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

**Sauberkeit von Milchzahnwurzelkanälen
nach Präparation mit unterschiedlichen
Nickel-Titan-Systemen
- Eine REM-Studie**

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

vorgelegt von

Kieu Minh Phan

aus

Herne

Göttingen 2022

Dekan: Prof. Dr. med. W. Brück

Betreuungsausschuss

Betreuer/in: Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann

Ko-Betreuer/in: Prof. Dr. med. dent. R. Bürgers

Prüfungskommission

Referent/in Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann

Ko-Referent/in: Prof. Dr. med. dent. R. Bürgers

Drittreferent/in: Prof. Dr. med. T. Meyer

Datum der mündlichen Prüfung:

.....

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel "**Sauberkeit von Milchzahnwurzelkanälen nach Präparation mit unterschiedlichen Nickel-Titan-Systemen - Eine REM-Studie**" eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den

(Unterschrift)

Die Daten, auf denen die vorliegende Arbeit basiert, wurden teilweise publiziert:

Baxter S, Phan KM, Hülsmann M (2021). In vitro evaluation of root canal wall cleanliness in primary molars after preparation with Self-Adjusting-File (SAF) or Mtwo NiTi-instruments and final irrigation. *Eur J Paediatr Dent* 22, 10–14

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
1 Einleitung.....	1
1.1 Endodontie an Milchzähnen	2
1.1.1 Therapiemöglichkeiten: Pulpotomie, Pulpektomie, Extraktion	2
1.1.2 Ursachen und Ziele endodontischer Behandlungen an Milchzähnen	3
1.1.3 Indikationen und Kontraindikationen zur Wurzelkanalbehandlung	3
1.1.4 Komplikationen und Alternativen in der Milchzahnendodontie	4
1.1.5 Folgen vorzeitiger Milchzahnextraktion.....	4
1.1.6 Erfolgsrate von Wurzelkanalbehandlungen im Milchgebiss.....	5
1.1.7 Der Effekt der Reinigungswirkung auf den Behandlungserfolg	6
1.2 Anatomie und Morphologie der Wurzelkanäle von Milchzähnen	7
1.2.1 Vergleich von Milchmolaren und permanenten Zähnen.....	7
1.2.2 Krone der Milchmolaren	8
1.2.3 Wurzel und Pulpa der Milchmolaren	8
1.3 Wurzelkanalpräparationen an Milchzähnen.....	9
1.3.1 Vergleich der manuellen und maschinellen Wurzelkanalpräparation an Milchzähnen.....	10
1.4 Die verwendeten maschinellen NiTi-Systeme	12
1.4.1 Das Self-Adjusting File-System.....	12
1.4.2 Studien zu Self-Adjusting File	13
1.4.3 Reinigungswirkung der Self-Adjusting File	14
1.4.4 Das Mtwo-System.....	16
1.4.5 Studien zu Mtwo	16
1.4.6 Reinigungswirkung von Mtwo.....	17
1.5 <i>Smear layer</i>	18
1.6 Chemische Desinfektion.....	19
1.6.1 Natriumhypochlorit.....	19
1.6.2 Zitronensäure.....	20
1.7 Desinfektionstechniken.....	20
1.8 Methode zur Untersuchung von <i>smear layer</i> und Debris.....	21
1.9 Ziel der Studie.....	21

