

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

In-vitro-Studie zur Präparation von Milchzahnwurzelkanälen mit unterschiedlichen Nickel-Titan- Systemen

INAUGURAL-DISSERTATION

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

vorgelegt von

Lea Marey Müller

aus

Hannover

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 2

Göttingen 2018

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

Betreuungsausschuss

Betreuer/in Prof. Dr. Michael Hülsmann.....

Ko-Betreuer/in: Prof. Dr. Ralf Bürgers.....

Prüfungskommission

Referent/in Prof. Dr. Michael Hülsmann.....

Ko-Referent/in: Prof. Dr. Ralf Bürgers.....

Drittreferent/in: Prof. Dr. Martin Oppermann.....

Datum der mündlichen Prüfung

13.11.2018.....

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel
**"In-vitro-Studie zur Präparation von Milchzahnwurzel-
kanälen mit unterschiedlichen Nickel-Titan-Systemen"**
eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir
angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den 31.10.2018

.....

(Unterschrift)

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 1

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
1 Einleitung	5
2 Literaturübersicht	7
2.1 Notwendigkeit endodontischer Maßnahmen im Milchgebiss	7
2.2 Auswirkungen infizierter Milchzähne auf die zweite Dentition	7
2.3 Möglichkeiten und Indikationen endodontischer Maßnahmen im Milchgebiss	8
2.3.1 Überkappung	8
2.3.2 Pulpotomie	9
2.3.3 Pulpektomie	10
2.4 Untersuchte Nickel-Titan-Systeme	22
2.4.1 Das Nickel-Titan-System Mtwo	22
2.4.2 Die Self-Adjusting-File (SAF)	24
2.5 Das Micro-CT	27
2.5.1 Anwendung	28
2.5.2 Verwendetes Micro-CT eXplore Locus SP	29
3 Ziel der Studie	30
4 Material und Methoden	31
4.1 Zugangskavität	31
4.2 Übungsphase und Vorversuche	31
4.3 Auswahl der Zähne und Gruppierung	31
4.4 Präoperativer Scan	33
4.5 Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge	34
4.6 Präparation	35
4.6.1 Präparation Gruppe SAF	35
4.6.2 Präparation Gruppe Mtwo	36
4.7 Postoperativer Scan	37
4.8 Verarbeitung und Auswertung der Datensätze	37
4.9 Statistische Auswertung	40
5 Ergebnisse	42
5.1 Präparationszeit	42
5.2 Bearbeitete Oberfläche	43
5.3 Volumenveränderung	44

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 2

5.4	Perforationen.....	45
5.5	Reproduzierbarkeit.....	47
6	Diskussion	48
6.1	Diskussion der Methode	48
6.1.1	Auswahl der Zähne und Gruppierung.....	48
6.1.2	Verwendung des Micro-CT.....	49
6.1.3	Wurzelkanalpräparation.....	50
6.1.4	Verarbeitung und Auswertung der Datensätze	52
6.2	Diskussion der Ergebnisse	53
6.2.1	Präparationszeit	53
6.2.2	Unbearbeitete Oberfläche	54
6.2.3	Volumenveränderung	57
6.2.4	Anzahl der Perforationen.....	58
6.3	Klinische Empfehlungen	58
7	Zusammenfassung.....	60
8	Literaturverzeichnis.....	62

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 3

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Feile Mtwo mit großem Spanraum und den sich windenden Schneiden.....	22
Abbildung 2: Netzstruktur der SAF	25
Abbildung 3: Aufbau CT	28
Abbildung 4: Matched pairs: 3 Paare untereinander angeordnet..	33
Abbildung 5: Zur Bestimmung der Arbeitslänge wurde ein Reamer der ISO-Größe 10 in den Kanal eingebracht. Die Länge wurde mit dem Stopper abgesteckt und notiert.....	35
Abbildung 6: Prä- und postoperatives Bild vor Überlagerung.....	38
Abbildung 7: Überlagerter Zustand vor dem Ausschneiden der Wurzelkanäle.	39
Abbildung 8: Komplexes Wurzelkanalsystem nach dem Freischneiden der Wurzelkanäle	40
Abbildung 9: Präparationszeit.....	43
Abbildung 10: Bearbeitete Oberfläche.....	44
Abbildung 11: Volumendifferenz.....	45
Abbildung 12: Darstellung einer Perforation	46
Abbildung 13: Perforation im interradiikulären Bereich. Die Oberflächen von Zahn und Wurzelkanalwand gehen ineinander über.	47
Abbildung 14: Mtwo im runden Kanal	54
Abbildung 15: Mtwo im ovalen Kanal.....	55
Abbildung 16: Komplexe Anatomie des Milchzahnwurzelkanalsystems.....	56
Abbildung 17: Präparierter Anteil und ursprünglicher Kanalverlauf. Die Arbeitslänge konnte nicht erreicht werden.....	57

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 4

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Studienübersicht zur Wurzelkanalpräparation im Milchgebiss	16
Tabelle 2: Minimal- und Maximalwerte sowie durchschnittlich benötigte Zeit für die Präparation	42
Tabelle 3: Minimal- und Maximalwerte sowie durchschnittlich bearbeitete Oberfläche	43
Tabelle 4: Minimal- und Maximalwerte sowie durchschnittliche Volumenveränderung.....	44
Tabelle 5: Reproduzierbarkeit: 10 randomisiert ausgewählte Präparate wurden ein zweites Mal ausgewertet	53

1 Einleitung

Zahnverlust geht immer mit Einschränkungen bezüglich Kaufunktion, Phonetik und Ästhetik des Patienten einher, durch endodontische Maßnahmen kann diesem Zahnverlust aber vorgebeugt werden. Nicht nur im bleibenden Gebiss stellt die Endodontie daher eine wichtige Therapiemöglichkeit dar, auch im Milchgebiss können Zähne durch endodontische Behandlungen erhalten werden.

Im Vergleich zum bleibenden Gebiss sind die Schmelz- und Dentinschicht im Milchgebiss dünner, sodass kariöse Läsionen schneller voranschreiten. Die erhöhte Permeabilität des Dentins führt zu einer raschen Ausbreitung entzündlicher Prozesse in die Pulpa (Weisshaar 2001). Außerdem ist die Pulpa mit Beginn der physiologischen Resorption in ihrer Reaktionsfähigkeit eingeschränkt, Tertiärdentin wird verlangsamt gebildet, wodurch eine Infektion des pulpalen Gewebes begünstigt wird (Hülsmann und Wiegand 2005), (Lenhard und Staehle 1996). Auf Grund dieser erhöhten Wahrscheinlichkeit einer Pulpabeteiligung bei kariösen Läsionen im Milchgebiss weisen 20-25% der Kinder mit Karies einen gesteigerten Behandlungsbedarf auf, darunter auch Wurzelkanalbehandlungen (Einwag 2005).

Die Extraktion des Milchzahnes stellt oftmals die Behandlungsalternative zur Wurzelkanalbehandlung bei Zähnen mit Pulpanekrose oder irreversibler Pulpitis dar. Folge einer Zahnextraktion im Milch- oder Wechselgebiss können Zahnwanderungen sein, welche später eine aufwändige kieferorthopädische Behandlung nötig werden lassen (Miyamoto et al. 1976). Der eigene Zahn kann auf Grund eingeschränkter Patientenkooperation in Bezug auf das Tragen eines Lückenhalters jedoch als besserer Platzhalter angesehen werden (Camp 1987).

Die Milchzahn Anatomie stellt dabei eine besondere Herausforderung für den Zahnarzt dar: in engen und ovalen Wurzelkanälen ist die vollständige Bearbeitung der Wurzelkanaloberfläche erschwert, in Wurzelkanälen mit dünnen Wänden besteht die Gefahr von Perforationen (Fumes et al. 2014).

Resorptionsprozesse an der Milchzahnwurzel beginnen bereits kurz nach dem natürlichen Zahndurchbruch (Camp 1987). Somit besteht die Gefahr von

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 6

Wurzelperforationen auf Grund der interradikulär beginnenden Resorption an Milchmolaren. Zusätzlich sind durch das fehlende apikale Foramen sowohl die Längenbestimmung als auch der Füllprozess erschwert.

Die mechanische Bearbeitung der Wurzelkanalwand ist von besonderer Wichtigkeit in Bezug auf die Elimination vorhandener Bakterien (Siqueira et al. 1999). Die Einführung von Nickel-Titan-Systemen in die Endodontie führte zu kürzeren Arbeitszeiten im Vergleich zur Präparation mit Handinstrumenten. Des Weiteren minimiert sich durch Verwendung der flexiblen Instrumente die Gefahr der Begradigung. Insgesamt ist die vorliegende Literatur zur Thematik der maschinellen Wurzelkanalpräparation in Milchzähnen aber nicht sehr umfangreich.

2 Literaturübersicht

2.1 Notwendigkeit endodontischer Maßnahmen im Milchgebiss

Vorzeitiger Milchzahnverlust spielt trotz der Fortschritte auf dem Gebiet der Kariesprävention nach wie vor eine wichtige Rolle in der heutigen Zeit (Ahmed 2013). Einer indischen Studie zufolge kann die Prävalenz hierfür bei 8-jährigen bis zu 5% betragen, wobei der untere erste Milchmolar am häufigsten betroffen ist (Ahamed et al. 2012). Insbesondere Milchmolaren stellen für das Wechselgebiss wichtige Platzhalter dar. Es wurde gezeigt, dass der frühzeitige Verlust von Milchmolaren signifikanten Einfluss auf die Entwicklung einer Malokklusion der 6-Jahr-Molaren besitzt (Miyamoto et al. 1976). Weitere Folgen frühzeitigen Verlustes der Milchzähne sind sagittaler Platzverlust durch Mesialisierung der 6-Jahr-Molaren und Zahnkippen, durch welche der Durchbruch des Nachfolgers verhindert wird. Bei Zahnverlust im Unterkiefer besteht die Gefahr der Vergrößerung des Overjets, von Unterlippeninterposition und Bissvertiefung, im Oberkiefer resultiert der Platzverlust aus einer Distalkippung der anterioren Zähne. Als Folgen können eine Klasse-II-Verzahnung oder eine Durchbruchsstörung des Eckzahns entstehen (Krämer 2012). Ein Lückenhalter sollte in diesem Falle zur Prävention der oben genannten Folgen eingesetzt werden. Als bester Lückenhalter ist jedoch der Zahn selber anzusehen, da angefertigte Lückenhalter ein hohes Maß an Compliance sowohl des Patienten als auch des Zahnarztes erfordern (Camp und Fuks 2006).

2.2 Auswirkungen infizierter Milchzähne auf die zweite Dentition

Bleibt ein kariöser Milchzahn unbehandelt, entstehen im Milchgebiss schnell Infektionen der Pulpa. Interradikulär sind durch die voranschreitende Infektion

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 8

über zahlreiche akzessorische Kanälchen auf dem Pulpakammerboden häufig Osteolysen zu beobachten.

Die Besonderheit im Milchgebiss besteht unter anderem darin, dass der Milchzahn eine sehr enge Lagebeziehung zu seinem Nachfolger besitzt. Dies führt dazu, dass entzündliche Noxen Sekundärerkrankungen hervorrufen können. Hierzu zählen die Entstehung von Zysten, Schmelzschädigungen, Formanomalien und Entwicklungsstörungen der Zähne der zweiten Dentition sowie die Ausbildung eines Turnerzahnes (Mason 2005). Hervorgerufen werden die Fehlbildungen durch die mechanische Reizung des Zahnsäckchens durch Druck von entstandenen Ödemen im periapikalen Bereich oder direkt durch Entzündungen des Zahnkeims (Pieper 2005).

In einer retrospektiven Studie aus dem Jahre 2016 wurden Prämolaren untersucht, deren Milchzahnvorgänger endodontisch (in Form einer Pulpektomie) behandelt wurden. Bei 6,8% der bleibenden Prämolaren konnten Schmelzdefekte erkannt werden, welche vermutlich aus vorangegangenen Entzündungen der Milchzähne resultieren (Stallaert et al. 2016).

2.3 Möglichkeiten und Indikationen endodontischer Maßnahmen im Milchgebiss

2.3.1 Überkappung

Die indirekte Überkappung dient der Therapie tiefer kariöser Läsionen an vitalen, symptomfreien und bakteriendicht restaurierbaren Zähnen. Hierbei wird die Karies peripher vollständig entfernt, zentral gelegenes kariöses Dentin sollte belassen werden, um eine Eröffnung der Pulpa zu vermeiden. Auf das infizierte Dentin wird ein Kalziumhydroxidpräparat aufgetragen und die Kavität im Anschluss dicht verschlossen. Die infizierten Dentinbereiche können auf diese Weise remineralisieren (Coll 2016). Ob die indirekte Pulpaüberkappung tatsächlich als klinisch erfolgsversprechend eingeschätzt werden kann, ist in der Literatur nicht einheitlich beschrieben (Smail-Faugeron et al. 2016).

Ein häufig in der Literatur beschriebenes „zweizeitiges“ Vorgehen, bei dem die Kavität erneut eröffnet und verbliebenes kariöses Dentin entfernt wird, ist nicht notwendig, da Kalziumhydroxid in Verbindung mit einer dichten koronalen

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 9

Restauration ein Voranschreiten der Karies verhindert (Mello et al. 2016). Die direkte Überkappung nach Pulpaexposition ist im Milchgebiss hingegen nicht indiziert, stattdessen sollte eine Pulpotomie durchgeführt werden (Coll 2016).

2.3.2 Pulpotomie

Als Pulpotomie oder auch Pulpaamputation bezeichnet man die Entfernung der Kronenpulpa. Das Verfahren dient der Vitalerhaltung des Zahnes. Hierbei kann zwischen einer partiellen und vollständigen Pulpotomie unterschieden werden.

2.3.2.1 Partielle Pulpotomie

Das Vorgehen bei einer partiellen Pulpotomie wurde erstmals 1978 von Cvek in einem klinischen Fallbericht beschrieben (Cvek 1978). Es wurde gezeigt, dass nach Abdecken der Pulpawunde mit einem Kalziumhydroxidpräparat eine Hartsubstanzbarriere entsteht (Cvek und Lundberg 1983). Die Methode führte auch bei kariösen Läsionen zu klinischem Erfolg (Mejare und Cvek 1993).

Die partielle Pulpotomie ist vor allem nach einem dentalen Trauma mit komplizierter Kronenfraktur indiziert. Es wurde nachgewiesen, dass die zur Mundhöhle exponierte Pulpa nach 7 Tagen keine inflammatorischen Reaktionen zeigt, welche tiefer als 2 mm in das vitale Gewebe hineinreichen. Der betroffene Zahn sollte mit Kofferdam isoliert werden. Im Anschluss wird mit einem hohtourigen Diamantschleifer unter Wasserkühlung das Pulpagewebe 2 mm tief an der Expositionsstelle entfernt. Mit NaOCl wird die Blutung gestillt und MTA oder Kalziumhydroxid als Wundverband aufgetragen. Abschließend sollte die Kavität durch eine bakteriendichte Restauration verschlossen werden (Nuni 2016).

2.3.2.2 Vollständige Pulpotomie

Wird im Milchgebiss während der Kariesexkavation die Pulpa punktförmig eröffnet oder ist auf Grund einer bis weit ins Dentin reichenden kariösen Läsion von einer partiellen Infektion der Pulpa auszugehen, ist eine vollständige Amputation der Kronenpulpa indiziert. Mit dem Ziel der Vitalerhaltung der radikulären Pulpa wird unter absoluter Trockenlegung mit einem hohtourig eingesetzten wassergekühlten Diamantschleifer die Kronenpulpa vollständig entfernt. Die aus den Kanaleingängen austretende leichte, hellrote Blutung sollte innerhalb von kurzer Zeit zum Stillstand gebracht werden können. Als

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 10

Verschluss der Amputationswunde eignen sich Kalziumhydroxid, Zinkoxid-Eugenol-Zemente oder Mineral Trioxide Aggregate (MTA) (Hülsmann und Wiegand 2005). Auf Grund der nachgewiesenen Mutagenität, Toxizität und Kanzerogenität gilt die Verwendung formokresol-, formaldehyd- oder glutaraldehydhaltiger Wundverbände heute als kontraindiziert (Kühnisch et al. 2011).

Auch nach einer Pulpotomie sollte der behandelte Zahn mit einer bakteriendichten Restauration versehen werden.

2.3.3 Pulpektomie

Als Pulpektomie bezeichnet man die vollständige Entfernung infizierten oder irreversibel entzündeten Gewebes aus dem Wurzelkanal (AAE 2015).

2.3.3.1 Ziele der Pulpektomie am Milchzahn

Folgende Ziele können für die Pulpektomie im Milchgebiss formuliert werden:

- Vermeidung einer vorzeitigen Extraktion des Milchzahnes
- Schmerzbeseitigung und Gewährleistung von Schmerzfreiheit
- Sicherung der Platzverhältnisse
- Erhalt von Kaufunktion und Ästhetik
- Vermeidung von Zahnkeimschäden
- Gewährleistung des regulären Zahndurchbruchs der zweiten Dentition (Viergutz 2003)
- Vermeidung von Zungenhabits, Erhalt der physiologischen Weichteilfunktionen (Mejäre 2015).

2.3.3.2 Indikationen zur Pulpektomie

Nur mit einer Mindestwurzellänge von 4 mm gilt ein Zahn als behandelbar (Camp und Fuks 2006). Es sollte präoperativ somit nicht nur der Resorptionsgrad, sondern auch die Gesamtlänge abgeschätzt werden. Bei der Indikationsstellung müssen des Weiteren individuelle Faktoren des Patienten berücksichtigt werden (Lenhard und Staehle 1996): Fehlt beispielsweise der folgende permanente Zahn auf Grund einer Nichtanlage, kann ein Zahnerhalt aus kieferorthopädischen Gründen nötig sein (Mejäre 2015).

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 11

Bei Freilegung der vitalen Pulpa auf Grund von Trauma oder Karies und Symptomen einer Pulpitis gilt eine Pulpektomie generell als indiziert (Lenhard und Staehle 1996).

Manche Autoren sehen auch bei Vorliegen einer Pulpanekrose eine Indikation zur Wurzelkanalbehandlung (Buerkle und Meissner 2010; Hülsmann und Wiegand 2005; Mason 2005; Viergutz 2003). Generell muss die Kooperationsbereitschaft des Patienten gegeben sein, da eine absolute Trockenlegung dringend erforderlich ist (Viergutz 2003).

Zwar stellen desolante Gebissituationen häufig eine Indikation zur Extraktion von Milchzähnen dar, Ausnahmen bilden jedoch Eckzähne und zweite Milchmolaren, welche bei der Gebissentwicklung eine entscheidende Rolle spielen (Viergutz 2003).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei vitaler exponierter oder irreversibel entzündeter Pulpa die Pulpektomie indiziert ist. Nicht indiziert ist sie bei Vorliegen von Fisteln, Abszessen, persistierenden Schmerzen, erhöhtem Lockerungsgrad, vorangeschrittener Resorption und schlechtem Immunstatus des Kindes (Mejäre 2015).

Nicht einheitlich bewertet wird die Indikationsstellung für eine Pulpektomie bei der Diagnose einer Pulpanekrose (Hülsmann und Wiegand 2005). Sevekar und Gowda sehen die Indikation zur Pulpektomie bei einer Pulpanekrose gegeben. Sie berichteten, dass weder die Vitalität noch ein zweizeitiges Vorgehen bei Durchführung einer Pulpektomie einen Einfluss auf das Auftreten von postoperativen Schmerzen und Flare-ups bei eintägiger, einwöchiger und einmonatiger Nachkontrolle haben (Sevekar und Gowda 2017).

2.3.3.3 Kontraindikationen zur Pulpektomie

Dennoch sind dem Zahnerhalt im Milchgebiss Grenzen gesetzt. Es existieren in der Literatur unterschiedliche Empfehlungen bezüglich der Kontraindikationen einer Milchzahnpulpektomie. Mejare benennt folgende Situationen als Kontraindikation:

- Pulpanekrose,
- Schwellungen,
- Fistel oder Abszess eines Milchzahnes;
- nicht restaurierbare Zähne

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 12

- Zähne mit weniger als zwei Drittel vorhandener Wurzellänge (Mejäre 2015).

