitte beachten Sie folgende wichtige Hinweise:

- Ihre Einwilligung ist vollkommen freiwillig. Falls Sie nicht einwilligen oder Ihre Einwilligung später zurückziehen, entstehen Ihnen hieraus keine Nachteile.
- Ihr(e) Zahn/Zähne werden in anonymisierter Form, d.h. ohne die Angabe personenbezogener Daten aufbewahrt und verwendet.
- Es werden keine gendiagnostischen Untersuchungen vorgenommen.
- Bei allen wissenschaftlichen Projekten, die mit Hilfe extrahierter Zähne durchgeführt werden, erfolgt eine Begutachtung durch die zuständige Ethik-Kommission.

Herzlichen Dank für Ihre Unterstützung!

Hiermit erkläre ich mich mit der Verwendung meines/meiner extrahierten oder operativ entfernten Zahnes/Zähne für Lehr- und Forschungszwecke durch die Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie der Universitätsmedizin Göttingen einverstanden. Den dazugehörigen Informationsbogen zur Verwendung extrahierter Zähne habe ich gelesen. Wenn ich nicht zustimme, entstehen mir keine Nachteile. Ich kann jederzeit ohne Angabe von Gründen meine Zustimmung widerrufen. Mir ist bekannt, dass die Zähne anonymisiert (also ohne Hinweise zu meiner Person) gelagert werden. Damit ist später eine Rückgabe oder auf meinen Wunsch hin durchgeführte Vernichtung meiner persönlichen Zähne nicht mehr möglich.

Ort und Datum

Unterschrift Patient/-in

Danksagung

Zuallererst gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Michael Hülsmann für die Möglichkeit der Promotion und die Vergabe des Dissertationsthemas. Dabei möchte ich vor allem die fortwährende Unterstützung betonen, die mir sehr geholfen hat, diese Arbeit zu Papier zu bringen.

Weiterhin bedanke ich mich bei Monika Hoch für ihre zahlreichen Einfälle bezüglich des Versuchsaufbaus und der Methodik. Die Zusammenarbeit mit ihr hat mich im Rahmen der Durchführung der Versuche sehr weitergebracht.

Mein Dank gilt außerdem den Firmen SybronEndo, VDW, J. MORITA und Dentsply Maillefer für die Leihgabe der endometrischen Messgeräte.

Außerdem bedanke ich mich sehr bei meinen Eltern für ihre Unterstützung und beständiges Interesse an der vorliegenden Arbeit.