2	Material und Methoden	22
2.1	Auswahl der Zähne.....	22
2.1.1	Bestimmung der Zahngruppen anhand der Wurzelkanalmorphologie	23
2.1.2	Präoperative Micro-CT Scans	24
2.2	Einteilung der zwei Versuchsgruppen.....	24
2.3	Versuchsdurchführung	25
2.3.1	Präparation Gruppe SAF	26
2.3.2	Präparation Gruppe Mtwo	26
2.4	Herstellung der Präparate für das REM.....	26
2.5	Auswertung der REM-Bilder.....	28
2.5.1	<i>Smear layer</i> Scores	28
2.5.2	Kalibrierung der Untersucher	30
2.6	Statistische Auswertung	30
3	Ergebnisse	31
3.1	Reliabilität der Observer	31
3.2	Beurteilung der Reinigungswirkung (<i>smear layer</i>)	31
3.2.1	Reinigungswirkung in der Gruppe Mtwo	33
3.2.2	Reinigungswirkung in der Gruppe SAF.....	34
3.3	Reinigungswirkung im Gruppenvergleich	35
3.4	Statistik.....	35
4	Diskussion	37
4.1	Diskussion von Material und Methode	37
4.1.1	Auswahl der Zähne und Gruppenzuordnung.....	37
4.1.2	Auswahl der Präparationssysteme.....	38
4.1.3	Auswahl der chemischen Desinfektion	40
4.1.4	Herstellung der Proben für das REM.....	42
4.1.5	Auswertung der REM-Aufnahmen	43
4.2	Diskussion der Ergebnisse.....	44
4.2.1	Reinigungswirkung Mtwo	45
4.2.2	Reinigungswirkung SAF	46
4.3	Abschließende Bewertung beider Systeme.....	47
5	Zusammenfassung	48
6	Anhang	50
6.1	Materialliste und Herstellerverzeichnis	50
7	Literaturverzeichnis	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich Milchmolar und permanenter Molar	7
Abbildung 2: SAF-Feile	13
Abbildung 3: Mtwo-Feilen	16
Abbildung 4: REM-Bild sauberer Dentintubuli.....	21
Abbildung 5: Aufbewahrung der Zähne.....	23
Abbildung 6: Flussdiagramm zur Versuchsdurchführung.....	25
Abbildung 7: Wurzelkanäle blockiert, resorbierte Wurzeln	27
Abbildung 8: Präparierte longitudo-nale Sollbruchstellen	27
Abbildung 9: Trocknung der auf Nieten fixierten Wurzelhälften	27
Abbildung 10: Proben im Fein-vakuum zur Besputterung	28
Abbildung 11: Proben nach Besputterung	28
Abbildung 12: Score 1.....	29
Abbildung 13: Score 2.....	29
Abbildung 14: Score 3.....	29
Abbildung 15: Score 4.....	30
Abbildung 16: Prozentuale Verteilung der Scores für den <i>smear layer</i>	32
Abbildung 17: Verteilung der <i>smear layer</i> -Scores der Gruppe Mtwo.....	33
Abbildung 18: Verteilung der <i>smear layer</i> -Scores der Gruppe SAF	34
Abbildung 19: Wurzelkanal mit Instrumentenfragment.....	43
Abbildung 20: Wurzelkanal mit apikaler Verblockung.....	43
Abbildung 21: Unklare Differenzierung der Sauberkeitsbewertung	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der maschinellen Präparation	10
Tabelle 2: Kriterien für die Auswahl der Zähne	22
Tabelle 3: Intra- und Interindividuelle Reliabilität (Cohen's Kappa).....	31
Tabelle 4: Verteilung der Reinigungsparameter	31
Tabelle 5: Gruppenvergleich zwischen SAF und Mtwo	35
Tabelle 6: Vergleich nach Lokalisation.....	36
Tabelle 7: Materialliste und Herstellerangaben.....	50

Abkürzungsverzeichnis

CHX	Chlorhexidin
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
<i>E. faecalis</i>	<i>Enterococcus faecalis</i>
ECC	<i>Early childhood caries</i>
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
NiTi	Nickel-Titan
REM	Rasterelektronenmikroskop
SAF	<i>Self-Adjusting File</i>

1 Einleitung

Die Endodontie stellt bei Erkrankungen der Pulpa eine der letzten Möglichkeiten zum Erhalt des natürlichen Zahnes dar. Sie befasst sich mit der funktionellen und morphologischen Einheit der Zahnpulpa, des Pulpa-Dentin-Komplexes und der periradikulären Gewebe, um dort Erkrankungen zu verhindern, zu erkennen und zu therapieren.

Ziele der Wurzelkanalbehandlung an Milchzähnen sind die temporäre Zahnerhaltung, bei Nicht-Anlagen der permanenten Zähne auch eine permanente Zahnerhaltung, die Schmerzfreiheit, die Prävention einer Infektion des nachfolgenden Zahnkeims und das Verhindern einer vorzeitigen Extraktion, um eine normale Gebissfunktion und Gesichtsentwicklung zu sichern. Ist der Zeitpunkt eines Zahnwechsels physiologisch noch nicht erreicht, dient der Zahnerhalt durch die Wurzelkanalbehandlung der Milchmolaren als wichtige Maßnahme, um die natürliche Platzhalterfunktion für die nachfolgenden permanenten Zähne zu erhalten und um einen Fehlstand und die damit verbundenen Komplikationen zu verhindern.

Die Grundvoraussetzungen einer erfolgreichen Wurzelkanalbehandlung sind eine effektive chemo-mechanische Präparation und eine gründliche Reinigung des gesamten, komplexen Wurzelkanalsystems. So ist es möglich, entzündetes oder nekrotisches Gewebe und ggf. Bakterien aus möglichst allen Bereichen der Wurzeln zu entfernen und eine Reinfektion zu verhindern (Hülsmann et al. 2005). Das besonders komplexe und filigrane Wurzelkanalsystem der Milchzähne erfordert Techniken, die effektiv reinigen und zugleich zeitsparend und schonend sind (Ahmed 2013).

An den permanenten Zähnen hat sich die maschinelle Präparation besonders an gekrümmten Wurzelkanälen bereits bewährt (Foschi et al. 2004; Peters und Paque 2010). Einige Studien bestätigen die Eignung rotierender Nickel-Titan-Systeme auch an Milchzähnen (Barr et al. 2000; Nagaratna et al. 2006; Chauhan et al. 2019; Panchal et al. 2019a).