Nach Viergutz sprechen auch ausgedehnte interne Resorptionen, periapikale und interradiikuläre Entzündungsprozesse gegen eine endodontische Therapie (Viergutz 2003). Als Kontraindikationen gelten auch ein erhöhter Lockerungsgrad des Zahnes, ein stark vernachlässigtes Gebiss und schwere Allgemeinerkrankungen des Patienten (Lenhard und Staehle 1996). Als weitere Kontraindikationen werden aufgeführt: nicht restaurierbare Zähne, interne Resorptionen, Zähne mit perforiertem Pulpakammerboden, Zähne mit zu mehr als einem Drittel resorbierter Wurzellänge, Verlust von Attachment durch Knochenosteolysen, das Vorliegen odontogener Zysten oder das Auftreten einer interradiikulären Läsion mit Beteiligung des permanenten Nachfolgers (Camp und Fuks 2006).

2.3.3.4 Durchführung einer Pulpektomie im Milchgebiss

2.3.3.4.1 Präoperative Diagnostik

Die Indikation für eine Pulpektomie zu stellen, ist nicht nur auf Grund der teilweise unklaren Richtlinien schwierig. Die Diagnostik im Milchgebiss ist häufig erschwert, die Durchführung des Sensibilitätstests führt nicht selten zu keinem aussagekräftigen Ergebnis. Auch die Schmerzanamnese ist nicht immer zuverlässig, da Schmerzzustände verschwiegen werden, um eine Behandlung zu umgehen (Hülsmann und Wiegand 2005). Bei der klinischen Inspektion kann ein Fistelgang oder ein Abszess Indiz für eine Pulpanekrose sein. Die präoperative röntgenologische Diagnostik ist ebenfalls entscheidend.

Wird an einem Zahn eine Pulpotomie durchgeführt, während der die Blutung nicht adäquat gestillt werden kann, liegt eine irreversible Pulpitis vor und anstelle der Pulpotomie sollte einer Pulpektomie mit Entfernung der gesamten entzündeten Pulpa der Vorzug gegeben werden. Klinische Zeichen der irreversiblen Pulpitis sind persistierende Schmerzen, vor allem Nachtschmerz, dunkelrote diffuse Blutung der eröffneten Pulpa, Zahnmobilität und Perkussionsschmerzen (Mejäre 2015).

2.3.3.4.2 Vorbereitende Maßnahmen

Nach der Anästhesie des Zahnes sollte die Isolation mit Kofferdam erfolgen.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 13

2.3.3.4.3 Bestimmung der Arbeitslänge

Auch im Milchgebiss kann eine elektrische Bestimmung der Arbeitslänge durchgeführt werden. Hierbei können mit einer Toleranz von 1 mm bis zu 94 % genaue Ergebnisse erzielt werden (Beltrame et al. 2011). Tendenziell fällt die bestimmte Arbeitslänge eher etwas zu kurz als zu lang aus. Nach der elektrischen Längenbestimmung sollte eine Röntgenmessaufnahme zur Sicherung der Werte angefertigt werden (Hülsmann und Wiegand 2005). Die Arbeitslänge sollte idealerweise 1-2 mm vor dem röntgenologischen Apex enden (Kühnisch et al. 2011).

2.3.3.4.4 Wurzelkanalpräparation

Das primäre Ziel der Wurzelkanalpräparation im Milchgebiss liegt in der Entfernung infizierten Dentins der Wurzelkanalwand. Da die spätere Wurzelkanalfüllung mit einer resorbierbaren Paste durchgeführt werden muss, ist die Formgebung bei der Wurzelkanalpräparation im Milchgebiss im Gegensatz zur Endodontie im bleibenden Gebiss nicht entscheidend (Koshy und Love 2004).

2.3.3.4.5 Maschinelle und manuelle Präparation an Milchzähnen

Der Vorteil bei der Präparation mit Nickel-Titan (NiTi)-Instrumenten liegt zum einen in der Zeitersparnis gegenüber der Präparation mit Handinstrumenten, außerdem sind diese Instrumente in der Lage, auch bei stark gekrümmten Kanalanatomien die ursprüngliche Form beizubehalten (Schäfer et al. 2006). Gerade in der Kinderzahnheilkunde stellen die kürzeren Arbeitszeiten der Nickel-Titan-Instrumente auf Grund der geringeren Konzentrationsfähigkeit der kleinen Patienten einen entscheidenden Vorteil dar (Crespo et al. 2008). Die erste wissenschaftliche Publikation zum Thema NiTi-Instrumente bei Milchzähnen stammt aus dem Jahr 1999. In dieser propagierten Barr et al. die Verwendung von Nickel-Titan-Systemen im Milchgebiss, da sie kostengünstiger und zeiteffizienter sei (Barr et al. 1999).

Mehrere Studien befassen sich mit der Reinigungsleistung von Nickel-Titan-Feilen im Vergleich zu Handfeilen aus Stahl. Hierzu wurde ein Farbstoff in das Wurzelkanalsystem eingebracht und dieses im Anschluss mit den zu testenden Feilensystemen bearbeitet. Der verbliebene Farbstoff wurde mit Hilfe eines

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 14

Scores unter dem OP-Mikroskop evaluiert. Mehrere Nickel-Titan-Systeme wurden mit Handfeilen verglichen, u. a. Mtwo (Azar und Mokhtare 2011), ProTaper (Azar et al. 2012), ProFile (Madan et al. 2011), FlexMaster (Nazari Moghaddam et al. 2009), Reciproc (Ramazani et al. 2016) und Wave One (Katge et al. 2014). Lediglich Wave One konnte im koronalen Anteil des Wurzelkanals signifikant mehr Farbstoff entfernen. Ansonsten konnte sowohl im Vergleich von Nickel-Titan-Systemen untereinander als auch mit Handinstrumenten kein Unterschied in der Reinigungsleistung festgestellt werden. In weiteren In-vitro-Studien wurde die Reduktion von *E. faecalis* getestet. Auch hier waren Nickel-Titan-Feilen den Handinstrumenten nicht überlegen.

Bezüglich der Formgebung konnten mit Nickel-Titan-Instrumenten bessere Konizitäten erreicht werden. Crespo et al. nahmen 2008 von ihren präparierten Zähnen Silikonabformungen und verglichen die so entstandenen Taper zwischen dem Nickel-Titan-System ProFile und Handfeilen. Die mit ProFile bearbeiteten Zähne zeigten eine bessere Konizität und Form des Wurzelkanals (Crespo et al. 2008).

Kummer et al. ermittelten 2008 einen geringeren Dentinabtrag bei Präparation mit rotierenden Instrumenten (Hero 642) gegenüber Handfeilen (Kummer et al. 2008).

Das Nickel-Titan-System Mtwo wurde in 6 Studien überprüft. Bezüglich der Reinigungswirkung war es Handfeilen nicht überlegen (Azar und Mokhtare 2011; Azar et al. 2012). In weiteren Studien wurde der apikal überpresste Debris bei Präparation mit unterschiedlichen Nickel-Titan-Systemen ermittelt. Es ergaben sich dabei keine signifikanten Unterschiede. Eine Studie zur Wurzelkanalpräparation mit Mtwo im Milchgebiss mit Hilfe des Micro-CT wurde bislang nicht durchgeführt. Mtwo wurde jedoch in Bezug auf seine Formgebung mit Reciproc und Handinstrumenten verglichen. Die Auswertung fand anhand von dreidimensionalen Bildern durch ein DVT statt. Mtwo und Reciproc erzielten hierbei signifikant bessere Konizitäten des Wurzelkanals bei wenig Verlagerung der ursprünglichen Kanal Anatomie (Ramazani et al. 2016). Einig sind sich sämtliche Autoren, dass eine Präparation mit Mtwo gegenüber der Präparation

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 15
mit Handinstrumenten Zeitersparnis bedeutet (Azar et al. 2012; Govindaraju et al. 2017; Ramazani et al. 2016; Ramezani et al. 2015).

Es liegt eine Micro-CT-Studie zur Bewertung der SAF im Milchgebiss vor. Kaya et al. verglichen die SAF mit ProFile-Instrumenten sowie mit Handfeilen. Hierfür teilten sie 60 Milchmolaren auf 3 Gruppen auf, die jeweils einer Feile zugeordnet wurden. Die Präparation mit der Handfeile erfolgte bis zu einer ISO-Größe von 40, die Präparation mit der ProFile bis zur Größe .04/30. Die Präparationszeit wurde hierbei vom Zeitpunkt der Aufnahme der ersten Feile bis zur Beendigung des Präparationsvorganges gemessen. Für die Wurzelkanalpräparation mit der SAF wurde zunächst mit Handinstrumenten ein Gleitpfad der ISO Größe 20 geschaffen. Es erfolgte eine 4-minütige Präparation unter kontinuierlicher Spülung. Lediglich die distalen Kanäle wurden ausgewertet. Es ergab sich eine signifikant längere Präparationszeit für die Handfeile gegenüber SAF und ProFile, zwischen denen wiederum kein signifikanter Unterschied vorlag. In Bezug auf das abgetragene Volumen konnte anhand des Micro-CT ein mittlerer Substanzabtrag von 183,4 mm³ gemessen werden, welches einem Abtrag von 40,6% des vorherigen Gesamtvolumens entspricht. Der Substanzabtrag ist signifikant höher als jener der ProFile, welche im Mittel 97,8 mm³ abtrug (entsprechend 14,7% des zuvor ermittelten Gesamtvolumens). Die SAF konnte wiederum signifikant weniger Dentin abtragen als ProFile-Instrumente. Im Durchschnitt waren es hier 31,4 mm³, was 5% des präoperativen Gesamtvolumens entspricht (Kaya et al. 2017).

Trotz teilweise überlegener Eigenschaften von Nickel-Titan-Systemen ziehen Yanko et al. in einem Review das Fazit, dass eine Empfehlung zur Verwendung von Nickel-Titan-Feilen im Milchgebiss nicht gegeben werden kann. Begründet wird dieses Fazit durch die Tatsache, dass vorhandene Studien lediglich eine sehr geringe Evidenz aufweisen (Yanko et al. 2016) (siehe Studienübersicht Tabelle 1).

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
 Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 16

Autor	Jahr	Systeme	Methodik	Ergebnis
(Silva et al.)	2004	ProFile .04 Handfeile	1) zuvor eingefärbte Kanäle wurden nach Präparation unter dem OP-Mikroskop anhand eines Scores auf Sauberkeit bewertet 2) Zeit	1) keine signifikanten Unterschiede 2) signifikant kürzere Präparationszeit für ProFile
(Canoglu et al. 2006)	2006	ProFile .04 Handfeile Ultraschall	röntgenologische Auswertung distaler WK in UK-Molaren auf Dentinabtrag	kein Unterschied zwischen den drei Präparationstechniken
(Nagaratna et al. 2006).	2006	ProFile .04 Handfeile	Präparationszeit	signifikant kürzere Präparationszeit für ProFile
(Crespo et al.)	2008	ProFile .04 Handfeile	Präparationszeit	signifikant kürzere Präparationszeit für ProFile
(Kummer et al.)	2008	Hero 642 Handfeile	1) Auswertung anhand digitaler Fotografien mit Photoshop auf Dentinabtrag 2) Präparationszeit 3) Anzahl Perforationen	1) Präparation mit Handfeilen sorgt für mehr Substanzabtrag koronal und mittig 2) signifikant kürzere Präparationszeit bei Hero 642 3) kein sign. Unterschied bei Anzahl der Perforationen (z.T. 25%)
(Nazari Moghaddam et al.)	2009	FlexMaster Handfeilen	zuvor eingefärbte Kanäle wurden nach Präparation unter dem OP-Mikroskops anhand eines Scores auf Sauberkeit bewertet	keine sign. Unterschiede
(Azar et al.)	2011	Mtwo Handfeile	1) zuvor eingefärbte Kanäle wurden nach Präparation unter dem OP-Mikroskops anhand eines Scores auf Sauberkeit bewertet 2) Präparationszeit	1) keine signifikanten Unterschiede 2) signifikant kürzere Präparationszeit für Mtwo

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
 Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 17

(Madan et al.)	2011	ProFile .04 Handfeile	zuvor eingefärbte Kanäle wurden nach Präparation unter dem OP-Mikroskop anhand eines Scores auf Sauberkeit bewertet	ProFile koronal effizienter, während Handfeile apikal besser reinigt
(Ochoa-Romero et al. 2011).	2011	Nickel-Titan-Feile Handfeile	Präparationszeit am Patienten	Ni-Ti Instrumente benötigten im Schnitt nur 63 % der Handpräparationszeit
(Azar et al.)	2012	Mtwo ProTaper Handfeile	zuvor eingefärbte Kanäle wurden nach Präparation unter dem OP-Mikroskop anhand eines Scores auf Sauberkeit bewertet	ProTaper koronal und mittig sign. besser, sonst keine Unterschiede
(Pinheiro et al. 2012).	2012	ProTaper Handfeile Hybridtechnik = Hand und ProTaper im Wechsel	Präparationszeit	Hybridtechnik sign. langsamer kein Unterschied zwischen Hand und ProTaper
(Katge et al.)	2014	ProTaper Handfeile WaveOne	zuvor eingefärbte Kanäle wurden nach Präparation unter dem OP-Mikroskop anhand eines Scores auf Sauberkeit bewertet	WaveOne koronal und mittig am effizientesten apikal keine sign. Unterschiede zwischen den Systemen
(Makarem et al. 2014)	2014	FlexMaster Handfeile	Präparationszeit am Patienten	signifikant kürzere Präparationszeit für FlexMaster
(Musale und Mujawar).	2014	ProFile .04 ProTaper Universal Handfeile	1) zuvor eingefärbte Kanäle wurden nach Präparation unter dem OP-Mikroskop anhand eines Scores auf Sauberkeit bewertet 2) Präparationszeit	1) bessere Reinigung der Ni-Ti-Instrumente gegenüber der Handpräparation keine Unterschiede innerhalb der Ni-Ti-Systeme 2) sign. kürzere Präparationszeit der NiT-Instrumente
(Ramezanali et al.)	2015	Mtwo Handfeile	1) zuvor eingefärbte Kanäle wurden nach Präparation unter dem OP-Mikroskop anhand eines Scores auf Sauberkeit bewertet 2) Präparationszeit	1) kein signifikanter Unterschied 2) sign. kürzere Präparationszeit für Mtwo

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
 Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 18

(Poornima et al. 2016)	2016	Mtwo Handfeile	Auswertung mit Hilfe des Spiral-CT, Wurzelkanäle wurden vor und nach Präparation mit röntgenopaker Paste gefüllt und das Volumen berechnet	signifikant höhere Volumenzunahme bei der Präparation mit Mtwo
(Prabhakar et al. 2016).	2016	WaveOne OneShape	1) Ausmessen der Dentindicke an DVT-Bildern 2) Präparationszeit	1) keine signifikanten Unterschiede 2) signifikant kürzere Präparationszeit für WaveOne
(Ramazani et al.)	2016	Mtwo Handfeile Reciproc	1) zuvor eingefärbte Kanäle wurden nach Präparation unter dem OP-Mikroskop anhand eines Scores auf Sauberkeit bewertet 2) Präparationszeit	1) koronal: Mtwo+Reciproc effizienter als Handfeile mittig: nur Reciproc effizienter als Handinstrumente apikal: keine signifikanten Unterschiede 2) Reciproc am schnellsten, gefolgt von Mtwo. Handfeile am langsamsten. Alle Daten signifikant zueinander
(Govindaraju et al.)	2017	ProTaper Handfeile Mtwo	Präparationszeit	signifikant kürzere Präparationszeit der Nickel-Titan-Instrumente
(Kaya et al.)	2017	ProFile .04 SAF Handfeile	1) Messung des Substanzabtrages mit Micro-CT 2) Präparationszeit	1) signifikant geringster Substanzabtrag bei SAF. Signifikant geringerer Substanzabtrag ProFile gegenüber Handfeile 2) signifikant kürzere Präparationszeit für ProFile und SAF gegenüber Handinstrumenten

Tabelle 1: Studienübersicht zur Wurzelkanalpräparation im Milchgebiss

2.3.3.4.6 Größe der Präparation

In der Literatur lässt sich keine klare Empfehlung bezüglich der anzustrebenden Präparationsgröße von Milchzahnwurzelkanälen finden. Lenhard und Staehle empfehlen, die Präparation mit Handinstrumenten auf Grund der erhöhten Perforationsgefahr bis zur ISO-Größe 30-35 zu limitieren (Lenhard und Staehle 1996).

In weiteren Lehrbüchern wird geraten, die ISO Größe 30 niemals zu überschreiten (Mason 2005) beziehungsweise komplett auf eine mechanische

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 19

Bearbeitung der Wurzelkanalwand zu verzichten (Viergutz 2003). In einer klinischen Richtlinie zur Durchführung der Pulpektomie ist ebenfalls die ISO-Größe 30 als Richtwert genannt (Llewelyn 2000). In der offiziellen Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kinderzahnheilkunde heißt es, dass der Zutritt der Spülflüssigkeit zum Apex gewährleistet werden müsse, der mechanischen Bearbeitung der Wurzelkanalwand auf Grund der geringen Wanddicke jedoch eine untergeordnete Rolle zukomme (Kühnisch et al. 2011). Genaue Empfehlungen im Sinne von Größenangaben sind der Stellungnahme jedoch nicht zu entnehmen, es liegen nur wenige experimentelle und keine klinischen Studien zur Ermittlung der optimalen Präparationsgröße vor.

Rocha und Cardoso schlagen die Präparation bis ISO 40 vor (Rocha und Cardoso 2004), teilweise wird in Studien sogar bis zur ISO-Größe 50 präpariert (Silva et al. 2004).

Kummer et al. kamen zu dem Resultat, dass der Milchzahn genug Substanz für die Präparation bis zur ISO-Größe 40 bietet, sofern die Resorption nicht weit fortgeschritten ist (Kummer et al. 2008). Da der Resorptionsprozess bereits kurz nach dem Zahndurchbruch beginnt und sich sein Ausmaß klinisch nur unzureichend feststellen lässt, ist diese Empfehlung klinisch schlecht umzusetzen (Camp und Fuks 2006). Dementsprechend traten in der In-Vitro-Studie von Kummer et al. Perforationen in bis zu 25% der bearbeiteten Zähne auf.

2.3.3.4.7 Chemische Wurzelkanaldesinfektion

Auf Grund der zahlreichen akzessorischen Kanäle im Milchzahn-wurzelkanalsystem, welche mechanisch nicht bearbeitet werden können, hängt der Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung maßgeblich von der chemischen Desinfektion ab (Harini Priya et al. 2010). Wegen der gewebeauflösenden Wirkung hat sich auch in der Milchzahnendodontie Natriumhypochlorit (NaOCl) als geeignetes Desinfektionsmittel etabliert (Camp und Fuks 2006). Nach den Richtlinien der American Association of Pediatric Dentistry soll die Konzentration von NaOCl in der Kinderzahnheilkunde 1% nicht überschreiten (AAPD 2014). Des Weiteren sollte darauf geachtet werden, die Flüssigkeit nicht über den Apex hinaus zu pressen (Ahmed 2013; Moskovitz und Tickotsky 2016). Aus diesem Grund wird das Einhalten eines Sicherheitsabstandes der

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.20

Spülnadel bei der Desinfektion mit Natriumhypochlorit von 2-3 mm zum Apex empfohlen (Hülsmann und Wiegand 2005). Eine Abschlussspülung mit 6%iger Zitronensäure nach Verwendung von NaOCl beschädigt das Wurzelkaries nicht, stattdessen kann ein besserer klinischer Erfolg erzielt werden (Ahmed 2013).

Als Alternative zu NaOCl wird Chlorhexidindigluconat (CHX) in 0,2 - 2%iger Lösung empfohlen (Ahmed 2013; Louwakul und Prucksathamrongkul 2012; Ruiz-Esparza et al. 2011). Allerdings sollte es auf Grund der hohen Viskosität nicht in Gel-Form eingesetzt werden (Pascon et al. 2007).

Zwar werden in der Literatur auch andere Spüllösungen diskutiert und verwendet (Farhin et al. 2015; Moskovitz et al. 2005; Pinky et al. 2011; Stallaert et al. 2016), es liegen hierfür allerdings keine evidenz-basierten Studien vor, die einen Erfolg belegen könnten (Moskovitz und Tickotsky 2016).

2.3.3.4.8 Wurzelkanalfüllung

Das Material für die Wurzelkanalfüllung im Milchgebiss muss hohen Anforderungen entsprechen: So sollte es einfach einzubringen sein, zeitgleich mit der Milchzahnwurzel resorbiert werden, radiopak sein, sich gut an die Wurzelkanalwand adaptieren, biokompatibel sein, aber gleichzeitig antiseptische Eigenschaften aufweisen (Pramila et al. 2016). Die im bleibenden Gebiss standardmäßig eingesetzte Guttapercha ist im Milchgebiss kontraindiziert, da sie nicht resorbierbar ist. Stattdessen können Kalziumhydroxidpräparate, Zinkoxid-Eugenol oder Iodoform zum Einsatz kommen (Hülsmann und Wiegand 2005). Kalziumhydroxid als alleiniges Wurzelfüllmaterial wird zunehmend kritisch beurteilt, da es sehr schnell resorbiert und auch mit internen Resorptionen in Zusammenhang gebracht wird, welche für einen therapeutischen Misserfolg sorgen (Sonmez und Duruturk 2008).

In einer klinischen Studie zum Vergleich von Zinkoxid-Eugenol mit Iodoform (RC Fill, Prime Dental products, Maharashtra, India) mit einer Kalziumhydroxid-Iodoform-Paste (Vitapex, Neo dental, Federal Way, USA) und dem Pulpdent Root Canal Sealer (Pulp dent, Watertown, USA) konnte nach 30 Monaten kein signifikanter Unterschied im Hinblick auf den klinischen Erfolg festgestellt werden (Pramila et al. 2016). Zu dem gleichen Ergebnis kamen Al-Ostwani et

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 21

al., die Metapex (Meta Biomed, Pennsylvania, USA) mit reinem Zinkoxid-Eugenol und einem Gemisch aus Zinkoxid-Eugenol mit Kalziumhydroxid und Iodoform (Endoflas, Sanlor Laboratories, Miami, USA) verglichen (Al-Ostwani et al. 2016). Chen et al. hingegen beschrieben Zinkoxid-Eugenol als signifikant besseres Wurzelfüllmaterial gegenüber Vitapex (Chen et al. 2015). Ramar und Mungara empfehlen Endoflas mit einer klinischen Erfolgsrate von 95,1% nach 9 Monaten Kontrollzeit als signifikant besseres Wurzelfüllmaterial gegenüber RC Fill und Metapex (Ramar und Mungara 2010). Dieses Ergebnis konnte 2014 in einer weiteren klinischen Studie zur Wurzelkanalfüllung an Milchzähnen bestätigt werden (Rewal et al. 2014).

2.3.3.4.9 Erfolgsrate der Pulpektomie

Die Erfolgsrate von Pulpektomien liegt bei 75-96%. Als Erfolgskriterien gelten der Verbleib des Zahnes in der Mundhöhle ohne Einschränkung der Funktion oder das Auftreten von Schmerzen (Camp und Fuks 2006). Die oben genannte Rate konnte in einer retrospektiven Studie aus Toronto bestätigt werden. Bei 211 behandelten Zähnen mit einer Mindestbeobachtungszeit von 6 Monaten konnte bei 90 % ein klinischer Erfolg verzeichnet werden. Als röntgenologisch erfolgreich bezeichnet wurden 77,3 % der untersuchten Zähne (Stallaert et al. 2016).

In einer Studie aus dem Jahre 1993 wurden 78 nekrotische Milchmolaren einer Wurzelkanalbehandlung unterzogen. Die Zähne wurden bis zu 48 Monate nachkontrolliert und es konnte eine Erfolgsrate von 84% erzielt werden (Holan und Fuks 1993). Bawazir und Salama beschrieben 6 Monate nach Single-visit-Pulpektomie und Wurzelkanalfüllung mit Zinkoxid-Eugenolpaste eine Erfolgsrate von 96%. Auch diese Zähne waren nekrotisch (Bawazir und Salama 2006). In einer indischen Studie wurden 129 Milchmolaren mit Pulpanekrose oder irreversibler Pulpitis pulpektomiert. Die Studie sollte drei unterschiedliche Wurzelfüllpasten testen. In allen drei Gruppen konnten nach 30 Monaten Erfolgsraten von über 90% erzielt werden (Pramila et al. 2016). Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Ramar und Mungara (Ramar und Mungara 2010). Moskovitz et al. schlossen in ihre Studie auch Zähne mit apikalen Läsionen ein. Von insgesamt 242 untersuchten Zähnen zeigten nur 8 einen Misserfolg in Form einer Radioluzenz (Moskovitz et al. 2010).

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.22

In einer retrospektiven Studie, in welche 161 Patienten mit 211 Zähnen eingeschlossen wurden, konnte eine klinische Erfolgsrate von 90 % und eine röntgenologische Erfolgsrate von 77,3 % erzielt werden (Stallaert et al. 2016)

2.4 Untersuchte Nickel-Titan-Systeme

2.4.1 Das Nickel-Titan-System Mtwo

Das Mehr-Feilen-System Mtwo (VDW, München) ist aus einer Nickel-Titan-Legierung gefertigt und verfügt über einen S-förmigen Querschnitt und zwei sich zirkulär um das Instrument windende Schneiden, welche für einen effizienten Dentinabtrag sorgen. Die Anzahl der Ringe am Schaft gibt Auskunft über den Taper des Instruments (Taper .04 bis .07 mit aufsteigender Anzahl der Ringe). Das Instrument wird in den Längen 21, 25 und 31 mm angeboten. Die Basissequenz besteht aus den folgenden Instrumenten: 10/.04 - 15/.05 - 20/.06 - 25/.06. Für größere Kanalanatomien wird außerdem die Feile 30/.05 angeboten.



Abbildung 1: Feile Mtwo mit großem Spanraum und den sich windenden Schneiden

Nach Herstellerangaben bietet das Mtwo-System folgende Vorteile:

- Schnelle Präparation durch wenige Instrumente
- Konische Formgebung und dadurch effektive Spülung
- Keine Anhäufung von Dentinspänen
- Kein Verklemmen der Instrumente
- Hohe Flexibilität

Mtwo wird in der Single-Length-Technik angewendet (Schäfer et al. 2006). Jedes Instrument wird unter bürstenden Bewegungen bis zum Erreichen der

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 23

Arbeitslänge in den Wurzelkanal eingebracht (simultaneous shaping). Die vorherige Präparation eines Gleitpfades ist nicht notwendig (Uroz-Torres et al. 2009). Nach der Präparation von Wurzelkanälen mit kleinen oder mittleren Krümmungen empfiehlt VDW ein Verwerfen des Instruments nach 4maliger Benutzung.

Mtwo arbeitet in einem Drehzahlbereich zwischen 250 und 350 rpm. Beim VDW Motor VDW.SILVER®RECIPROC (VDW, München) kann der Modus „Mtwo“ direkt ausgewählt werden. Hier ist die Drehzahl automatisch auf 280 rpm eingestellt. Eine Drehmomentbegrenzung schützt vor mechanischer Überbelastung der Instrumente und somit vor verhinderbaren Frakturen.

2.4.1.1 Bewertung von Mtwo in der Literatur

In der Literatur finden sich zahlreiche Studien, welche sich mit der Reinigungsleistung, Formgebung, dem nötigen Zeitaufwand und der Frakturrate von Mtwo im Vergleich zu anderen Nickel-Titan-Instrumenten bei der Wurzelkanalpräparation im bleibenden Gebiss beschäftigen.

Schäfer et al. verglichen 2006 die Nickel-Titan-Systeme K3, RaCe und Mtwo miteinander, indem digitale Fotos des Zahnquerschnitts übereinandergelegt wurden. Somit konnte ermittelt werden, ob der Verlauf des Wurzelkanals verändert wurde. Zusätzlich wurde die Arbeitszeit gemessen. Die Präparation mit Mtwo nahm dabei weniger Zeit in Anspruch und veränderte die ursprüngliche Wurzelkanalanatomie am wenigsten (Schäfer et al. 2006). Mit einem ähnlichen Versuchsaufbau verglichen Rubio et al. die Systeme Mtwo, F360, RaCe und Hyflex. Durch Übereinanderlegen digitaler Fotos wurde der Anteil unpräparierter Oberfläche bestimmt. Dabei konnten zwischen den Systemen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die benötigte Arbeitszeit war bei RaCe und F360 im Vergleich zu Mtwo geringer (Rubio et al. 2015).

Es wurden einige In-Vitro-Studien mit Hilfe des Micro-CT durchgeführt. Shivashankar et al. sowie Vallaes et al. fertigten 3D-Scans vor und nach Präparation an und verglichen im Anschluss die Verlagerung der Wurzelkanalanatomie nach der Methode von Gambill (Gambill et al. 1996). Shivashankar et al. konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Systemen ProTaper, ProTaper Next und Mtwo feststellen. Zu demselben

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 24

Ergebnis kamen Vallaeyts et al., als sie Mtwo mit Revo-S und ProTaper verglichen (Shivashankar et al. 2016; Vallaeyts et al. 2016).

Sant'Anna Junior et al. fanden ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen Reciproc und Mtwo in Bezug auf die apikale Präparation. Die Volumenveränderung apikal und die verbliebene Dentinstärke waren nahezu identisch (Sant'Anna Junior et al. 2014).

Zwei Micro-CT-Studien befassen sich mit dem Anteil unbearbeiteter Oberfläche der Wurzelkanalwand. ElAyouti et al. führten eine Studie mit den Nickel-Titan-Systemen ProTaper und Mtwo sowie Handinstrumenten aus Stahl durch. An einem Bild des axialen Querschnitts wurde durch Überlagerung der prä- und postoperativen Scans der Anteil unbearbeiteter Oberfläche ermittelt. Hierbei ließ sich kein signifikanter Unterschied feststellen (ElAyouti et al. 2011)

Ebenfalls im Jahre 2011 kamen Yang et al. zu dem Ergebnis, dass sowohl ProTaper Universal als auch Mtwo keine Begradigung des Wurzelkanals bei Präparation gekrümmter Kanal anatomien hervorrufen. Sie fanden einen signifikanten Unterschied im apikalen Anteil, wo Mtwo für mehr Verlagerung des Wurzelkanals sorgte. In der Mitte und koronal konnte dies jedoch nicht mehr nachgewiesen werden. Im Schnitt blieben in beiden Versuchsgruppen 35-42% der Wurzelkanalwand unbearbeitet (Yang et al. 2011).

Eine vergleichende Studie von Mtwo und SAF, welche sich auf die Formgebung und die nicht bearbeitete Oberfläche des Wurzelkanals bezieht, liegt derzeit noch nicht vor.

2.4.2 Die Self-Adjusting-File (SAF)

Die Self-Adjusting-File (SAF) besteht aus einem zylindrischen Nickel-Titan-Gitter. Der durch die Gitterform entstehende Hohlraum wird zur Flüssigkeitszufuhr in den Wurzelkanal genutzt und gewährleistet eine kontinuierliche Spülung während der Bearbeitung der Wurzelkanalwand mit damit verbundenem Abtransport der Dentinspäne (siehe Abb. 1). Außerdem ist die Feile auf Grund ihrer Konstruktion komprimierbar. Der für Nickel-Titan-Instrumente typische „*shape memory effect*“ (Kuhn und Jordan 2002) sorgt für eine radiale Ausweitung des Präparationsinstrumentes und damit leichten

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.25

Druck auf die Wurzelkanalwand mit resultierender mechanischer Bearbeitung durch die sandgestrahlte Oberfläche der SAF. Die hohe Flexibilität ermöglicht eine gute Respektierung der Wurzelkanalanatomie und den Erhalt gesunden Dentins (Metzger 2014). Aus diesem Grund ist das System auch für die Präparation ovaler Wurzelkanäle geeignet (Hof et al. 2010).



Abbildung 2: Netzstruktur der SAF

Die SAF ist in 2 Größen und 3 Längen erhältlich. Mit dem Durchmesser von 1,5 mm wird sie in 21, 25 und 31 mm Länge angeboten. Die Längen 21 und 25 mm werden zusätzlich mit 2,0 mm Durchmesser angeboten.

Vor Benutzung ist das Herstellen eines Gleitpfades der ISO-Größe 20 notwendig. Die SAF arbeitet mit dem speziell für sie konstruierten Winkelstück RDT3 (ReDentNOVA, Ra'anana, Israel). Dieses generiert bei einer Umdrehungszahl von 5000 rpm eine Hubbewegung von 0,4 mm. Eine Vorrichtung am Winkelstück ermöglicht den Anschluss der Spülschläuche.

Im Anschluss wird die SAF-Feile ohne Druck in den Wurzelkanal eingebracht. Durch leichte Auf- und Abbewegungen wird die Arbeitslänge erreicht. Es erfolgt eine 4minütige Präparation im bleibenden Gebiss, im Milchgebiss genügen 3 Minuten unter kontinuierlicher chemischer Desinfektion des Wurzelkanals mit einer Fließrate von 4 ml/min. Ein Wechsel des Instrumentes ist währenddessen nicht nötig.

2.4.2.1 Bewertung SAF in der Literatur

Seit die SAF 2010 auf den Markt kam, wurden zahlreiche Studien bezüglich ihrer Frakturgefahr, dem Verursachen von Rissen im Dentin, ihrer Reinigungsleistung, Formgebung bei Präparation des Wurzelkanals und Fähigkeit zur Entfernung von Guttapercha aus dem Wurzelkanalsystem

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 26
durchgeführt. Die SAF wurde jedoch nicht nur mit anderen Nickel-Titan-Systemen in Bezug auf die mechanische Wurzelkanalpräparation untersucht. Sie wurde außerdem mit Ultraschallsystemen verglichen, welche durch Aktivierung der verwendeten Spülflüssigkeit die Effektivität der chemischen Wurzelkanaldesinfektion steigern sollen. Hier konnten im Vergleich zu den Ultraschallsystemen ähnliche Ergebnisse bei der Entfernung von *Smear layer* und der Elimination von Bakterien erzielt werden (Capar und Aydinbelge 2014; S Kocak et al. 2014).

Ruckmann et al. füllten Wurzelkanäle mit einem Röntgenkontrastmittel und werteten im Anschluss röntgenologisch die Entfernung des Kontrastmittels aus. Die SAF konnte signifikant mehr Röntgenkontrastmittel aus dem Wurzelkanal entfernen als ProFile oder Handinstrumente (Ruckman et al. 2013). Mit dem gleichen Versuchsaufbau wurden SAF, WaveOne, Reciproc, ProTaper und Handinstrumente verglichen. Dabei erzielten SAF und Handinstrumente jedoch die schlechtesten Ergebnisse (Topcu et al. 2014).

In einer Studie, die sich mit der Formgebung von Wurzelkanalsystemen befasst, wurde anhand einer fotografischen Auswertung an artifiziellen Kunststoffwurzelkanälen gefunden, dass die SAF im Vergleich zu Typhoon und ProFile NiTi-Instrumenten signifikant besser dem ursprünglichen Verlauf des Wurzelkanals folgt (Burroughs et al. 2012).

Ahmetoglu et al. führten 2015 eine Micro-CT-Studie durch, in der sie Revo-S, SAF und Reciproc auf die Volumen- und Oberflächenzunahme untersuchten. Bei allen Feilen lag die Oberflächen- und Volumenzunahme nach Präparation im ähnlichen Bereich (Ahmetoglu et al. 2015). Zuolo et al. verglichen anhand von Micro-CT-Daten den Volumenabtrag von SAF, BioRace, TruShape und Reciproc. Hier trug die SAF im Vergleich zu Reciproc signifikant weniger Dentin ab, zwischen den anderen Gruppen existierte jedoch kein signifikanter Unterschied (Zuolo et al. 2017). Zum gleichen Ergebnis kamen Amoroso-Silva et al.: Auch hier führte die Wurzelkanalpräparation mit Reciproc zu signifikant mehr Dentinabtrag im Vergleich zu SAF (Amoroso-Silva et al. 2017).

In weiteren Studien wurde die SAF nicht mit anderen Feilensystemen verglichen, sondern ihre alleinige Leistung bewertet. Paqué und Peters bewerteten die Qualität der Wurzelkanalpräparation an ovalen Wurzelkanälen.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.27

Es zeigte sich anhand der Auswertung am Micro-CT, dass durchschnittlich 8,9-23,5% der Gesamtoberfläche des Wurzelkanals unbearbeitet blieben. Diese Werte sind signifikant geringer als in vorangegangenen Studien mit anderen Feilensystemen (Paque und Peters 2011). Ein ähnliches Ergebnis erzielten Peters und Paqué 2011 bei der Präparation von Oberkiefermolaren (Peters und Paque 2011). Die unbearbeitete Fläche des Wurzelkanalsystems konnte nach 5 Minuten Arbeitszeit im Vergleich zu einer 2-minütigen Präparation signifikant reduziert werden (Peters et al. 2010).

In Bezug auf die unbearbeitete Oberfläche im direkten Vergleich unterschiedlicher Nickel-Titan-Systeme liegen unterschiedliche Ergebnisse vor. Solomonov et al. fanden in ihrer Micro-CT-Studie, dass im Vergleich zu ProTaper die SAF signifikant mehr Wurzelkanaloberfläche bearbeitet, wohingegen Versiani et al. bei dem Vergleich von SAF mit WaveOne, Reciproc und ProTaper in ihrer Micro-CT Studie keinen signifikanten Unterschied sahen (Solomonov et al. 2012; Versiani et al. 2013). Ebenfalls keinen signifikanten Unterschied in Bezug auf die bearbeitete Wurzelkanaloberfläche fanden Amoroso-Silva et al. in ihrer Micro-CT-basierten Arbeit. Sie verglichen ebenfalls Reciproc mit der SAF (Amoroso-Silva et al. 2017). Zuolo et al. konnten dieses Ergebnis bestätigen. Die SAF konnte im Vergleich zu Reciproc und TruShape keinen prozentual höheren Anteil bearbeiteter Oberfläche erzielen. Nur BioRace ließ im Vergleich zu den drei anderen Gruppen signifikant mehr Oberfläche unbearbeitet (Zuolo et al. 2017). Lacerda et al. unterteilten den Wurzelkanal in Drittel. Dies führte zu dem Ergebnis, dass SAF im apikalen Drittel signifikant mehr Oberfläche bearbeitet als die Vergleichsgruppen TruShape und XP-Endo Shaper (Lacerda et al. 2017).

2.5 Das Micro-CT

Bei einem Micro-CT handelt es sich um einen hochauflösenden Scanner mit ähnlicher Funktion und Aufbauweise wie ein medizinischer Computertomograph. Es ermöglicht, non-invasiv und nicht destruktiv ein dreidimensionales Bild eines Gegenstandes darzustellen.

Die theoretische Basis für das Micro-CT wurde 1917 gelegt, der erste CT-Scanner wurde jedoch erst 1972 von Hounsfield entwickelt (www.microctworld.net). Für die Forschung interessant wurde das Micro-CT

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.28

jedoch erst in den 90er Jahren. Dies hängt mit der Weiterentwicklung von Computern zusammen, welche erst die Erstellung des dreidimensionalen Bildes aus zweidimensionalen Daten ermöglichen. Mit der Entwicklung der magnetischen Synchrotronstrahlung sind heutzutage Auflösungen von weniger als 1 μm möglich (Stock 2011). Eine höhere Auflösung limitiert jedoch die Größe des darzustellenden Objektes. Die Größe des Objektes darf nur ein 1000faches der gewünschten Auflösung betragen (Engelke et al. 1999).

Wie auch beim konventionellen Röntgen wird im CT ein Objekt mit Strahlung durchleuchtet und eine Projektion entsteht durch unterschiedliche Schwächung der Strahlung durch die Materie. Ein CT besteht somit aus einer Röntgenquelle, einem Detektor und dem Objektstisch. Im Gegensatz zum medizinischen CT ist beim Micro-CT der Objektstisch beweglich. Da es sich bei den zu scannenden Objekten nicht um lebende Wesen handelt, ist es beim Micro-CT möglich, das Objekt in Bezug auf Röntgenquelle und Detektor zu rotieren (Abb.2: Aufbau Micro-CT), sodass Absorptionsprofile aus unterschiedlichen Richtungen entstehen, woraus die dreidimensionale Volumenstruktur gebildet werden kann (Stock 2011).