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit dem Vergleich der beiden maschinellen Nickel-Titan-Systeme *Self-Adjusting-File* (SAF) und *Mtwo* an Milchzähnen unter besonderer Berücksichtigung der Reinigungswirkung.

1.1 Endodontie an Milchzähnen

Obwohl die Kariesinzidenz besonders in industriellen Ländern einen wesentlichen Rückgang von bis zu 75 % gemacht hat (Marthaler 2004), wurde für Kinder aus sozioökonomisch schwachen Verhältnissen und aus Migrationsländern eine Zunahme der Kariesprävalenz beobachtet. Eine besorgniserregend steigende Tendenz bei jungen Kindern im Alter von zwei bis fünf Jahren wurde weltweit festgestellt und wird als *early childhood caries* (ECC) bezeichnet, die sowohl die Lebensqualität der Kinder als auch der Eltern senken kann (Berkowitz 2003; Curzon und Preston 2004; Pitts et al. 2007; Edelstein und Chinn 2009; Tinanoff et al. 2019; Corrêa-Faria et al. 2020). Es wird von einer Polarisierung der Karies gesprochen (Cholmakow-Bodechtel et al. 2016): die Karieserkrankung nimmt zwar ab, aber die wenigen Betroffenen weisen meist großen Behandlungsbedarf auf. Da eine Milchzahnkaries oft unbemerkt verläuft, kommt es schneller zu einer Pulpabeteiligung als an bleibenden Zähnen. Dann ist häufig eine endodontische Therapie notwendig.

1.1.1 Therapiemöglichkeiten: Pulpotomie, Pulpektomie, Extraktion

Das Behandlungsspektrum der Endodontie im Milchgebiss beinhaltet die Versorgung der Dentinwunde durch die indirekte Überkappung, die direkte Überkappung, die Pulpotomie, die Pulpektomie und Wurzelkanalfüllung.

Die Pulpotomie hat sich als sichere Standardbehandlung bei einer irreversibel entzündeten, asymptomatischen Milchzahnpulpa etabliert (Hülsmann 2008). Dabei wird die Kronenpulpa bis zu den Wurzelkanaleingängen entfernt, adäquat gedeckt und der Erhalt der Wurzelpulpa angestrebt.

Nach dem aktuellen Stand bleibt die Therapie einer nekrotischen, infizierten Milchzahnpulpa problematisch (Hülsmann 2008). Die Wurzelpulpa ist in dem Fall nicht mehr erhaltungswürdig. Der Zahnarzt muss sich zwischen einer Pulpektomie, einer Extraktion oder einer Kompromissbehandlung entscheiden.

Keine dauerhaften Therapieoptionen stellen das Belassen unbehandelter kariöser und nekrotischer Milchzähne dar, sowie das „Offenlassen“ und das Herunterschleifen der Milchzähne auf Gingiva-Niveau. Diese Methoden sind mit der Gefahr einer erhöhten pathologischen Keimbelastung im Parodont, Endodont und in der Mundhöhle verbunden und können sowohl die Mundhygiene negativ beeinflussen, als auch zu Strukturanomalien der bleibenden Zähne, zu sog. Turnerzähnen führen (Cohen et al. 1960; Winter und Kramer 1972; Valderhaug 1974).

1.1.2 Ursachen und Ziele endodontischer Behandlungen an Milchzähnen

Das primäre Ziel besteht darin, dem Kind Schmerzfreiheit zu gewährleisten und den Zahn funktionell zu erhalten. Sind bereits Keime in die Milchzahnwurzelpulpa vorgedrungen, ist das Therapieziel die Keimreduzierung, um die präeruptive Schädigung der nachfolgenden Zähne zu vermeiden.

Die Gründe pulpaler Erkrankungen sind vielfältig. Sowohl Infektionen als auch mechanische, thermische, osmotische und chemisch-toxische Ursachen werden beschrieben (Heidemann et al. 2005). Die Infektion durch eine Karies ist der häufigste Grund, der zu einer endodontischen Milchzahntherapie oder Exzision führt (Holt et al. 2000; Hughes und Alsheneifi 2001; Mansour Ockell und Bågesund 2010). Seltener tritt eine traumatische Pulpaexposition auf, die meist mit einer partiellen Pulpotomie erfolgreich therapiert werden kann (Ram und Holan 1994; Kupietzky und Holan 2003).

Durch den Versuch, therapiebedürftige Zähne zu erhalten, soll dem heranwachsenden Kind ein physiologischer und gesunder Zahnwechsel ermöglicht werden, womit eine natürliche Gebiss-, Kiefer- und Gesichtsentwicklung verbunden ist. Weitere entscheidende Faktoren sind der Erhalt der Kaufunktion, der Phonetik und der Ästhetik im Frontzahnbereich.

1.1.3 Indikationen und Kontraindikationen zur Wurzelkanalbehandlung

Die Indikationen und Kontraindikationen einer Pulpektomie bei Milchzähnen sind in den Stellungnahmen der Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) definiert: weist der Milchzahn eine irreversible Pulpitis oder eine infizierte Nekrose auf, ist eine Wurzelkanalbehandlung indiziert (Kühnisch et al. 2011). Voraussetzung für die Milchzahnwurzelkanaltherapie ist eine gute Prognose des betroffenen Zahnes. Er sollte ein bis zwei Jahre vor seinem physiologischen Ausfall erhalten werden können, da nach diesem Zeitpunkt der nachfolgende Zahn bereits einen festen Platz im Kieferkamm besitzt. Außerdem sollte der zu behandelnde Zahn kaum bis wenig resorbiert sein (AAPD 2016). Nach der Stellungnahme der DGZMK zur Endodontie im Milchgebiss besteht eine Kontraindikation, wenn mehr als ein Drittel der Wurzellänge physiologisch oder pathologisch resorbiert ist. Die Zahnkrone sollte in einem restaurierbaren Zustand sein und der Zahn keinen erhöhten Lockerungsgrad aufweisen (Borutta und Heinrich-Weltzien 2002). Nicht erhaltungswürdig sind Milchzähne mit internen Resorptionen und Entzündungsprozessen im interradikulären oder periapikalen Bereich (Rodd et al. 2006).

Insgesamt ist die Indikation zu einer endodontischen Behandlung individuell zu entscheiden; bei einem stark vernachlässigten Gebiss und schlechter Compliance sollte man sich für eine Extraktion oder eine Kompromisslösung entscheiden, da eine adäquate Trockenlegung bei endodontischen Therapien notwendig ist. In diesen Fällen ist die Extraktionstherapie einer aufwändigen endodontischen Behandlung vorzuziehen. Bei vorzeitigem Milchzahnverlust ist ein geeigneter Platzhalter mit nachfolgender Lückenkontrolle indiziert (Hetzer 2004).

1.1.4 Komplikationen und Alternativen in der Milchzahnendodontie

Eine zahnärztliche Behandlung bei Kindern stellt für viele Zahnärzte eine Herausforderung dar. Der Zahnarzt muss die Besonderheiten der Milchzahnmorphologie kennen und den nachfolgenden Zahnkeim beachten, der bei einer radikulären Entzündung geschädigt werden kann. Auch die eingeschränkte Mundöffnung stellt vor allem im Molarenbereich eine Limitation dar. Die endodontische Diagnostik ist der Schlüssel zur Therapiewahl, welche jedoch an Milchzähnen komplizierter ist als an permanenten Zähnen. Der Grund dafür ist die Variabilität der Schmerzempfindung, die nicht immer eindeutig zu interpretieren ist, da sich gleichzeitig avitale und vitale Pulpaanteile in einem resorbierten Milchzahn befinden können (Magnusson 1980; Monteiro et al. 2009). Auch die Durchführung der Röntgendiagnostik kann durch die eingeschränkte Kooperationsfähigkeit der Patienten zu einem Problem führen. Bei besonders jungen Patienten treten zusätzlich kommunikative Komplikationen auf. Die Therapie ist von der psychischen und physischen Belastbarkeit des Kindes abhängig. Psychologisch sind Kinder ängstlicher, werden schneller panisch und fühlen sich hilflos, sodass die Behandlungsbereitschaft oft nicht gegeben ist. Geduld, Einfühlsamkeit und Konzentration sind wichtige Eigenschaften, über die der Zahnarzt bei der Behandlung mit Kindern verfügen muss.

1.1.5 Folgen vorzeitiger Milchzahnextraktion

Das Alter und die Durchbruchszeiten sind maßgebend für die Therapiewahl bei Milchzähnen. Als Faustregel kann unter Berücksichtigung des individuellen, wachstumsbedingten dentalen Alters im Alter von zehn Jahren eine Extraktion der nicht erhaltungswürdigen Milchzähne als adäquate Therapie angesehen werden. Man spricht von einer vorzeitigen Milchzahnextraktion, wenn sie über ein Jahr vor dem physiologischen Zahnwechsel stattfindet. Hinweise darauf sind der Wachstumsstatus der Wurzel des permanenten Zahnes, der weniger als 75 % ausgebildet ist oder eine Dicke des Alveolarknochens über dem Zahnkeim von mehr als 1 mm (Brothwell 1997; Hetzer 2004).

Ein vorzeitiger Verlust ohne weitere Therapie kann zu Zahn- und Kieferfehlstellungen führen und kieferorthopädische und entwicklungsbedingte funktionelle Probleme auslösen wie z.B. Zahnkeimverlagerungen und daraus resultierende Engstände und Durchbruchstörungen (Rönnerman 1977; Pedersen et al. 1978; Koshy und Love 2004; Law 2013).