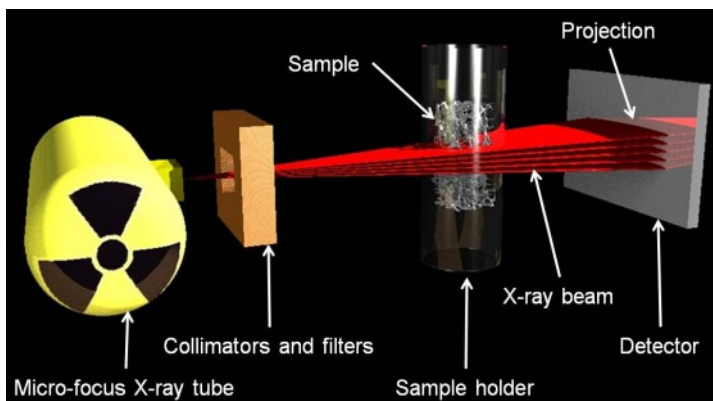


Abbildung 3: Aufbau CT

(Quelle: http://www.b-cube.ch/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=19)

2.5.1 Anwendung

Da mit einem Micro-CT nur sehr kleine Objekte dargestellt werden können, findet es seine Anwendung weniger im klinischen Alltag, sondern vor allem in der Forschung und Industrie. In der Industrie können mit Hilfe des Micro-CT Körper und Gegenstände auf Güte geprüft werden. Außerdem kann durch Erstellung eines dreidimensionalen digitalen Bildes ein gleichartiger 3D-Druck

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 29

entstehen. In der medizinischen Forschung war insbesondere die Darstellung von Knochen- und Knochenstrukturen bahnbrechend (Hsu et al. 2014).

In der Zahnmedizin findet das Micro-CT Anwendung bei der Analyse von Werkstoffen wie Komposit und deren Haftstruktur und dem Aufbau der Zahnhartsubstanzen Schmelz und Dentin (Swain und Xue 2009).

Dank des Micro-CT kann im Bereich der Endodontie die komplizierte Wurzelkanalanatomie dargestellt werden (Grande et al. 2012). Viele Studien, wie auch die vorliegende beschäftigen sich mit der Präparationsqualität unterschiedlicher Feilensysteme in bleibender und Milchzahndentition (Kaya et al. 2017; Paque und Peters 2011).

2.5.2 Verwendetes Micro-CT eXplore Locus SP

Das in der vorliegenden Studie verwendete Micro-CT eXplore Locus SP (Ontario, Kanada) besteht aus dem Scanner, der Konsole und einer Kontrollbox. Der Scanner wird durch die Röhre, den Objektträger, den Detektor und die Blende gebildet. Die Röhre enthält die Quelle der Röntgenstrahlen, welche durch Veränderung von Stromstärke und Spannung in ihrer Intensität und Qualität an das darzustellende Objekt angepasst werden können. Auf dem Objektträger wird der Probenhalter platziert. Er ist rotationsfähig und kann auch durch Auf- und Abfahren in den Strahlengang positioniert werden. Der Detektor besteht aus einem Szintillator und einer CCD-Kamera. Der Szintillator aus Cäsiumiodid erleuchtet bei Bestrahlung. Das dabei entstehende Bild wird von der CCD-Kamera festgehalten. Die Konsole besteht aus einem PC mit der zum Gerät gehörigen Software. 5 Programme sind Teil der eXplore Software. Zum einen das eXplore X-Ray Warm-up, mit welchem die Röntgenröhre vorgewärmt werden kann. eXplore Scan Control nimmt objektspezifische Hard- und Softwareeinstellungen für den Scanvorgang vor. Der eXplore Scan Manager stellt das Verwaltungsprogramm der erworbenen Daten dar. Mit eXplore REconstruction Utility werden zweidimensionale Daten in dreidimensionale Daten verwandelt. Standardmäßig erstellt das Programm ein so genanntes Mini_Vol, eine dreidimensionale Darstellung mit verringerter Auflösung. Das Mini_Vol kann anschließend im eXplore MicroView geöffnet werden. Hier wird die Region of Interest (ROI) festgelegt, aus der später der hochaufgelöste dreidimensionale Datensatz entsteht. Als letzter Bestandteil des Micro-CT ist die Kontrollbox zu nennen, mit der sämtliche technische Aspekte des CT reguliert werden (eXplore_Locus_CT_manual).

3 Ziel der Studie

Ziel dieser In-vitro-Studie war es, die maschinelle Präparation von Milchzahnwurzelkanälen mit dem rotierenden Nickel-Titan-System Mtwo und mit der Self-Adjusting-File zu vergleichen.

Folgende Parameter sollten untersucht werden:

- Für die Präparation benötigte Zeit
- Fläche der unbearbeiteten Wurzelkanalwand
- Häufigkeit von Perforationen des Wurzelkanals
- Veränderung des Volumens.

4 Material und Methoden

Die Studie wurde von der Ethikkommission der Universitätsmedizin Göttingen am 31.10.2016 unter der Antragsnummer DOK_155_2016 genehmigt.

Für den Versuch wurden 83 extrahierte Milchmolaren des Ober- und Unterkiefers gesammelt und zunächst in 0,5%iger Chloramin-T-Lösung gelagert. Eine Einwilligung der Erziehungsberechtigten zur Verwendung in anonymisierter Form für wissenschaftliche Zwecke lag für alle Zähne vor.

4.1 Zugangskavität

Die Trepanation aller Zähne wurde mit Hilfe eines grün kodierten Diamantschleifers (Brasseler, Lemgo) vorgenommen und die Gängigkeit der Wurzelkanäle mit einem Reamer der ISO-Größe 08 (Henry Schein, Langen) überprüft. Zähne, die hierbei Anzeichen von vorangeschrittener Resorption oder Perforationen der Wurzeln zeigten, wurden aussortiert. Sie fanden ihre Verwendung bei den Vorversuchen. Nach der Trepanation wurden die Zähne in Wasser gelagert.

4.2 Übungsphase und Vorversuche

Dem definitiven Versuch ging zunächst eine Übungsphase voraus, in der der Umgang mit den zu untersuchenden Feilen trainiert wurde. Hierzu wurden an insgesamt 15 Zähnen jeweils 25 Kanäle mit Mtwo und 25 Kanäle mit der SAF präpariert.

Anhand mehrerer Probezähne wurde außerdem getestet, ob das Einschleifen einer Referenz in Form einer Kerbe in der Randleiste die Reproduzierbarkeit und Positionierung im Micro-CT vereinfacht. Dieses Vorgehen erwies sich nicht als sinnvoll.

4.3 Auswahl der Zähne und Gruppierung

Für den definitiven Versuch wurden 65 Zähne nach folgenden Kriterien ausgewählt:

**Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.** 32

1. Es darf keine interradikuläre resorptionsbedingte Perforation vorliegen
2. Mehr als zwei Drittel der Wurzel müssen noch vorhanden sein
3. Es dürfen zuvor keine endodontischen Maßnahmen durchgeführt worden sein
4. Die Präparation einer Zugangskavität ist möglich, d. h. eine klinische Krone ist vorhanden
5. Mindestlänge der Wurzel von 5 mm.

Aus den 65 den oben genannten Kriterien entsprechenden Milchmolaren wurden 24 Paare gebildet (matched pairs, siehe Abb. 3).

Die Auswahl der 24 Zahnpaare erfolgte anhand folgender Kriterien:

- Gleiche Zahnart
- Gleiche Anzahl der Wurzelkanäle
- Die Länge der Wurzelkanäle darf nicht mehr als 2,5 mm voneinander abweichen
- Ähnlicher Krümmungswinkel nach Schneider (Schneider 1971).

Die Zähne wurden markiert und jeweils ein Zahn jeder Zweiergruppe der Gruppe SAF und der andere der Gruppe Mtwo zugewiesen.



Abbildung 4: *Matched pairs*: Zu sehen sind 3 Paare untereinander angeordnet. Jeweils ein Zahn wurde der Gruppe A, der andere der Gruppe B zugeordnet und entsprechend beschriftet.

4.4 Präoperativer Scan

Von allen 48 für die Studie geeigneten Zähnen wurden Scans mit Hilfe des Micro-CT Explore Locus SP (General Electric Medical Systems, Ontario, Kanada) angefertigt. Die Röhrenspannung betrug hierbei 90 kV und der Röhrenstrom 85 μ A. Als Scan Technik wurde der 360°-Scan ausgewählt.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 34

Innerhalb eines Scan-Vorgangs konnten 8 Zähne gleichzeitig geröntgt werden. Die Milchzähne wurden hierfür in einem Probenhalter aus Kunststoff platziert, welcher durch Kunststofftrennwände in 4 Kammern unterteilt ist. Auf Grund der Größe war es möglich, zwei Zahnreihen aufeinander zu legen, welche sich trotzdem noch im Strahlenfeld befanden. Am Boden des Probenhalters befanden sich eingestanzte Markierungen in Form von Gruben mit unterschiedlicher Anzahl, sodass nach erfolgter Rekonstruktion die Kammern dem Zahn exakt zugeordnet werden konnten. Mit Schaumstoff wurden die Proben in der Kammer starr fixiert, um Röntgenartefakte zu vermeiden. Mit Hilfe der Fluorofunktion wurde zunächst ein zweidimensionales Bild, vergleichbar mit einem konventionellen Röntgenbild, auf den Bildschirm projiziert. Diese Bild diente der optimalen Positionierung des Objektes in den Strahlengang. Waren hier noch Korrekturen in vertikaler Richtung nötig, konnte der Objektisch in Millimeterschritten nach oben oder unten gefahren werden. Nach dem Scanvorgang wurde automatisch ein Rohdatensatz (MiniVol) erstellt.

Dieser Rohdatensatz konnte im Programm MicroView (GE Healthcare) geöffnet und begutachtet werden. Im Rohdatensatz wurde das zu rekonstruierende Objekt für das Rekonstruktionsprogramm Recon Utility ausgewählt, indem durch das Objekt gescrollt und diagonal zueinander liegende Eckpunkte als Region of Interest (ROI) markiert wurden. Es erfolgte die Rekonstruktion eines Objektes mit einer Auflösung von 29 μm .

4.5 Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge

Die endodontische Arbeitslänge wurde folgendermaßen bestimmt: Bei Sondierung mit einem Reamer der ISO-Größe 08 (Henry Schein, Langen) wurde ab Durchtritt aus dem Foramen apicale das Instrument 1 mm zurückgezogen und diese Länge als Arbeitslänge notiert (Abb. 4).

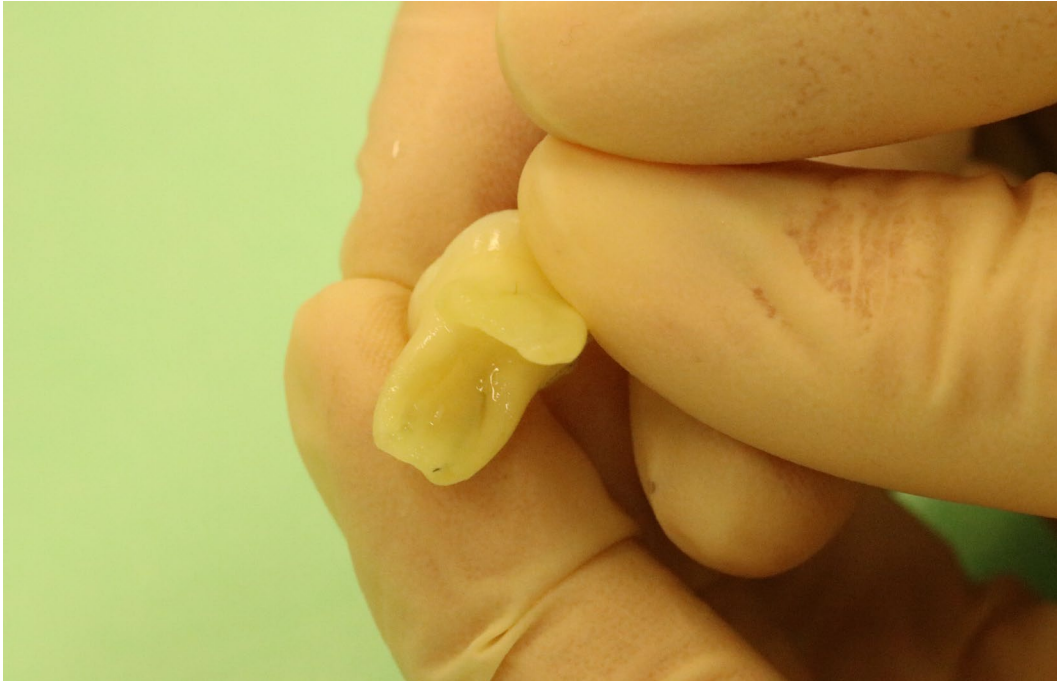


Abbildung 5: Zur Bestimmung der Arbeitslänge wurde ein Reamer der ISO 10 in den Kanal eingebracht. Die Länge wurde mit dem Stopper abgesteckt und notiert.

4.6 Präparation

Die Präparation der Zähne erfolgte mit SAF und Mtwo im Wechsel.

Um ein Übermüden des Operateurs zu verhindern, wurden maximal 6 Zähne am Tag präpariert.

4.6.1 Präparation Gruppe SAF

Nach Vorbereitung des Arbeitsplatzes begann mit der Aufnahme des ersten Instrumentes die Zeitmessung.

Gemäß den Herstellerangaben wurde zunächst ein Gleitfad bis zur ISO-Größe 20 mit Handinstrumenten geschaffen. Ein spannungsfreier Sitz der Feile wurde so gewährleistet. Die für die Gleitfadpräparation benötigte Zeit wurde mit in die Messung einbezogen.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 36

Die SAF-Feile mit dem Durchmesser 1,5 mm und einer Länge von 21 mm wurde in ein RDT3-Winkelstück eingespannt. Das Winkelstück wurde von einem Motor betrieben, welcher eine Peristaltikpumpe enthielt (EndoSTATION™, ReDent NOVA, Ra'anana, Israel), die für kontinuierliche Spülung sorgte. Es erfolgte eine 3-minütige Präparation bei 5000 rpm und einer kontinuierlichen Spülung mit 1%igem Natriumhypochlorit (NaOCl) bei einer Fließrate von 4 ml/min.

Nach Präparation aller Wurzelkanäle eines Zahnes wurde die Feile verworfen und für das nachfolgende Versuchsobjekt ein neues Instrument verwendet. Zum Abschluss erfolgte die Spülung jedes Wurzelkanals per Hand mit 2 ml 10%iger Zitronensäure

Die insgesamt benötigte Arbeitszeit wurde mit einer Stoppuhr gemessen und notiert.

4.6.2 Präparation Gruppe Mtwo

Nach Vorbereitung des Arbeitsplatzes wurde mit der Zeitmessung begonnen. Die Präparation eines Gleitpfades ist für die Aufbereitung mit Mtwo nicht notwendig. Die Wurzelkanäle wurden lediglich auf Gängigkeit mit einem Reamer der ISO-Größe 10 überprüft. Anschließend wurden die Mtwo-Feilen in das Winkelstück des Endomotors (VDW Silver, VDW, München) eingespannt und die Wurzelkanäle den Herstellerempfehlungen folgend präpariert. Begonnen wurde mit der Feile 10/.04, worauf sich die Feilen 15/.05, 20/.06, 25/.05 und 30/.05 anschlossen. Mit allen Feilen wurde büstend gearbeitet und nach Erreichen der Arbeitslänge auf die nächste Präparationsgröße gewechselt. Es wurde der Anwenderinformation für Kanäle mit kleinen oder mittleren Krümmungen gefolgt und jede Feile nach 4-maliger Verwendung verworfen. Zwischen den Instrumenten wurde der Kanal mit 2 ml 1%igem NaOCl aus einer 5-ml-Spritze mit aufgesteckter Spülkanüle (Transcodent, Kiel) desinfiziert. Das Volumen der während der Präparation verwendeten Spülflüssigkeit wurde an das pro Zahn gesamt verwendete Flüssigkeitsvolumen der SAF Präparation angepasst, sodass jeweils mit insgesamt 12 ml Flüssigkeit gespült wurde. Auch hier wurde die Präparation durch die Spülung mit 2 ml 10%iger Zitronensäure pro Wurzelkanal beendet.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 37

Nach der Präparation wurden die Zähne in Wasser gelagert.

4.7 Postoperativer Scan

Nach der Präparation wurden die Zähne erneut gescannt. Die Einstellungen und das Vorgehen gegenüber dem präoperativen Scanvorgang wurden dafür nicht verändert.

4.8 Verarbeitung und Auswertung der Datensätze

Um die dreidimensionalen Datensätze auswerten zu können, mussten sie zunächst mit Hilfe der Programme Scry und MeshLab weiterverarbeitet werden. Im Programm Scry wurde zunächst ein Histogramm der unterschiedlichen Grauwerte erstellt. Diese wurden graphisch dargestellt. Peaks entstehen durch die unterschiedliche Dichte der einzelnen Komponenten des Bildes: Luft, Schmelz und Dentin. Es wurde der Grenzwert zwischen Hartsubstanz und Luft festgelegt. Nun konnte als erster Schritt das Volumen des Zahnes abgelesen und notiert werden. Im Anschluss wurde der Datensatz in Form einer STL-Datei gespeichert.

Die STL-Datei wurde im MeshLab-Programm verkleinert und die Oberfläche des Objektes geglättet. Dieser Vorgang wurde für prä- und postoperative Aufnahmen gleichermaßen durchgeführt.

Wieder in Scry wurden zusammengehörige dreidimensionale Bilder eines Zahnes (prä- und postoperativ) geöffnet und exakt übereinandergelegt (Abb. 5 + 6) Da die beiden dreidimensionalen Bilder farblich unterschiedlich dargestellt wurden, konnten hier Perforationen erkannt werden. Im Falle einer vorliegenden iatrogen verursachten Perforation wurde diese für die spätere Auswertung notiert. Die Wurzelkanäle wurden ausgeschnitten (Abb. 7) und entsprechend ihrer Position gespeichert.

Im Programm MeshLab wurde das Tool Hausdorff-Distance ausgewählt. Hierdurch erfolgte die Berechnung der bearbeiteten Oberfläche. Die Rechnung wurde abgespeichert.

Als letzter Schritt konnte im Programm Scry die mit Hilfe der Hausdorff-Distance berechnete bearbeitete Oberfläche abgelesen werden. Als bearbeitet wurde zuvor eine Differenz zwischen prä- und postoperativem Bild von $>0,1$ mm festgelegt. Der Wert für die bearbeitete Oberfläche in Prozent wurde notiert.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 38

Um herauszufinden, ob es sich bei den ermittelten Werten um reproduzierbare Ergebnisse handelt, wurde der Vorgang zur Bestimmung der bearbeiteten Oberfläche an zehn randomisiert ausgewählten Präparaten wiederholt.

Alle ermittelten Werte wurden in einer Tabelle in Excel (Microsoft) notiert.