Es wurde festgestellt, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl extrahierter Milchzähne und dem Bedarf einer kieferorthopädischen Therapie besteht (Bhujel et al. 2014). Der vorzeitige Verlust von Seitenzähnen ist mit einem Stützzonenverlust assoziiert, wodurch Dysgnathien, Malokklusionen und Platzmangel entstehen können (Miyamoto et al. 1976). Park et al. (2009) stellten fest, dass ein Platzverlust bei einem frühzeitigen unilateralen Verlust des ersten Oberkiefer-Milchmolaren einen geringen Einfluss auf die Platzverhältnisse der permanenten Zähne hat. Entscheidender ist der vorzeitige Verlust des zweiten Milchmolaren. In einer klinischen Studie mit 185 untersuchten Kindern zwischen 5–10 Jahren wurde ermittelt, dass mit 13,5 % der linke zweite Milchmolar, der am häufigsten fehlende Milchzahn ist (Murshid et al. 2016). Ist dieser nicht mehr durch eine Wurzelkanalbehandlung zu erhalten, sollte frühzeitig für eine Sicherung der Platzverhältnisse durch einen Platzhalter gesorgt werden (Bindayel 2019).

1.1.6 Erfolgsrate von Wurzelkanalbehandlungen im Milchgebiss

Als Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung ist die klinische und röntgenologische Symptombefreiheit definiert. Der Behandlungserfolg ist von mehreren Faktoren abhängig, entscheidend für eine Wurzelkanalbehandlung bei Milchzähnen ist die Beachtung der strengen Indikationen, die im Abschnitt 1.1.3 genannt sind. Stimmen der Zeitpunkt und der Zustand des Milchzahnes, sind für die Prognose der aseptische Therapieverlauf, das Wurzelkanalfüllungsmaterial, die koronale Restauration und die Bereitschaft des Kindes und der Eltern zu einer verbesserten Mundhygiene wichtig.

Die Erfolgsrate erhöht sich signifikant bei einer adäquaten koronalen Restauration: bei Restauration mit einer Stahlkrone auf bis zu 95,9 %, mit einem plastischen Füllungsmaterial auf 92,3 %, wohingegen die Erfolgsrate eines temporären Füllungsmaterials lediglich bei 28,6 % liegt (Moskovitz et al. 2005; Seale 2005). Bei Brustolin et al. (2017) liegt die Erfolgsrate einer Pulpektomie nur bei 62,9 % nach einem einjährigen Kontrollzeitraum, wobei kariös infizierte Zähne eine höhere Misserfolgswahrscheinlichkeit aufwiesen als vorher nicht infizierte oder traumatisch verletzte Milchzähne. Barr et al. (1991) belegen, dass eine einzeitige Behandlung mit Formokresol eine Erfolgsrate von über 80 %

verspricht, jedoch wird das Wurzelfüllmaterial aufgrund seiner mutagenen und kanzerogenen Eigenschaften nicht mehr empfohlen.

Die Anforderungen an Wurzelkanalfüllmaterialien sind hoch. Im Gegensatz zu einer permanenten Wurzelkanalfüllung sollte bei einer temporären Wurzelkanalfüllung die Resorbierbarkeit berücksichtigt werden. Die Resorptionsrate des Füllungsmaterials sollte möglichst der physiologischen Wurzelresorption entsprechen. In den letzten Jahren haben sich einige Materialien bewährt, die biokompatibel sind, den nachfolgenden Zahnkeim nicht schädigen, antibakteriell wirken und hohe Erfolgsraten vorweisen, wie z. B. Kalziumhydroxid-Jodoform-Pasten (Nurko und Garcia-Godoy 1999; Ozalp et al. 2005). Studien belegen einen klinischen Erfolg von 73 % bis zu 100 % (Nakornchai et al. 2010; Tang und Xu 2017). Tannure et al. (2009) untersuchten die Misserfolge einer Pulpektomie an Milchzähnen histo-pathologisch und mikroskopisch und stellten fest, dass der Hauptgrund eines Therapieversagens mit der Komplexität der Wurzelkanalmorphologie zusammen hängt, wodurch nekrotisches Gewebe und Mikroorganismen nach einer Behandlung im Wurzelkanal weiter persistieren können.

Trotz der guten Erfolgsaussichten sollten nach jeder Wurzelkanalbehandlung regelmäßige klinische und radiologische Kontrollen durchgeführt werden, um mögliche Misserfolge frühzeitig zu erkennen und Schäden am nachfolgenden Zahn zu vermeiden (Kühnisch et al. 2011).

1.1.7 Der Effekt der Reinigungswirkung auf den Behandlungserfolg

Um Misserfolge einer Wurzelkanalbehandlung zu minimieren, sollte eine optimale Reinigung der Wurzelkanäle erfolgen. Die Reinigung und Desinfektion sind bei einer Wurzelkanaltherapie unerlässlich, da eine nekrotische Pulpa sowohl bei Milchzähnen als auch bei permanenten Zähnen eine ähnliche bakterielle Besiedlung aufweisen (Sato et al. 1993; Silva et al. 2006; Chandwani und Chandak 2017). Im komplexen Wurzelkanalsystem und besonders im apikalen Wurzelabschnitt ist es wichtig, mit einer desinfizierenden und antibakteriellen Spülflüssigkeit zu arbeiten. Bei Milchzähnen ist apikal die Wurzelkanalwandstärke sehr gering (Kurthukoti et al. 2015), wodurch eine mechanische Erweiterung mit Vorsicht durchgeführt werden sollte, um einer Perforation entgegenzuwirken. Eine gründliche chemo-mechanische Reinigung mit möglichst vollständiger Entfernung des nekrotischen oder entzündeten Pulpagewebes und der Mikroorganismen ist entscheidend für einen Behandlungserfolg (Hülsmann et al. 2005).

1.2 Anatomie und Morphologie der Wurzelkanäle von Milchzähnen

Der Zahnarzt sollte gute und grundlegende Kenntnisse über die Besonderheiten der Milchzahnmorphologie besitzen, um eine korrekte Diagnostik, Indikationsstellung und adäquate Therapie durchzuführen (Cleghorn et al. 2010). Da die Wurzelanatomie von einwurzeligen Milchfrontzähnen weniger komplex ist und sie im Vergleich zu den Milchmolaren einfacher zu behandeln sind, wird in dieser Studie nur auf die Milchmolaren eingegangen.

1.2.1 Vergleich von Milchmolaren und permanenten Zähnen

Generell unterscheiden sich die Zähne der beiden Dentitionen in der Anzahl, der Größe, der Farbe und der Form (Abbildung 1). Makroskopisch erkennbar besitzt ein Kind weniger, kleinere und hellere Zähne. Im Folgenden werden die wichtigen Unterschiede bezüglich des mikroskopischen Aufbaus und der Form von Milchmolaren zu den Dentis permanentes genannt:



Abbildung 1: Vergleich Milchmolar (oben) und permanenter Molar (unten)

1.2.2 Krone der Milchmolaren

Besonderheiten von den Milchzahnkronen sind die geringere Schmelzschicht besonders in den Fissuren und an den approximalen Seiten, bei bleibenden Molaren ist sie fast doppelt so dick (Mahoney 2010). Die Schmelzmineralisation ist an den Milchzähnen teilweise prismenlos und enthält einen geringeren Mineralgehalt. Im Vergleich zu den permanenten Zähnen haben Milchmolaren ein höheres Abrasionsverhalten, sowie breite und flächige Approximalkontakte. Die Dentinstruktur weist ein höheres Porenvolumen und eine höhere Dentinpermeabilität auf. Ein geringerer Kalzium- und Phosphatgehalt ist im peri- und intertubulären Dentin zu erkennen.

Die geringere Mineralisation der Milchzahnsubstantz macht den Milchzahn kariesanfälliger und beschleunigt den Krankheitsverlauf. Die größeren Dentintubuli erleichtern die Penetration von Mikroorganismen, sobald die Schmelzschicht durchbrochen ist.

1.2.3 Wurzel und Pulpa der Milchmolaren

Die Milchzahnpulpa ist voluminöser, besonders der mesiale Pulpenkammerbereich enthält ein größeres Pulpahorn. Das Wurzeldentin weist größere Dentintubuli auf. Die Besonderheit der Milchzahnwurzel ist das Resorptionsverhalten: sobald die Resorption fortgeschritten ist, wird kein Reizdentin mehr gebildet. Im Vergleich zu den permanenten Zahnwurzeln verlaufen die graziilen Milchzahnwurzeln in mesiodistaler Ausbreitung gespreizter und häufig gekrümmt. Die Wurzelkanäle haben einen ovalen bis elliptischen Querschnitt und ein bandförmiges Kanallumen. Milchmolaren haben häufig akzessorische Kanäle, die v. a. am Pulpakammerboden in die Furkation verlaufen.

Das ausgeprägte Pulpakavum im Milchzahn hat zur Folge, dass ein Kariesbefall schneller zu einer Pulpitis führt. Bei der Trepanation sind die Kanaleingänge der Milchzahnwurzeln weiter bukkal oder palatinal zu erwarten und seltener zentral, wie bei den permanenten Molaren.