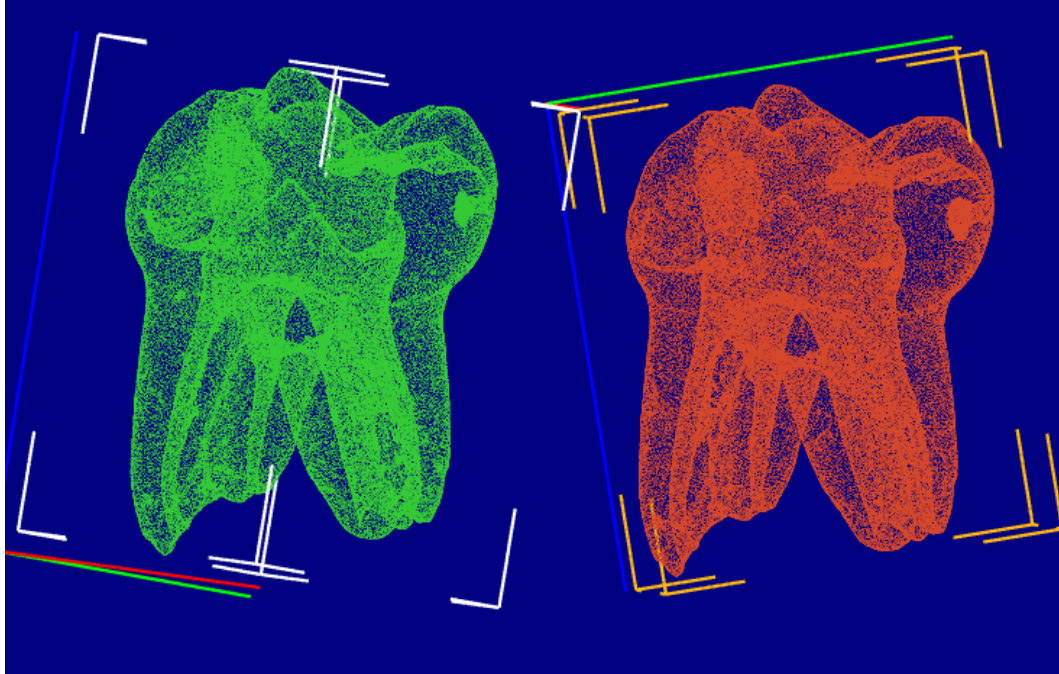


Abbildung 6: Prä- und postoperatives Bild vor Überlagerung

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 39

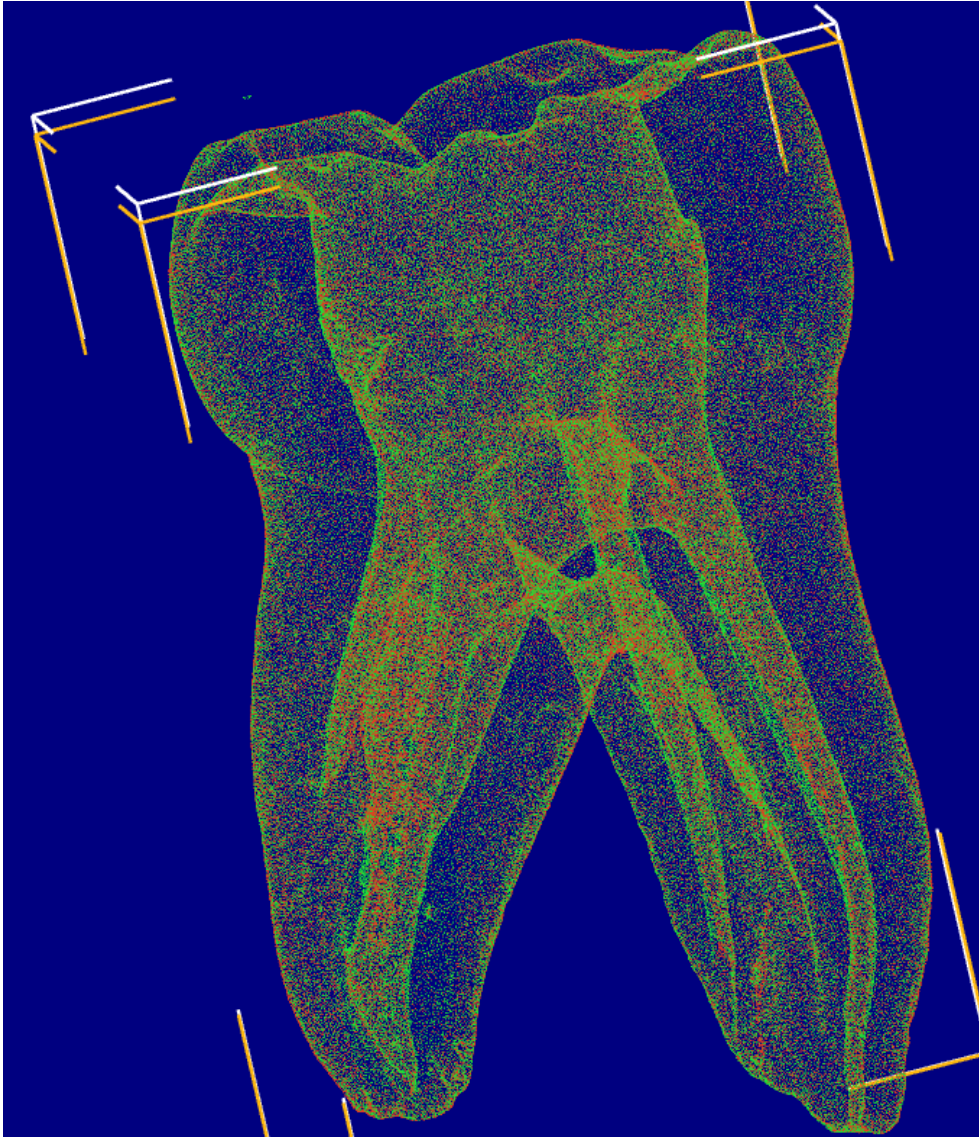


Abbildung 7: Überlagerter Zustand vor dem Ausschneiden der Wurzelkanäle.
Die komplizierte Anatomie des Kanalsystems ist zu erkennen

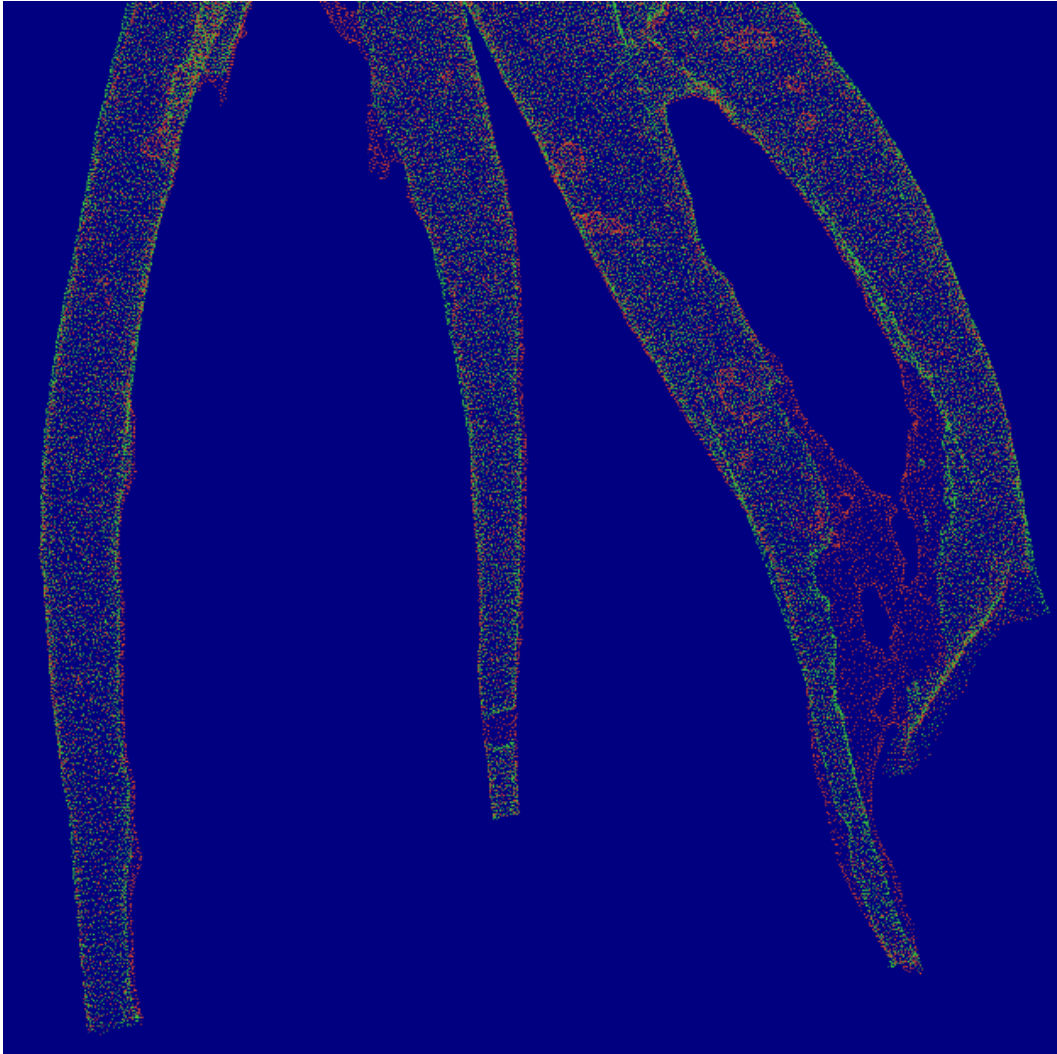


Abbildung 8: Die Abbildung zeigt das komplexe Wurzelkanalsystem nach dem Freischneiden der Wurzelkanäle

4.9 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit Hilfe des Programms GraphPad Prism sowie Microsoft Office Excel 2010.

Es wurde ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt, da es sich bei den zwei zu vergleichenden Daten nicht um vollkommen identische Zähne handelt (unpaariger t-Test). Nach Instrumentenfraktur musste ein Zahnpaar aus der Studie ausgeschlossen werden. Die übrigen 23 Probenpaare wurden in die Statistik mit einbezogen. Als statistisch signifikant gelten p-Werte $<0,05$. Für die deskriptive Statistik wurden Minimal- und Maximalwerte sowie der Durchschnitt ermittelt.

Das Vorgehen wurde für folgende vier Parameter angewandt:

- Präparationszeit,
- Bearbeitete Oberfläche,

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.41

- Volumenveränderung
- Iatrogen hervorgerufene Perforationen.

5 Ergebnisse

5.1 Präparationszeit

Die Daten für die Arbeitszeit sind in Tab.2 zusammengefasst. Die Präparationszeit für SAF setzt sich hierbei zusammen aus der Zeit für die Gleitpfadpräparation sowie der zuvor festgelegten Präparationszeit von drei Minuten. Für die Präparation mit dem Mtwo-System war keine vorherige Gleitpfadpräparation notwendig.

Die Auswertung der für die Wurzelkanalpräparation benötigten Arbeitszeit ergab eine statistisch signifikant kürzere Präparationsdauer (angegeben in Sekunden) für Mtwo ($p= 0,0024$) (Tabelle 2 + Abb. 8)

	Mtwo	SAF
Minimum (sec)	513	674
Maximum (sec)	1870	2128
Mittelwert (sec)	970	1327

Tabelle 2: Minimal- und Maximalwerte sowie durchschnittlich benötigte Zeit für die Präparation

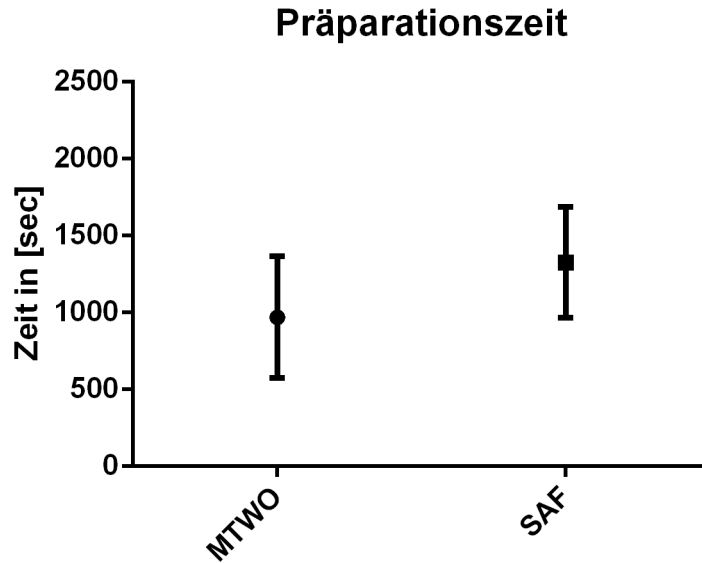


Abbildung 9: Präparationszeit

5.2 Bearbeitete Oberfläche

Die Ergebnisse in Bezug auf die bearbeitete Oberfläche sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Keinem der beiden Feilensysteme gelang eine Bearbeitung der Oberfläche von 100 %. Im Durchschnitt ist Mtwo der SAF um 3 % überlegen. Beim statistischen Vergleich der prozentual bearbeiteten Wurzelkanalwand konnte jedoch kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p=0,39$). (Abb. 10)

	Mtwo	SAF
Minimum (%)	62,25	53,24
Maximum (%)	99,6	99,6
Mittelwert (%)	83,97	80,68

Tabelle 3: Minimal- und Maximalwerte sowie durchschnittlich bearbeitete Oberfläche

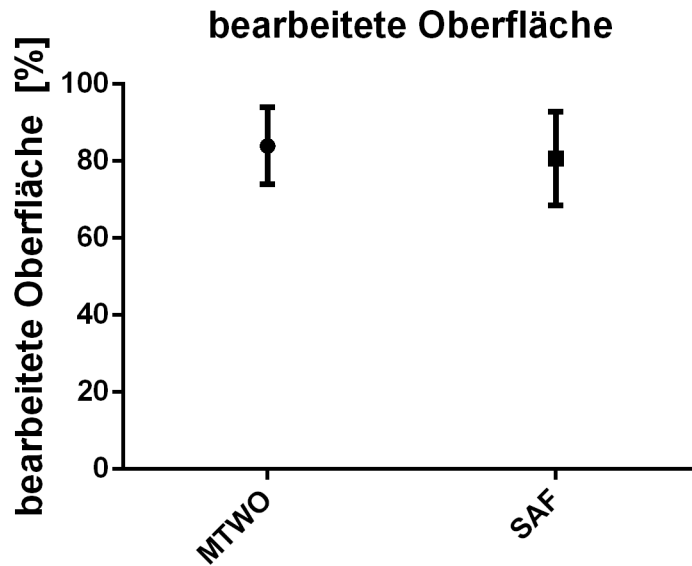


Abbildung 10: Bearbeitete Oberfläche

5.3 Volumenveränderung

Tab. 4 zeigt die Ergebnisse bezüglich bei der präparationsbedingen Veränderung des Volumens nach Bearbeitung, Hier trat kein signifikanter Unterschied zwischen SAF und Mtwo auf ($p= 0,39$) (Abb. 11)

	Mtwo	SAF
Minimum (mm ³)	0,8	0,5
Maximum (mm ³)	21,3	22,6
Mittelwert (mm ³)	9,5	8,8

Tabelle 4: Minimal- und Maximalwerte sowie durchschnittliche Volumenveränderung

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.45

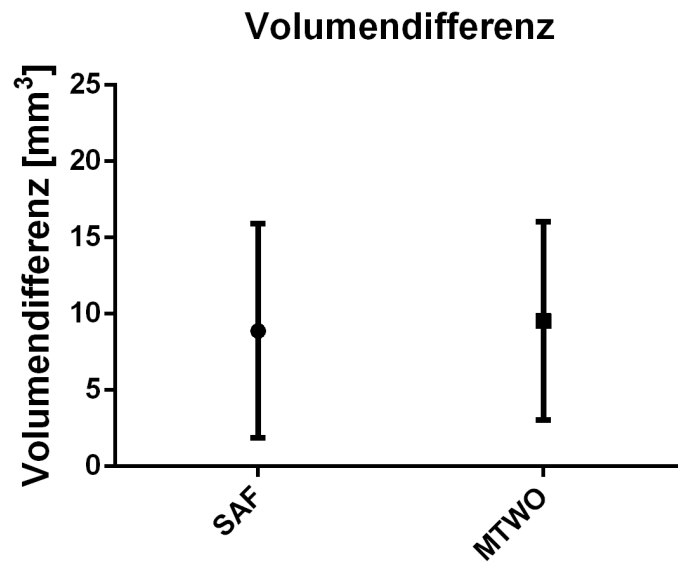


Abbildung 11: Volumendifferenz

5.4 Perforationen

Die Anzahl der auftretenden Perforationen pro Gruppe unterschied sich ebenfalls nicht signifikant ($p=0,41$)

Bei der Präparation mit Mtwo traten in 21,74 % Perforationen auf, bei Präparation mit der SAF hingegen nur in 8,7 % der Zähne. (Abb. 12 + 13)

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.46

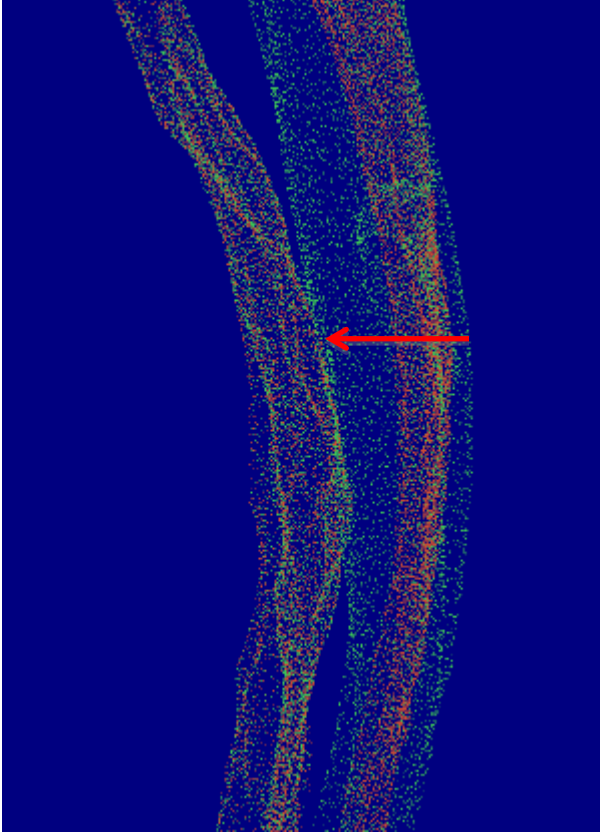


Abbildung 12: Darstellung einer Perforation: zu sehen ist der präoperative (rot) und postoperative (grün) Zustand. Der Pfeil markiert die Perforation.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.47

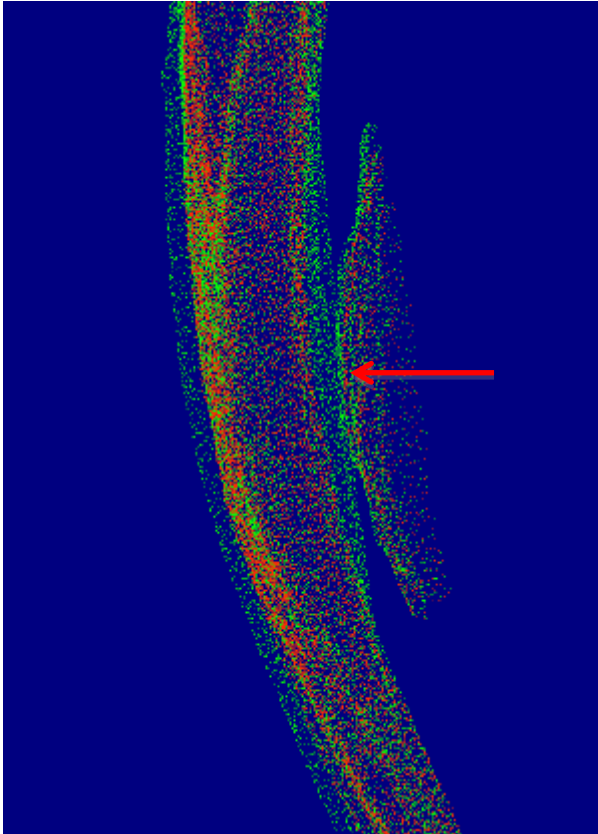


Abbildung 13: Perforation im interradiikulären Bereich. Die Oberflächen von Zahn und Wurzelkanalwand gehen ineinander über.

5.5 Reproduzierbarkeit

10 randomisiert ausgewählte Proben wurden ein zweites Mal ausgewertet. Der Vergleich der Ergebnisse vorher und nachher ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den Ergebnissen ($p=0,64$). Hierzu wurde ein gepaarter t-Test durchgeführt. Die durchschnittliche Abweichung der Ergebnisse von einander beträgt 4,4 %.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Methode

6.1.1 Auswahl der Zähne und Gruppierung

Die vorliegende Studie wurde ausschließlich an Milchmolaren durchgeführt. Wie bereits beschrieben, sind für die Durchführung einer Milchzahnpulpektomie die Kooperationsbereitschaft der Patienten und mindestens zwei Drittel verbleibende Wurzellänge nötig. Da Frontzähne bereits um das 6. Lebensjahr eines Kindes verloren gehen, ist die Durchführung einer Milchzahnpulpektomie oft nur bis ins Kleinkindalter möglich. Dieses junge Alter setzt häufig eine Behandlung in Vollnarkose voraus.

Es konnte außerdem gezeigt werden, dass Milchmolaren häufiger eine Karies mit Pulpabeteiligung aufweisen als Frontzähne (Grund et al. 2015).

Des Weiteren gelten aus kieferorthopädischer Sicht insbesondere die zweiten Milchmolaren als wichtige Pfeiler zum Erhalt der Stützzone (Miyamoto et al. 1976).

Da alle Arten von Milchmolaren für die Studie ausgewählt wurden, wurde bei der Bildung der *matched pairs* die Zahnart berücksichtigt. Insbesondere die Anzahl der Wurzelkanäle war hier entscheidend, da sowohl Präparationszeit als auch bearbeitete Oberfläche als Gesamtheit ausgewertet wurden. Eine Division durch die Anzahl der Wurzelkanäle erfolgte nicht.