Die komplexere und grazile Milchzahn-Wurzelkanalmorphologie stellt eine größere Hürde bei der Wurzelkanalpräparation dar. Variabel gekrümmte und ovale Wurzelformen erschweren eine gründliche Wurzelkanalpräparation (Cleghorn et al. 2010). Nicht nur in der Form, sondern auch in der Anzahl der Wurzelkanäle gibt es eine hohe Variabilität (Gupta und Grewal 2005; Aminabadi et al. 2008; Bagherian et al. 2010; Ahmed et al. 2020). Die meisten zweiten Unterkiefer-Milchmolaren besitzen vier Wurzelkanäle (Katge und Wakpanjar 2018). Auch Kurthukoti et al. (2015) diagnostizierten in einer Micro-CT-Analyse der unteren Milchmolaren immer zwei Wurzelkanäle in der mesialen Wurzel und

in 65,5 % der Fälle zwei Kanäle in der distalen Wurzel. Im Querschnitt zeigen sich in der mesialen Wurzel meist runde Wurzelquerschnitte und irreguläre Formen der distalen Wurzel. Zoremchhingi et al. (2005) beschreiben das Kanalsystem als bandförmig, wodurch ein einzelnes apikales Foramen nicht der Regelfall ist. Studien beschreiben gerade, gekrümmte und s-förmige Wurzelformen sowie horizontale Anastomosen, die entwicklungsbedingt sind, da die Wurzel zu Beginn aus einer Wurzel stammt (Goerig und Camp 1983; Gupta und Grewal 2005). Einen gefährlichen Bereich bei der Wurzelkanalpräparation stellt die interradiikuläre Wand der Wurzeln dar, denn sie kann durch anfängliche Resorptionsvorgänge teilweise sehr dünn werden (Fumes et al. 2014; Kurthukoti et al. 2015).

Akzessorische Kanäle sind in permanenten Zähnen seltener zu finden als in Milchzähnen, in denen bis zu 94 % zusätzliche Kanäle entdeckt wurden (Dammaschke et al. 2004). Nach Ringelstein und Seow (1989) besitzen 42,7 % der Milchmolaren Foramina, die in der Furkation lokalisiert sind, wobei dieser Wert je nach Zahntyp bis auf 80 % steigt (Wrbas et al. 1997). Dies und die Tatsache, dass es sich bei den Foramina um Öffnungen von bis zu 360 µm Durchmesser handelt (Dammaschke et al. 2004), sind Gründe für die Häufigkeit der interradiikulären statt wie bei den permanenten Zähnen üblichen apikalen Lokalisation der Entzündungsprozesse.

Die Zusammensetzung und die Struktur des Pulpagewebes sind histologisch bei Milch- und permanenten Zähnen ähnlich (Fox und Heeley 1980). Eine Einschränkung in der biologischen Leistungsfähigkeit und geringere Abwehrkraft bei Milchzähnen wird durch die Wurzelresorption verursacht.

1.3 Wurzelkanalpräparationen an Milchzähnen

An Milchzahnwurzeln kann keine klassische Wurzelkanalpräparation wie bei den permanenten Zähnen durchgeführt werden, da es sich um resorbierende, dünnere und filigrane Wurzeln handelt. Es sollten dennoch eine gründliche Entfernung der Geweberückstände und ein gleichmäßiger Dentinabtrag erfolgen, um die Bakterien, die auch in die tiefer gelegenen Dentinkanälchen penetriert sind, bestmöglich zu entfernen, so dass eine adäquate Reinigung und eine dichte Wurzelkanalfüllung möglich sind. Barr et al. (2000) wagten sich als Erste an die maschinelle Milchzahnpräparation. Dank der sehr flexiblen Nickel-Titan-Feilen (NiTi-Feilen) hat sich die Präparation der komplexen Milchzahnwurzeln deutlich erleichtert und verbessert (George et al. 2016; Chauhan et al. 2019).

1.3.1 Vergleich der manuellen und maschinellen Wurzelkanalpräparation an Milchzähnen

Die manuelle Wurzelkanalpräparation ist bei den meisten Zahnärzten die erste Wahl bei einer Milchzahnwurzelkanaltherapie. Da eine langwierige Behandlung besonders bei Kindern schwer umzusetzen ist, gibt es einige Studien, die für eine maschinelle Wurzelkanalaufbereitung an Milchzähnen sprechen. Barr et al. (2000) untersuchten als Erste den Umgang mit rotierenden NiTi-Feilen an Milchzähnen und beschrieben eine effektive Nutzung mit Vor- und Nachteilen. Im Review von George et al. (2016) wird die Nutzung der maschinellen Präparationen an Milchzähnen mit folgenden Vor- und Nachteilen zusammengefasst (Tab. 1):

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der maschinellen Präparation

Vorteile der maschinellen Präparation:	Nachteile der maschinellen Präparation:
<ul style="list-style-type: none"> • verkürzte Präparations- und Reinigungszeit • wurzelkanalgetreue Präparation • verringerte Wurzelkanallagerung • konische Präparationsform • mühelose Obturation mit einer Injektionstechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • runde, zentrierte Wurzelkanalpräparation bei ovalen Kanälen • hohe Anschaffungskosten für Feile, Handstück und Motoren • Erlernen einer neuen Technik • verringertes Tastgefühl • schnelle Ermüdung der Feilen • schnell fraktur anfällig bei Mehrfachanwendung