6.1.1.1 Wurzelstatus und vorliegende Resorptionen

Als Voraussetzung für die Eignung als Probezahn der Studie durften keine resorptionsbedingten Perforationen vorliegen. In der vorliegenden Studie wurde der Resorptionsgrad mit Hilfe eines Reamers der ISO-Größe 10 getestet. Da die physiologische Wurzelresorption in der Milchdentition interradiär und nicht apikal beginnt (Stöckli 2001), wurde insbesondere am Pulpakammerboden und in der Furkation auf ein Durchschimmern des Stahlinstrumentes geachtet. Bei Sichtbarkeit oder bereits vorhandener Perforation wurde der Zahn aussortiert.

Das Alter des Patienten stellt kein gesichertes Kriterium für das Vorhandensein einer Wurzelresorption dar, da in jedem Lebensalter auch entzündliche Wurzelresorptionen auftreten (Vieira-Andrade et al. 2012). Da der Grad der

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 49

Resorption nicht ermittelt wurde, sind die Bedingungen der beiden Versuchsgruppen nicht vollständig identisch. Eine Möglichkeit der Lösung dieses Problems wäre ein präoperatives Vermessen der Wurzelkanalwand gewesen. Um zu 100% identische Versuchsbedingungen zu schaffen, wäre das Duplizieren von Zähnen mit Hilfe eines 3D-Druckers denkbar. So könnte jeweils ein Zahnpaar aus zwei vollkommen identischen „Modellen“ bestehen. Dieses Verfahren wäre jedoch nicht nur zeitaufwendig, sondern auch kostenintensiv. Da sich keine Studien mit diesem Design finden lassen, handelt es sich derzeit noch um keine Standardmethode in der zahnmedizinischen Forschung.

Das Kriterium eines verbliebenen Anteils von zwei Dritteln der Wurzel bzw. 5 mm Wurzellänge wurde auf Grund der in der Literatur empfohlenen Indikationen bzw. Kontraindikationen für die Durchführung der Wurzelkanalbehandlung gewählt (Mejäre 2015). Die Wurzelresorption spielt bei der Verkürzung der Wurzellänge eine untergeordnete Rolle, es kann jedoch beim Extraktionsvorgang zu Wurzelfrakturen kommen. Bei der Auswahl der Zähne für die Studie wurde der apikale Wurzelanteil auf Frakturen inspiziert und frakturierte Zähne aussortiert. Zwar hätten frakturierte Zähne, welche trotzdem noch dem Kriterium der 5-mm-Wurzellänge entsprechen, verwendet werden können, auf Grund der Fraktur wäre der Apex jedoch weiter geöffnet gewesen, was eine folgende Präparation in Bezug auf die Gängigkeit und nötige Gleitpfadpräparation vereinfacht hätte. Der Parameter Präparationszeit wäre hierdurch beeinflusst worden.

6.1.1.2 Vorhandensein einer klinischen Krone

Nur bei einem Zahn mit einer vorhandenen klinischen Krone und infolgedessen guter Restaurierbarkeit gilt die Pulpektomie als indiziert. Insofern war auch dies ein Kriterium für den Einschluss in die Studie.

Ein weiteres Argument ist, dass eine klinische Krone ein Reservoir für die Spülflüssigkeit darstellt. Ist keine klinische Krone vorhanden, geht der größte Teil der Flüssigkeit vor Erreichen der Netzstruktur der SAF verloren.

6.1.2 Verwendung des Micro-CT

Die Durchführung einer Studie mit einem Micro-CT entspricht einem sehr hohen Standard. So handelt es sich bei den meisten Neuveröffentlichungen endodontischer Publikationen um Micro-CT Studien (MM Kocak et al. 2017; Lacerda et al. 2017; Zuolo et al. 2017). Auch im Bereich der Milchzahnendodontie erschien 2017 die erste Micro-CT Studie, welche verschiedene Feilensysteme verglich (Kaya et al. 2017).

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 50

Alternativ zum Micro-CT wäre eine Studie unter Verwendung eines DVT möglich gewesen. Die Auflösung bei einem Micro-CT ist jedoch bei Weitem höher, sodass detailliertere Darstellungen möglich sind. Diese Tatsache bestätigen auch Acar et al., in deren Studie es um die Detektion akzessorischer Kanäle in Milchmolaren ging. Verglichen wurde die Anzahl gefundener Kanäle unter Zuhilfenahme eines DVT, bzw. Micro-CT. Es verwundert nicht, dass in den Untersuchungen mit dem Micro-CT mehr Kanäle entdeckt werden konnten. Sie empfehlen die Verwendung des DVT daher eher in der Patientenbehandlung als für Forschungszwecke (Acar et al. 2015).

In vielen Studien, die sich mit der Wurzelkanalpräparation auseinandersetzen, wird der Grad der Entfernung eines vorher injizierten Farbstoffs bestimmt (Azar et al. 2012; Ramazani et al. 2016). Die Auswertung mit Hilfe eines Scores setzt voraus, dass zuvor eine genaue Kalibrierung des Operators vorgenommen wurde. Die Auswertung der Reinigungswirkung anhand von Scores limitiert den auswertenden Operateur auf die 4 zuvor festgelegten Werte. Eine Entfernung der Tinte durch die verwendeten Spüllösungen ist außerdem nicht auszuschließen.

6.1.3 Wurzelkanalpräparation

6.1.3.1 Auswahl der Feilensysteme

Für die vorliegende Studie wurden die SAF und das Mtwo-System gewählt. Da die SAF nicht im eigentlichen Sinne eine Feile darstellt, sondern vielmehr eine Netzstruktur aufweist, ist sie nach Herstellerangaben insbesondere für die Bearbeitung irregulärer Kanalmorphologien geeignet. Ihre Arbeitsweise ist wenig schneidend und substanzabtragend, sondern hauptsächlich schabend, schmirgelnd unter kontinuierlicher Spülung. Durch den inneren Hohlraum passt sich die komprimierbare Netzstruktur an die Kanal Anatomie an. Insbesondere im Milchgebiss ist diese Eigenschaft hilfreich (Metzger 2014a). In einer Micro-CT basierten Studie, welche sich mit der Wurzelkanalmorphologie von Milchzähnen im Querschnitt befasste, wurde gezeigt, dass insbesondere interradiär nur eine sehr dünne Wurzelkanalwand vorhanden ist. Bei der Durchführung einer Wurzelkanalbehandlung ist also insbesondere in diesem Bereich eine Feile nötig, welche substanzschonend arbeitet, aber dennoch mechanisch reinigt und glättet. Des Weiteren wurde festgestellt, dass insbesondere im koronalen Bereich der Wurzelkanalquerschnitt nur sehr selten rund ist (32 % im mesialen und 16 % im distalen Wurzelkanal) und es sich meistens um ovale, schlüssellochförmige oder irregulär geformte Querschnitte

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 51

handelt (Kurthukoti et al. 2015). Ob die SAF an Milchmolaren also tatsächlich effizienter die Wurzelkanalwand bearbeitet, sollte untersucht werden.

Als Vergleichssystem wurde Mtwo gewählt. Das zweite System sollte ein Nickel-Titan-System sein. Ein Vergleich mit Instrumenten aus Stahl wäre ebenso möglich gewesen. Ebenso hätte die Handfeile als drittes Vergleichssystem ausgewählt werden können. Da dies die Bildung der *matched pairs* jedoch erschwert hätte, wurde auf eine dritte Versuchsgruppe verzichtet. Außerdem wurde in vorangegangenen Studien bereits gezeigt, dass insbesondere hinsichtlich der Präparationszeit die Handfeilen den Nickel-Titan-Instrumenten unterlegen sind (Azar und Mokhtare 2011). Auch in Bezug auf die Reinigungswirkung schnitten sie schlechter ab (Musale und Mujawar 2014).

Mtwo wurde aus folgenden Gründen ausgewählt: Es sollte ein Vergleichssystem gewählt werden, welches auf dem dentalen Markt bereits etabliert ist und zu welchem somit bereits einige vergleichende Studien, auch im bleibenden Gebiss, existieren. Da auch die Präparationszeit gemessen werden sollte, wäre die Wahl eines Einfeilensystems als eher ungünstig zu bewerten, da die Präparationszeit hier vermutlich sehr viel kürzer ausgefallen wäre (Ramazani et al. 2016). Systeme mit sehr vielen Feilen (z.B. FlexMaster) kamen aus demselben Grund nicht in Frage, nur dass hier die Präparationszeit verlängert worden wäre. Des Weiteren besticht Mtwo durch die Tatsache, dass eine Gleitpfadpräparation nicht nötig ist, ein Umstand, welcher der SAF definitiv als nachteilig anzurechnen ist. Da Mtwo in der bislang vorliegenden Literatur zur Güte der Wurzelkanalpräparation gute Resultate erzielte, wurde es als Vergleichssystem ausgewählt (Schäfer et al. 2006; Shivashankar et al. 2016; Vallaeys et al. 2016).

6.1.3.2 Bestimmung der abschließenden ISO-Größe

Wie bereits beschrieben, existiert in der Literatur keine einheitliche Empfehlung in Bezug auf die abschließende ISO-Größe bei der Wurzelkanalpräparation von Milchzähnen. Teilweise wird empfohlen, auf eine Präparation vollständig zu verzichten und stattdessen nur chemisch zu desinfizieren (Viergutz 2003). In der wissenschaftlichen Stellungnahme der DGKiZ heißt es ebenfalls, dass das Hauptaugenmerk der Milchzahnendodontie auf chemischer Desinfektion statt auf mechanischer Bearbeitung der Wurzelkanalwand liegen sollte (Kühnisch et al. 2011). Präparationen bis zur ISO-Größe 40 führen zu unnötigen Perforationen der dünnen Wurzelkanalwand. In einer Studie von Kummer et al. wurde bis zur ISO-Größe 40 präpariert; hierbei traten in bis zu 25 % der Proben Perforationen auf (Kummer et al. 2008). Um im apikalen Bereich Zugang mit der Spülnadel zu erhalten, sollte der Wurzelkanal zumindest bis zur ISO-Größe

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 52

der Spülnadel erweitert werden. Dies entspricht zumeist einer ISO-Größe von 30 oder 35. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Studie bis zur ISO-Größe 30 präpariert.

Bei der SAF ist eine Anpassung an ISO-Größen nicht möglich. In der vorliegenden Studie wurde die kleinste verfügbare SAF-Feile (Durchmesser 1,5 mm, Länge 21 mm) verwendet. Lediglich die Präparationszeit, in der die Feile im Kanal arbeitet, kann individuell gewählt werden. Im bleibenden Gebiss werden 4 Minuten pro Wurzelkanal empfohlen, keine Angabe findet sich zur Verwendung im Milchgebiss. In der einzigen vorliegenden Milchzahnstudie zur SAF wurde 4 Minuten präpariert (Kaya et al. 2017). Auf Nachfrage empfiehlt der Hersteller eine verkürzte Präparationszeit von 3 Minuten.

6.1.4 Verarbeitung und Auswertung der Datensätze

6.1.4.1 Kalibrierung der Proben

Die Proben wurden im Micro-CT vor und nach Präparation gescannt. Dabei wurde auf eine aufwendige Kalibrierung gegen einen Testkörper verzichtet. Bei der Auswertung musste somit manuell der Grenzwert im Grauerthistogramm zwischen Luft und Zahnhartsubstanz festgelegt werden. Zwar lässt sich der ausgewählte Bereich der Zahnhartsubstanz sehr gut optisch darstellen, es entstanden jedoch keine vollständig identischen Grauerthistogramme von prä- und postoperativen Bildern. Dies führte zu kleinen Unregelmäßigkeiten. Es wurde hierdurch geringer Einfluss auf das Gesamtvolumen genommen und es entstanden teilweise Unebenheiten in der Zahnoberfläche, die das Übereinanderlegen erschwerten. Eine Kalibrierung sollte daher unbedingt durchgeführt werden.

6.1.4.2 Bestimmung des Grenzwertes für die bearbeitete Oberfläche

Schwierig fiel der Entscheidung bei der Festlegung des Grenzwertes, ab wann die Veränderung der Oberfläche als Bearbeitung gelten soll. Es ließ sich kein Richtwert in der Literatur finden, welches Ausmaß an Abtrag infizierten Dentins von der Wurzelkanalwand als therapeutisch am besten gilt. Das für die Auswertung verwendete Programm Scry unterscheidet nicht zwischen Addition und Subtraktion von Substanz, sondern bestimmt lediglich die prozentual veränderten Anteile einer Oberfläche.

Eine Veränderung der Oberfläche von 0,1 mm stellte einen guten Kompromiss dar.

6.1.4.3 Techniksensitivität der Methode

Die Übereinanderlagerung der dreidimensionalen Bilder stellt eine sehr techniksensitive Methode dar. Zum Teil wurde dies noch durch oben beschriebene Ungenauigkeiten in der Wiedergabe der Zahnoberfläche erschwert. Es muss darauf geachtet werden, dass die Zähne in alle Richtungen rotiert werden, damit sie in allen Achsen genau aufeinanderpassen.

Um die Qualität der Methode und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen, wurden 10 randomisiert ausgewählte Präparate ein weiteres Mal aufeinander gelagert und ausgewertet. Wie Tabelle 5 zeigt, wichen die Ergebnisse der Auswertung vorher und nachher um maximal 5,07 % voneinander ab. Der durchgeführte paarige t-Test zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen.

Präparat	Ergebnis vorher (%)	Ergebnis nachher (%)
1A	91,3	95,4
3A	77,74	77,51
14A	82,96	82,96
27B	70,71	71,13
24A	82,01	77,5
22B	65,78	67,96
20B	84,93	82,1
20A	81,87	83,51
19A	68,68	63,61
5A	94,71	94,6

Tabelle 5: Reproduzierbarkeit: 10 randomisiert ausgewählte Präparate wurden ein zweites Mal ausgewertet (rechte Spalte) und mit dem Ergebnis der ersten Auswertung verglichen (mittlere Spalte)

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Präparationszeit

In der vorliegenden Studie wurde die Präparationszeit unter klinischen Bedingungen bestimmt, das heißt, die Zeit wurde ab Aufnahme des Instrumentes gemessen. Sowohl die Gleitpfadpräparation bei der SAF wurde mit einbezogen als auch die Zeit des Instrumentenwechsels und Spülens bei Mtwo. Andere Studien bezogen lediglich die aktive Zeit der Feile im Kanal

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 54

sowie die zur chemischen Desinfektion benötigte Zeit mit ein (Kaya et al. 2017). Wäre der Versuchsaufbau dahingehend verändert worden, wäre die Präparationszeit der SAF von 3 Minuten aktiver Präparation unter kontinuierlicher Spülung und ca. 1 min. für die Abschlusspülung mit Zitronensäure voraussichtlich signifikant kürzer im Vergleich zu Mtwo ausgefallen. Da sich in den Vorversuchen jedoch zeigte, dass ein Erreichen der Arbeitslänge innerhalb der 3 Minuten Präparationszeit ohne vorausgegangene Gleitpfadpräparation nur sehr selten möglich war, wurde sie in die Zeitmessung mit einbezogen, um realistische klinische Bedingungen zu schaffen. Aus dem selben Grund wurde auch beim Instrumentenwechsel während der Präparation mit Mtwo die Stoppuhr nicht angehalten.

6.2.2 Unbearbeitete Oberfläche

Keinen signifikanten Unterschied ergab die Auswertung der unbearbeiteten Oberflächen. Die Form des Wurzelkanals ist hierbei entscheidend für das Ergebnis. Die isolierte Auswertung eines runden Wurzelkanals ergab eine bearbeitete Oberfläche von 99 %. (Abb. 13)

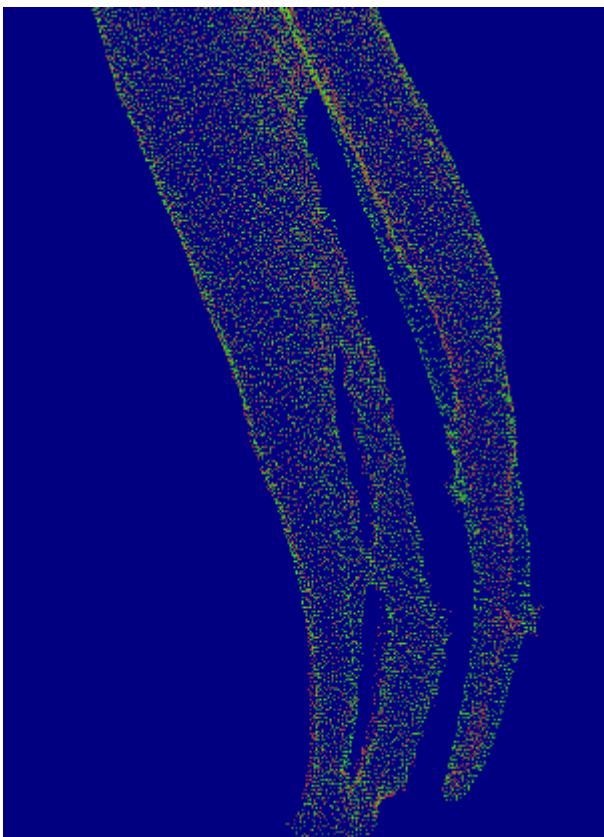


Abbildung 14: Mtwo im runden Kanal

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 55

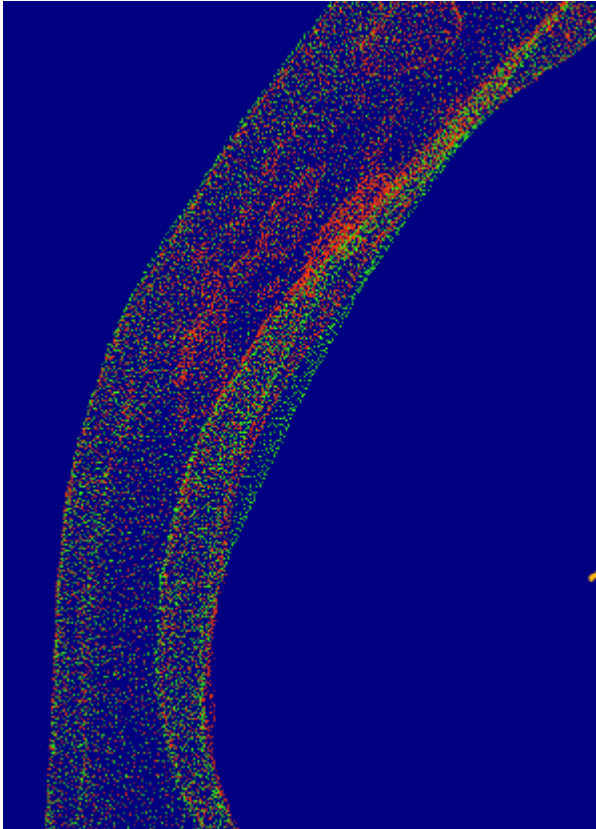


Abbildung 15: Mtwo im ovalen Kanal

In ovalen Kanalverläufen hingegen sieht man deutlich den runden bearbeiteten Anteil des Wurzelkanals sowie unbearbeitete Anteile (siehe Abb. 14). In einer Micro-CT basierten Studie wurde festgestellt, dass es sich bei mesialen Wurzelkanälen zu >30 % um einen runden Querschnitt handelt (Kurthukoti et al. 2015). Auf Grund der Tatsache, dass viele Unterkiefermolaren mit zwei mesialen Wurzelkanälen und einem distalen Wurzelkanal in die Studie eingeschlossen wurden, lässt sich das gute Abschneiden von Mtwo erklären.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 56

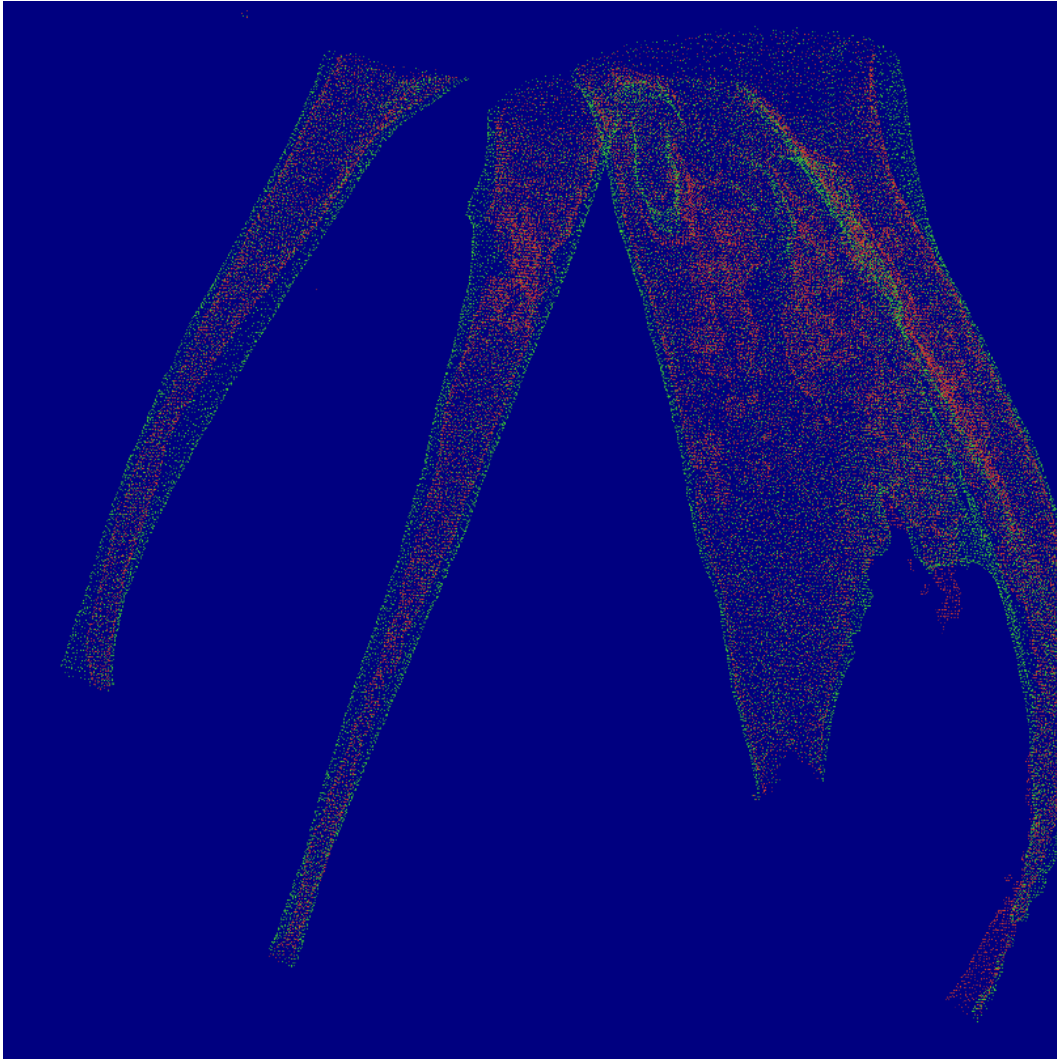


Abbildung 16: Komplexe Anatomie des Milchzahnwurzelkanalsystems.

Die SAF arbeitet sehr substanzschonend. Nach Metzger entfernt die SAF bei einer 4minütigen Präparationszeit durchschnittlich 60- 75 μm Dentin, was 0,06-0,075 mm entspricht (Metzger et al. 2010). Sollte dieser Wert stimmen, könnten bearbeitete Anteile der Wurzelkanalwand nicht als solche von Scry gewertet worden sein. Als bearbeitet galt in dem Programm eine Veränderung der Oberfläche von $>0,1$ mm. Diese Grenze wurde zuvor einprogrammiert.

Des Weiteren wurde bei einigen Zähnen trotz sorgfältiger Gleitpfadpräparation auch nach 3 Minuten die Arbeitslänge nicht erreicht und apikale Anteile des Wurzelkanals blieben somit unberührt. (Abb. 15)

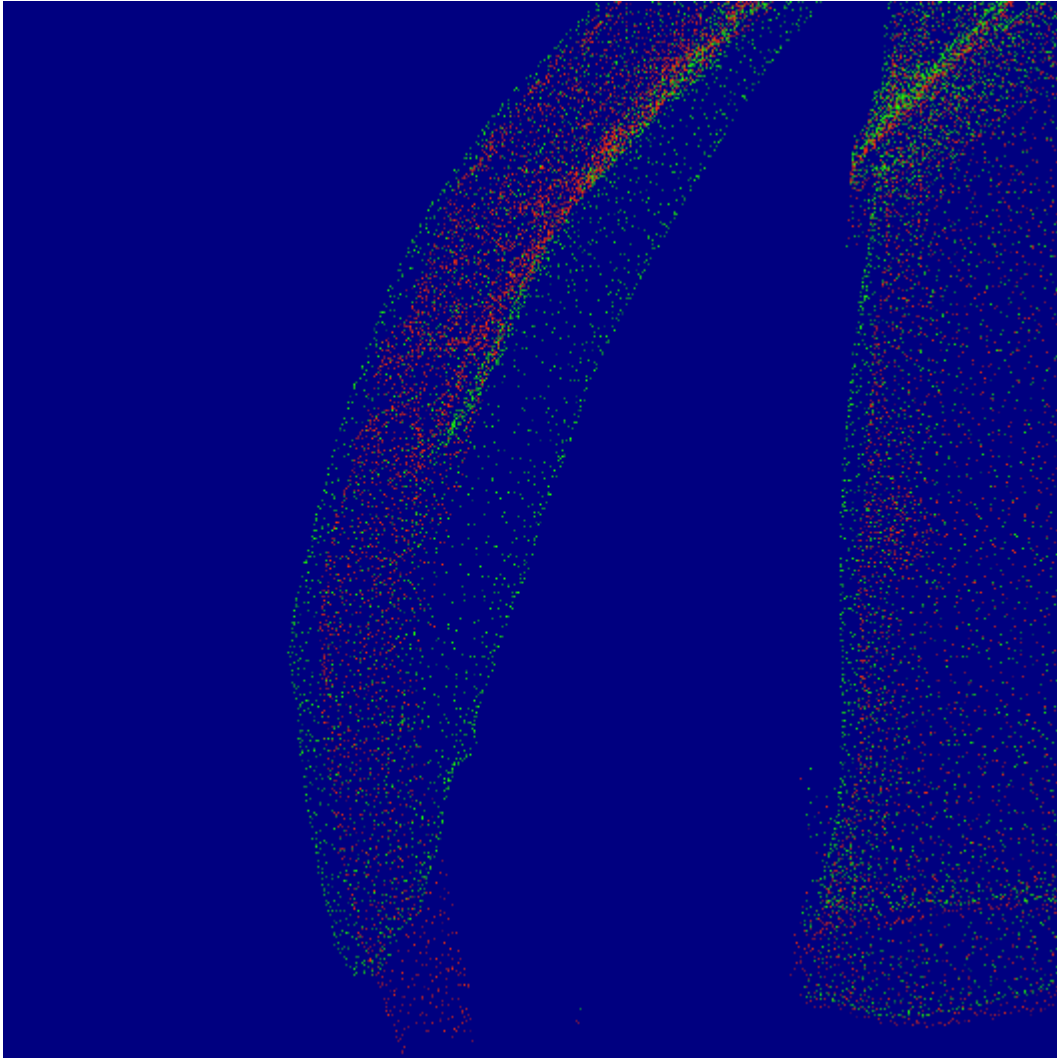


Abbildung 17: Zu sehen sind der präparierte Anteil (grün) und der ursprüngliche Kanalverlauf (rot). Die Arbeitslänge konnte nicht erreicht werden.

6.2.3 Volumenveränderung

Die Bestimmung der Veränderungen des Wurzelkanalvolumens gestaltete sich schwierig. Durch zahlreiche kleine akzessorische Kanäle und iatrogen hervorgerufene Perforationen entstanden Verbindungen vom Wurzelkanal zur umliegenden Luft. Diese im Micro-CT-Bild manuell voneinander abzugrenzen, stellte sich als schwierig dar. Aus diesem Grund wurde nicht das Volumen des Wurzelkanals gemessen, sondern das Volumen der Zahnhartsubstanz, welche ja auch nur innerhalb des Wurzelkanals durch die maschinelle Präparation verändert wurde. Durch die oben genannten Ungenauigkeiten im Scan entstanden veränderte Oberflächen auf dem Zahn, verursacht durch den Fixierschaumstoff. Diese veränderten somit auch das Volumen. Dennoch lässt sich von einer Tendenz sprechen, dass die SAF weniger Substanz abträgt als das Mtwo-System.

6.2.4 Anzahl der Perforationen

Iatrogen hervorgerufene Perforationen konnten gut von den vorher vorhandenen akzessorischen Kanälen oder Resorptionsprozessen abgegrenzt werden. Durch unterschiedlich farbliche Einstellung dominiert bei iatrogen hervorgerufener Perforation die Oberflächenfarbe des postoperativen dreidimensionalen Bildes. (Abb. 11 + 12)

Die Zahl der Perforationen liegt für Mtwo höher, jedoch nicht statistisch signifikant. Statistisch lässt sich das Ergebnis mit der geringen Probenanzahl insgesamt erklären. Im klinischen Alltag ist der Unterschied für die Wahrscheinlichkeit einer Perforation von 22% (Mtwo) im Vergleich zu 9% (SAF) dennoch entscheidend in Bezug auf die klinische Erfolgswahrscheinlichkeit, welche durch Perforationen gemindert wird (Kakani et al. 2015). Zwar wurden bei Mtwo gute Ergebnisse in Bezug auf den Anteil bearbeiteter Oberfläche erzielt, dies jedoch zu Lasten der Anzahl an Perforationen. Die Perforationen traten zumeist im interradikulären Bereich auf. Hier neigen Nickel-Titan-Feilen mit runden Querschnitt dazu, sich an die Krümmung anzulegen und Kanäle zu begradigen (Metzger et al. 2010). Da in diesem Bereich der Milchzahn aufgrund physiologischer Resorptionsprozesse besonders dünn ist, ist das Anpassen des Feilensystems an die Wurzelkanalanatomie entscheidend.

6.3 Klinische Empfehlungen

Siqueira et al. verdeutlichten die Bedeutung der Wurzelkanalpräparation auf die Reduktion von Bakterien im Wurzelkanal, indem sie feststellten, dass durch eine Kombination von Wurzelkanalpräparation und Spülung mit reiner Kochsalzlösung eine Elimination von 90% der Bakterien erreicht werden konnte (Siqueira et al. 1999). In einer wissenschaftlichen Stellungnahme der DGKIZ wird jedoch die Wurzelkanalpräparation der Wurzelkanaldesinfektion untergeordnet (Kühnisch et al. 2011). Entscheidend bei der Elimination von Bakterien aus dem Wurzelkanal ist nicht die Konzentration des Hypochlorits, sondern das Spülvolumen und die Zeit des Verbleibes im Wurzelkanal. Die kontinuierliche Spülung, welche mit SAF möglich wird, stellt somit einen erheblichen Vorteil für den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung dar. Es wurde an permanenten Zähnen gezeigt, dass es für die SAF zwischen verringerter Präparationszeit von nur 2 Minuten oder verlängerter Zeit bis zu 6 Minuten keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die verbliebene Bakterienpopulation im Wurzelkanal gibt (Alves et al. 2011). Insofern kann die Präparationszeit bei Milchzähnen ohne Verlust von Effektivität auf 3 Minuten pro Wurzelkanal reduziert werden.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 59

Durch die SAF wird kein apikaler Stopp präpariert, welcher für die Insertion eines konfektionierten Guttaperchastiftes nötig wäre. Im bleibenden Gebiss empfiehlt es sich daher, mit einem anderen Feilensystem eine apikale Formgebung für den Guttaperchastift durchzuführen.

Im Milchgebiss hingegen wird der Wurzelkanal mit resorbierbaren Pastensystemen gefüllt, welche keine besondere Wurzelkanalgeometrie voraussetzen.

Die SAF ist somit zur alleinigen Präparation im Milchgebiss geeignet.

Als nachteilig bei der SAF anzusehen ist die Notwendigkeit einer Gleitpfadpräparation. Zwei Zahnpaare wurden aus der Studie ausgeschlossen, nachdem die starren Handfeilen bei der Gleitpfadpräparation frakturiert waren.

7 Zusammenfassung

Ziel dieser In-vitro-Studie war es, die maschinelle Präparation von Milchzahnwurzelkanälen mit dem rotierenden Nickel-Titan-System Mtwo und mit der Self-Adjusting-File in Bezug auf Präparationszeit, Fläche der unbearbeiteten Wurzelkanalwand, Häufigkeit von Perforationen des Wurzelkanals und Volumenveränderung zu vergleichen.

Material und Methode: Aus 46 für die Studie ausgewählten Milchmolaren wurden 23 *matched pairs* gebildet und jeweils ein Zahn des Paares der Gruppe SAF, der andere der Gruppe Mtwo zugeordnet. Zunächst wurden alle Zähne mit einem rotierenden Diamanten trepaniert und die Wurzelkanäle mit einem Reamer der Größe 10 auf Gängigkeit überprüft und dabei die Arbeitslänge festgelegt. Im Anschluss erfolgte der präoperative Scan im Micro-CT Explore Locus SP (General Electric Medical Systems, Ontario, Kanada). Die Röhrenspannung betrug hierbei 90 kV und der Röhrenstrom 85 μ A .

Bei der Präparation der Gruppe Mtwo begann mit Aufnahme des ersten Instrumentes die Zeitmessung. Es erfolgte die Präparation bis zur ISO-Größe 30. Bei jedem Instrumentenwechsel wurde mit 2 ml 1%igem NaOCl gespült und die Präparation mit einer Spülung von 5 ml 10%iger Zitronensäure beendet.

Vor Benutzung der SAF ist die Präparation eines Gleitpfades nötig. Die dafür benötigte Zeit wurde in die Zeiterfassung mit einbezogen. Es erfolgte eine 3-minütige Präparation bei 5000 rpm und einer kontinuierlichen Spülung mit 1%igem Natriumhypochlorit (NaOCl) bei einer Fließrate von 4 ml/min mit Hilfe der EndoSTATION™ (ReDent NOVA, Ra'anana, Israel).

Nach beendeter Präparation erfolgte der postoperative Scan mit identischen Parametern wie beim präoperativen Scans.

Aus den Daten wurden am PC dreidimensionale Objekte rekonstruiert, welche durch Übereinanderlagerung der prä- und postoperativen Bilder auf die Parameter bearbeitete Oberfläche, Volumenveränderung und Perforationen hin ausgewertet werden konnten.

Die statistische Analyse erfolgte anhand eines ungepaarten t-Tests.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 61

Ergebnisse: In Bezug auf die iatrogen hervorgerufenen Perforationen, die bearbeitete Oberfläche und die Volumenzunahme konnte zwischen den beiden Feilensystemen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Die Wurzelkanalpräparation mit Mtwo verlief signifikant schneller als die Präparation mit SAF.

Schlussfolgerung: Auf Grund der erzielten guten bis sehr guten Ergebnisse kann die Verwendung beider Feilensysteme zur Präparation von Milchzahnwurzelkanälen empfohlen werden.

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.62

8 Literaturverzeichnis

AAE: American Association of Endodontics: Glossary of Endodontic Terms. 9.
Ausgabe; Chicago 2015

http://www.aapd.org/media/policies_guidelines/g_pulp.pdf; Zugriff am 04.11.2017

Acar B, Kamburoglu K, Tatar I, Arikan V, Celik HH, Yuksel S, Ozen T (2015):
Comparison of micro-computerized tomography and cone-beam computerized
tomography in the detection of accessory canals in primary molars. *Imaging Sci Dent*
45, 205-211

Ahamed SS, Reddy VN, Krishnakumar R, Mohan MG, Sugumaran DK, Rao AP (2012):
Prevalence of early loss of primary teeth in 5-10-year-old school children in
Chidambaram town. *Contemp Clin Dent* 3, 27-30

Ahmed HM (2013): Anatomical challenges, electronic working length determination and
current developments in root canal preparation of primary molar teeth. *Int Endod J* 46,
1011-1022

Ahmetoglu F, Keles A, Simsek N, Ocak MS, Yologlu S (2015): Comparative evaluation
of root canal preparations of maxillary first molars with self-adjusting file, reciproc single
file, and revo-s rotary file: A micro-computed tomography study. *Scanning* 37, 218-225

Al-Ostwani AO, Al-Monaqel BM, Al-Tinawi MK (2016): A clinical and radiographic study
of four different root canal fillings in primary molars. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 34,
55-59

Alves FR, Almeida BM, Neves MA, Rocas IN, Siqueira JF, Jr. (2011): Time-dependent
antibacterial effects of the self-adjusting file used with two sodium hypochlorite
concentrations. *J Endod* 37, 1451-1455

Amoroso-Silva P, Alcalde MP, Hungaro Duarte MA, De-Deus G, Ordinola-Zapata R,
Freire LG, Cavenago BC, De Moraes IG (2017): Effect of finishing instrumentation
using NiTi hand files on volume, surface area and uninstrumented surfaces in C-
shaped root canal systems. *Int Endod J* 50, 604-611

Azar MR, Mokhtare M (2011): Rotary Mtwo system versus manual K-file instruments:
efficacy in preparing primary and permanent molar root canals. *Indian J Dent Res* 22,
363

Azar MR, Safi L, Nikaein A (2012): Comparison of the cleaning capacity of Mtwo and
Pro Taper rotary systems and manual instruments in primary teeth. *Dent Res J*
(Isfahan) 9, 146-151

Barr ES, Kleier DJ, Barr NV (1999): Use of nickel-titanium rotary files for root canal
preparation in primary teeth. *Pediatr Dent* 21, 453-454

Bawazir OA, Salama FS (2006): Clinical evaluation of root canal obturation methods in
primary teeth. *Pediatr Dent* 28, 39-47

**Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.** 63

Beltrame AP, Triches TC, Sartori N, Bolan M (2011): Electronic determination of root canal working length in primary molar teeth: an in vivo and ex vivo study. *Int Endod J* 44, 402-406

Buerkle V, Meissner N: Endodontics in the Deciduous Dentition. In: Baumann M, Beer R (Hrsg.): *Endodontology*. 1. Auflage; Georg Thieme-Verlag, München 2010, 351-360

Burroughs JR, Bergeron BE, Roberts MD, Hagan JL, Himel VT (2012): Shaping ability of three nickel-titanium endodontic file systems in simulated S-shaped root canals. *J Endod* 38, 1618-1621

Camp J: Pedodontic-Endodontic Treatment. In: Cohen S, Burns R (Hrsg.): *Pathways of the Pulp*. 4. Auflage; Mosby, St.Louis 1987, 685-723

Camp J, Fuks A: Pediatric endodontics: Endodontic treatment for the primary and young, permanent dentition; in: Cohen S, Burns R (Hrsg.): *Pathways of the Pulp*. 9. Auflage; Mosby Elsevier, St. Louis 2006, 822-883

Canoglu H, Tekcicek MU, Cehreli ZC (2006): Comparison of conventional, rotary, and ultrasonic preparation, different final irrigation regimens, and 2 sealers in primary molar root canal therapy. *Pediatr Dent* 28, 518-523

Capar ID, Aydinbelge HA (2014): Effectiveness of various irrigation activation protocols and the self-adjusting file system on smear layer and debris removal. *Scanning* 36, 640-647

Chen XX, Lin BC, Zhong J, Ge LH (2015): [Degradation evaluation and success of pulpectomy with a modified primary root canal filling in primary molars]. *Beijing Da Xue Xue Bao* 47, 529-535

Coll J: Indirect Pulp Treatment, Direct Pulp Capping, and Stepwise Caries Excavation. In: Fuks A, Peretz B (Hrsg.): *Pediatric Endodontics*. 1. Auflage; Springer International Publishing, Cham 2016, 37-50

Crespo S, Cortes O, Garcia C, Perez L (2008): Comparison between rotary and manual instrumentation in primary teeth. *J Clin Pediatr Dent* 32, 295-298

Cvek M (1978): A clinical report on partial pulpotomy and capping with calcium hydroxide in permanent incisors with complicated crown fracture. *J Endod* 4, 232-237

Cvek M, Lundberg M (1983): Histological appearance of pulps after exposure by a crown fracture, partial pulpotomy, and clinical diagnosis of healing. *J Endod* 9, 8-11

Einwag J: Kinderkronen und -prothesen; in: Einwag J, Pieper K (Hrsg.): *Kinderzahnheilkunde*. 3. Auflage; Elsevier, Urban & Fischer, München, 2005, 221-232

EIAyouti A, Dima E, Judenhofer MS, Lost C, Pichler BJ (2011): Increased apical enlargement contributes to excessive dentin removal in curved root canals: a stepwise microcomputed tomography study. *J Endod* 37, 1580-1584

Engelke K, Karolczak M, Lutz A, Seibert U, Schaller S, Kalender W (1999): Micro-CT. Technologie und Applikation zur Erfassung von Knochenarchitektur. *Radiologie* 39, 203-212

http://www.ibb.cnr.it/img/eXplore_Locus_CT_manual.pdf; Zugriff am 08.11.2017

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 64

Farhin K, Viral PM, Thejokrishna P, Sajjad M (2015): Reduction in bacterial loading using MTAD as an irrigant in pulpectomized primary teeth. *J Clin Pediatr Dent* 39, 100-104

Fumes AC, Sousa-Neto MD, Leoni GB, Versiani MA, da Silva LA, da Silva RA, Consolaro A (2014): Root canal morphology of primary molars: a micro-computed tomography study. *Eur Arch Paediatr Dent* 15, 317-326

Gambill JM, Alder M, del Rio CE (1996): Comparison of nickel-titanium and stainless steel hand-file instrumentation using computed tomography. *J Endod* 22, 369-375

Govindaraju L, Jeevanandan G, Subramanian EMG (2017): Comparison of quality of obturation and instrumentation time using hand files and two rotary file systems in primary molars: A single-blinded randomized controlled trial. *Eur J Dent* 11, 376-379

Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Testarelli L, D'Ambrosio F, Pecci R, Bedini R (2012): Present and future in the use of micro-CT scanner 3D analysis for the study of dental and root canal morphology. *Ann Ist Super Sanita* 48, 26-34

Grund K, Goddon I, Schuler IM, Lehmann T, Heinrich-Weltzien R (2015): Clinical consequences of untreated dental caries in German 5- and 8-year-olds. *BMC Oral Health* 15, 140

Harini Priya M, Bhat SS, Sundeep Hegde K (2010): Comparative evaluation of bactericidal potential of four root canal filling materials against microflora of infected non-vital primary teeth. *J Clin Pediatr Dent* 35, 23-29

Hof R, Perevalov V, Eltanani M, Zary R, Metzger Z (2010): The self-adjusting file (SAF). Part 2: mechanical analysis. *J Endod* 36, 691-696

Holan G, Fuks AB (1993): A comparison of pulpectomies using ZOE and KRI paste in primary molars: a retrospective study. *Pediatr Dent* 15, 403-407

Hsu JT, Chen YJ, Ho JT, Huang HL, Wang SP, Cheng FC, Wu J, Tsai MT (2014): A comparison of micro-CT and dental CT in assessing cortical bone morphology and trabecular bone microarchitecture. *PLoS One* 9, e107545

Hülsmann M, Wiegand A: Endodontie im Milch- und Wechselgebiss. In: Einweg J, Pieper K (Hrsg.): *Kinderzahnheilkunde*. 3. Auflage; Elsevier, Urban & Fischer, München, 2005 249-267

Kakani AK, Veeramachaneni C, Majeti C, Tummala M, Khiyani L (2015): A Review on Perforation Repair Materials. *J Clin Diagn Res* 9, Ze09-13

Katge F, Patil D, Poojari M, Pimpale J, Shitoot A, Rusawat B (2014): Comparison of instrumentation time and cleaning efficacy of manual instrumentation, rotary systems and reciprocating systems in primary teeth: an in vitro study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 32, 311-316

Kaya E, Elbay M, Yigit D (2017): Evaluation of the Self-Adjusting File system (SAF) for the instrumentation of primary molar root canals: a micro-computed tomographic study. *Eur J Paediatr Dent* 18, 105-110

Kocak MM, Cirakoglu NY, Kocak S, Saglam BC, Cicek E, Turker SA, Bodrumlu E (2017): Effect of retreatment instruments on microcrack formation: a microcomputed tomography study. *Int J Artif Organs*, 40, 123-127

**Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.** 65

Kocak S, Kocak MM, Saglam BC, Aktas E (2014): Efficacy of three irrigation agitation techniques on bacterial elimination: a microbiologic and microscopic evaluation. *Scanning* 36, 512-516

Koshy S, Love RM (2004): Endodontic treatment in the primary dentition. *Aust Endod J* 30, 59-68

Krämer N (2012): Zur Indikation von Lückenthaltern in der Kinderzahnheilkunde. *Oralprophylaxe & Kinderzahnheilkunde* 34, 102-104

Kuhn G, Jordan L (2002): Fatigue and mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 28, 716-720

Kühnisch J, Heinrich-Weltzien R, Schäfer E (2011):
https://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/2011-03-25_Stellungnahme__MZ-Endo_korrigiert.pdf: Zugriff am 08.11.2017

Kummer TR, Calvo MC, Cordeiro MM, de Sousa Vieira R, de Carvalho Rocha MJ (2008): Ex vivo study of manual and rotary instrumentation techniques in human primary teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 105, e84-92

Kurthukoti AJ, Sharma P, Swamy DF, Shashidara R, Swamy EB (2015): Computed Tomographic Morphometry of the Internal Anatomy of Mandibular Second Primary Molars. *Int J Clin Pediatr Dent* 8, 202-207

Lacerda M, Marceliano-Alves MF, Perez AR, Provenzano JC, Neves MAS, Pires FR, Goncalves LS, Rocas IN, Siqueira JF, Jr. (2017): Cleaning and shaping oval canals with 3 instrumentation systems: A correlative micro-computed tomographic and histologic study. *J Endod* 43, 1878-1884

Lenhard M, Staehle HH: Endodontologie bei Kindern und Jugendlichen. In: Staehle H, Koch M (Hrsg.): *Kinder- und Jugendzahnheilkunde: Kompendium für Studierende und Erwachsene*. 1. Auflage; Deutscher Ärzte-Verlag, Köln 1996, 229-244

Llewelyn DR (2000): UK National Clinical Guidelines in Paediatric Dentistry. The pulp treatment of the primary dentition. *Int J Paediatr Dent* 10, 248-252

Louwakul P, Prucksathamrongkul W (2012): The effect of 2% chlorhexidine as root canal irrigant in pulpectomies of primary molars. *Pediatr Dent* 34, e192-196

Madan N, Rathnam A, Shigli AL, Indushekar KR (2011): K-file vs ProFiles in cleaning capacity and instrumentation time in primary molar root canals: an in vitro study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 29, 2-6

Makarem A, Ravandeh N, Ebrahimi M (2014): Radiographic assessment and chair time of rotary instruments in the pulpectomy of primary second molar teeth: a randomized controlled clinical trial. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 8, 84-89

Mason C: Endodontische Behandlung der Milchzähne. In: Heidemann D (Hrsg.): *Endodontie*. 4. Auflage; Elsevier, Urban & Fischer, München 2005, 307-312

Mejare I: Endodontics in Primary Teeth. In: Bergenholtz G, Hørsted-Bindslev P, Reit C (Hrsg.): *Textbook of Endodontology*. 3. Auflage; Wiley-Blackwell, Chichester 2015, 73-88

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 66

Mejare I, Cvek M (1993): Partial pulpotomy in young permanent teeth with deep carious lesions. *Endod Dent Traumatol* 9, 238-242

Mello BZ, Stafuzza TC, Vitor LL, Rios D, Machado MA, Oliveira TM (2016): Alternative approach for carious tissue removal in primary teeth. *Eur Arch Paediatr Dent* 17, 413-417

Metzger Z (2014): The self-adjusting file (SAF) system: An evidence-based update. *J Conserv Dent* 17, 401-419

Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R (2010): The self-adjusting file (SAF). Part 1: respecting the root canal anatomy--a new concept of endodontic files and its implementation. *J Endod* 36, 679-690

<http://microctworld.net/the-history-of-microct/>; Zugriff am 08.11.2017

Miyamoto W, Chung CS, Yee PK (1976): Effect of premature loss of deciduous canines and molars on malocclusion of the permanent dentition. *J Dent Res* 55, 584-590

Moskovitz M, Sammara E, Holan G (2005): Success rate of root canal treatment in primary molars. *J Dent* 33, 41-47

Moskovitz M, Tickotsky N: Pulpotomy and Root Canal Treatment (RCT) in Primary Teeth: Techniques and Materials. In: Fuks AB, Peretz B (Hrsg.): *Pediatric Endodontics*. 1. Auflage; Springer International Publishing, Cham 2016, 71-102

Moskovitz M, Yahav D, Tickotsky N, Holan G (2010): Long-term follow up of root canal treated primary molars. *Int J Paediatr Dent* 20, 207-213

Musale PK, Mujawar SA (2014): Evaluation of the efficacy of rotary vs. hand files in root canal preparation of primary teeth in vitro using CBCT. *Eur Arch Paediatr Dent* 15, 113-120

Nagaratna PJ, Shashikiran ND, Subbareddy VV (2006): In vitro comparison of NiTi rotary instruments and stainless steel hand instruments in root canal preparations of primary and permanent molar. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 24, 186-191

Nazari Moghaddam K, Mehran M, Farajian Zadeh H (2009): Root canal cleaning efficacy of rotary and hand files instrumentation in primary molars. *Iran Endod J* 4, 53-57

Nuni E: Pulp Therapy for the Young Permanent Dentition. In: Fuks AB, Peretz B (Hrsg.): *Pediatric Endodontics*. 1. Auflage; Springer International Publishing, Cham 2016, 117-148

Ochoa-Romero T, Mendez-Gonzalez V, Flores-Reyes H, Pozos-Guillen AJ (2011): Comparison between rotary and manual techniques on duration of instrumentation and obturation times in primary teeth. *J Clin Pediatr Dent* 35, 359-363

Paque F, Peters OA (2011): Micro-computed tomography evaluation of the preparation of long oval root canals in mandibular molars with the self-adjusting file. *J Endod* 37, 517-521

Pascon FM, Kantovitz KR, Borges AF, Puppini-Rontani RM (2007): Effect of cleansers and irrigation methods on primary root dentin permeability. *J Dent Child (Chic)* 74, 30-35

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 67

Peters OA, Boessler C, Paque F (2010): Root canal preparation with a novel nickel-titanium instrument evaluated with micro-computed tomography: canal surface preparation over time. *J Endod* 36, 1068-1072

Peters OA, Paque F (2011): Root canal preparation of maxillary molars with the self-adjusting file: a micro-computed tomography study. *J Endod* 37, 53-57

Pieper K: Zahnanomalien und ihre Versorgung. In: Einwag J, Pieper K (Hrsg.): *Kinderzahnheilkunde*. 3. Auflage; Elsevier, Urban & Fischer, München 2005, 297-311

Pinheiro SL, Araujo G, Bincelli I, Cunha R, Bueno C (2012): Evaluation of cleaning capacity and instrumentation time of manual, hybrid and rotary instrumentation techniques in primary molars. *Int Endod J* 45, 379-385

Pinky C, Shashibhushan KK, Subbareddy VV (2011): Endodontic treatment of necrosed primary teeth using two different combinations of antibacterial drugs: an in vivo study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 29, 121-127

Poornima P, Disha P, Nagaveni NB, Roopa KB, Bharath KP, Neena IE (2016): 'Volumetric analysis of hand and rotary root canal instrumentation and filling in primary teeth using Spiral Computed Tomography' - an invitro study. *Int J Paediatr Dent* 26, 193-198

Prabhakar AR, Yavagal C, Dixit K, Naik SV (2016): Reciprocating vs Rotary Instrumentation in Pediatric Endodontics: Cone Beam Computed Tomographic Analysis of Deciduous Root Canals using Two Single-file Systems. *Int J Clin Pediatr Dent* 9, 45-49

Pramila R, Muthu MS, Deepa G, Farzan JM, Rodrigues SJ (2016): Pulpectomies in primary mandibular molars: a comparison of outcomes using three root filling materials. *Int Endod J* 49, 413-421

Ramar K, Mungara J (2010): Clinical and radiographic evaluation of pulpectomies using three root canal filling materials: an in-vivo study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 28, 25-29

Ramazani N, Mohammadi A, Amirabadi F, Ramazani M, Ehsani F (2016): In vitro investigation of the cleaning efficacy, shaping ability, preparation time and file deformation of continuous rotary, reciprocating rotary and manual instrumentations in primary molars. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 10, 49-56

Ramezanali F, Afkhami F, Soleimani A, Kharrazifard MJ, Rafiee F (2015): Comparison of Cleaning Efficacy and Instrumentation Time in Primary Molars: Mtwo Rotary Instruments vs. Hand K-Files. *Iran Endod J* 10, 240-243

Rewal N, Thakur AS, Sachdev V, Mahajan N (2014): Comparison of endoflas and zinc oxide eugenol as root canal filling materials in primary dentition. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 32, 317-321

Rocha MJ, Cardoso M (2004): Federal University of Santa Catarina endodontic treatment of traumatized primary teeth - part 2. *Dent Traumatol* 20, 314-326

Rubio J, Zarzosa JI, Pallares A (2015): A Comparative Study of Shaping Ability of four Rotary Systems. *Acta Stomatol Croat* 49, 285-293

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 68

Ruckman JE, Whitten B, Sedgley CM, Svec T (2013): Comparison of the self-adjusting file with rotary and hand instrumentation in long-oval-shaped root canals. *J Endod* 39, 92-95

Ruiz-Esparza CL, Garrocho-Rangel A, Gonzalez-Amaro AM, Flores-Reyes H, Pozos-Guillen AJ (2011): Reduction in bacterial loading using 2% chlorhexidine gluconate as an irrigant in pulpectomized primary teeth: a preliminary report. *J Clin Pediatr Dent* 35, 265-270

Sant'Anna Junior A, Cavenago BC, Ordinola-Zapata R, De-Deus G, Bramante CM, Duarte MA (2014): The effect of larger apical preparations in the danger zone of lower molars prepared using the Mtwo and Reciproc systems. *J Endod* 40, 1855-1859

Schäfer E, Erler M, Dammaschke T (2006): Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J* 39, 196-202

Schneider SW (1971): A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 32, 271-275

Sevekar SA, Gowda SHN (2017): Postoperative Pain and Flare-Ups: Comparison of Incidence Between Single and Multiple Visit Pulpectomy in Primary Molars. *J Clin Diagn Res* 11, Zc09-zc12

Shivashankar MB, Niranjana NT, Jayasheel A, Kenchanagoudra MG (2016): Computed Tomography Evaluation of Canal Transportation and Volumetric Changes in Root Canal Dentin of Curved Canals Using Mtwo, ProTaper and ProTaper Next Rotary System-An In-vitro Study. *J Clin Diagn Res* 10, Zc10-zc14

Silva LA, Leonardo MR, Nelson-Filho P, Tanomaru JM (2004): Comparison of rotary and manual instrumentation techniques on cleaning capacity and instrumentation time in deciduous molars. *J Dent Child (Chic)* 71, 45-47

Siqueira JF, Jr., Lima KC, Magalhaes FA, Lopes HP, de Uzeda M (1999): Mechanical reduction of the bacterial population in the root canal by three instrumentation techniques. *J Endod* 25, 332-335

Smail-Faugeron V, Porot A, Muller-Bolla M, Courson F (2016): Indirect pulp capping versus pulpotomy for treating deep carious lesions approaching the pulp in primary teeth: a systematic review. *Eur J Paediatr Dent* 17, 107-112

Solomonov M, Paque F, Fan B, Eilat Y, Berman LH (2012): The challenge of C-shaped canal systems: a comparative study of the self-adjusting file and ProTaper. *J Endod* 38, 209-214

Sonmez D, Duruturk L (2008): Ca(OH)₂ pulpotomy in primary teeth. Part I: internal resorption as a complication following pulpotomy. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 106, e94-98

Stallaert KM, Sigal MJ, Titley KC, Andrews PB (2016): A retrospective study of root canal therapy in non-vital primary molars. *Eur J Paediatr Dent* 17, 295-300

Stock SR: *MicroComputed Tomography: Methodology and Applications*. CRC Press, Boca Raton 2011

Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here.
Error! Use the Home tab to apply Überschrift 1 to the text that you want to appear here. 69

Stöckli P: Gesichts- und Kieferwachstum und Entwicklung der Dentition. In: Rateitschak K, Wolf H (Hrsg.): Farbatlant der Zahnmedizin- Band 17 Kinderzahnheilkunde. 2. Auflage; Georg Thieme-Verlag, Stuttgart 2001, 1-28

Swain MV, Xue J (2009): State of the art of Micro-CT applications in dental research. Int J Oral Sci 1, 177-188

Topcu KM, Karatas E, Ozsu D, Ersoy I (2014): Efficiency of the Self Adjusting File, WaveOne, Reciproc, ProTaper and hand files in root canal debridement. Eur J Dent 8, 326-329

Uroz-Torres D, Gonzalez-Rodriguez MP, Ferrer-Luque CM (2009): Effectiveness of a manual glide path on the preparation of curved root canals by using Mtwo rotary instruments. J Endod 35, 699-702

Vallaes K, Chevalier V, Arbab-Chirani R (2016): Comparative analysis of canal transportation and centring ability of three Ni-Ti rotary endodontic systems: Protaper(R), MTwo(R) and Revo-S, assessed by micro-computed tomography. Odontology 104, 83-88

Versiani MA, Leoni GB, Steier L, De-Deus G, Tassani S, Pecora JD, de Sousa-Neto MD (2013): Micro-computed tomography study of oval-shaped canals prepared with the self-adjusting file, Reciproc, WaveOne, and ProTaper universal systems. J Endod 39, 1060-1066

Vieira-Andrade RG, Drumond CL, Alves LP, Marques LS, Ramos-Jorge ML (2012): Inflammatory root resorption in primary molars: prevalence and associated factors. Braz Oral Res 26, 335-340

Viergutz G: Endodontische Behandlung im Milchgebiss. In: Klimm W (Hrsg.): Endodontologie- Grundlagen und Praxis. Deutscher Ärzte-Verlag, Köln 2003, 283-294

Weisshaar S (2001): Endodontie im Milch-und Wechselgebiss - Grundlagen, Pathologien und Diagnostik. Quintessenz 52, 261-269

Yang G, Yuan G, Yun X, Zhou X, Liu B, Wu H (2011): Effects of two nickel-titanium instrument systems, Mtwo versus ProTaper universal, on root canal geometry assessed by micro-computed tomography. J Endod 37, 1412-1416

Yanko N, Khmil O, Kaskova L, Vashchenko I (2016): Advanced endodontic developments in pulpectomy of primary teeth. Wiad Lek 69, 223-227

Zuolo ML, Zaia AA, Belladonna FG, Silva E, Souza EM, Versiani MA, Lopes RT, De-Deus G (2017): Micro-CT assessment of the shaping ability of four root canal instrumentation systems in oval-shaped canals. Int Endod J 51, 564-571

Danksagung

Mein größter Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Hülsmann für die Überlassung des Dissertationsthemas und die Hilfe bei der Ausarbeitung des Versuchsaufbaus.

Dank der herausragenden Betreuung und außerordentlich schnellen Korrekturen konnte die Arbeit erfolgreich zu Ende geführt werden

Ein weiterer Dank gilt Herrn Dipl.-Phys. Christian Dullin für die engagierte Einarbeitung in das Micro-CT und zuverlässige Beantwortung aller auftretenden Fragen.

Ich danke Herrn Dr. Christofzik für die Hilfe bei der Statistik mit Erstellung der zugehörigen Graphiken.

Lebenslauf

Am 18.07.1990 wurde ich als erste Tochter von Anja Hohmann und Hans-Joachim Müller in Hannover geboren.

Im Sommer 1996 wurde ich in der Grundschule Wasserkampstraße eingeschult, besuchte im Anschluss die Orientierungsstufe im Schulzentrum Bemerode und wechselte von dort auf das Gymnasium Sophienschule Hannover, an welchem ich nach einem Auslandsschuljahr 2006/2007 an der Escola Secundária Vergílio Ferreira, Lisboa, Portugal, meine Abiturprüfungen absolvierte und somit die allgemeine Hochschulreife erhielt.

Im Oktober 2009 begann ich das Studium der Zahnheilkunde an der Georg-August-Universität Göttingen, welches ich am 1.12.2014 mit dem Staatsexamen abschloss.

Im April 2015 nahm ich meine zahnärztliche Tätigkeit in der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Kariologie und Parodontologie auf. Parallel begann die Arbeit an der vorliegenden Promotion.

Seit dem 1.12.2017, mit Beendigung der Promotion, arbeite ich in Berlin bei kidsdocs-Zahnärzte für Kinder.