Nagarata et al. (2006) führten einen Vergleich der manuellen und maschinellen Wurzelkanalpräparation an Milch- und permanenten Molaren durch. Der Aspekt der Präparationszeit spricht für eine signifikant schnellere Methode mit der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung, die bei Milchmolaren in deutlich kürzerer Zeit durchführbar ist als bei den Dentes permanentes. In der Formgebung erwies sich die ProFile (Dentsply, York, Pennsylvania, USA) ebenfalls als sehr vorteilhaft durch ihren gleichmäßigen und konischen Hartschubstanzabtrag. Der Aspekt des Instrumentenversagens hingegen ist kritisch zu betrachten. Nagarata et al. (2006) registrierten bei der konventionellen K-File (Dentsply, York, Pennsylvania, USA) ein häufigeres Versagen, das jedoch nur in der Deformation der Feile bestand. Frakturen traten nicht auf. Bei den NiTi-Feilen konnten hingegen keine

Deformationen festgestellt werden, dafür aber eine 10 %ige Frakturhäufigkeit an Milchmolaren und eine 20 %ige Frakturhäufigkeit an bleibenden Molaren. In einer Studie von Yared et al. (2001) wurde festgestellt, dass ein präklinisches Training des Zahnarztes und die Einhaltung der optimalen Umdrehungszahl, die Frakturanfälligkeit der NiTi-Feilen signifikant reduziert. Da sowohl die Zeit als auch die Versagensquote an Milchzähnen geringer ist als an Zähnen der zweiten Dentition, ist es nach Nagarata et al. (2006) viel versprechend, die maschinelle Methode auch an Milchmolaren anzuwenden. Weitere Studien verglichen ebenfalls die konventionelle K-Feile mit der maschinellen ProFile an Milchzähnen und kamen zu dem Erkenntnis, dass die ProFile sowohl Vorteile in der Präparationszeit, also auch in der Formgebung bietet. In kürzerer Zeit kann eine konische Wurzelkanalform präpariert werden, die eine qualitative und stabile Wurzelkanalfüllung ermöglicht (Mortazavi et al. 2005; Kuo et al. 2006; Crespo et al. 2008; Shaikh und Goswami 2018). Kuo et al. (2006) ermittelten nach 12 Monaten eine 95 %ige klinische und röntgenologische Erfolgsrate. In weiteren Studien wurde festgestellt, dass es keine signifikanten Unterschiede in der Sauberkeit der Wurzelkanalwände zwischen maschinellen und manuellen Präparationen an Milchzahnwurzeln gibt (Silva et al. 2004; Subramaniam et al. 2013; Subramaniam et al. 2016; Shaikh und Goswami 2018; Mehlawat et al. 2019). Madan et al. (2011) verglichen die Reinigungswirkung der manuellen und rotierenden Präparation und kamen zu dem Resultat, dass ProFile effizienter im koronalen Drittel säubert und die manuelle K-File besser im apikalen Drittel abschneidet. Im mittleren Drittel gab es keine signifikanten Unterschiede.

Auch weitere rotierende Systeme konnten bei der Anwendung an Milchzähnen überzeugen, da die Flexibilität der NiTi-Feilen die Krümmung der Wurzelkanäle beibehält und eine effiziente Präparation durchgeführt werden kann ohne die Wurzelkanalanatomie zu verändern (Jeevanandan und Thomas 2018).

In einer klinischen Studie von Makarem et al. (2014) wurden 46 Kinder untersucht und in zwei Gruppen aufgeteilt: die eine Gruppe erhielt eine konventionelle Pulpektomie durch Präparation mit Hedströmfeilen bis zur ISO-Größe 30, die andere Gruppe wurde mit dem maschinellen NiTi-FlexMaster-System (VDW, München, Deutschland) behandelt. Anschließend wurden die Röntgenbilder der Wurzelfüllungen verglichen: dabei wurden bessere Obturationen nach maschineller Präparation festgestellt bei kürzerer Behandlungszeit. Ochoa-Romero et al. (2011) ermittelten in einer klinischen Studie an Milchzähnen ein Zeitersparnis der rotierenden Wurzelkanalpräparation (K3, Sybron Endo, West Collins, CA, USA) gegenüber der manuellen Bearbeitung (K-File) von 63 %. 80 % der Wurzelkanäle waren nach der maschinellen Präparation optimal gefüllt und lediglich 50 % nach der manuellen Präparation.

Govindaraju et al. (2017) hingegen vermerkten keine signifikanten Qualitätsunterschiede der Wurzelkanalfüllungen, aber eine signifikant kürzere Präparationszeit.

1.4 Die verwendeten maschinellen NiTi-Systeme

Die maschinellen NiTi-Systeme für die endodontische Therapie arbeiten mit Instrumenten aus Nickel-Titan-Legierungen. Ein großer Unterschied zu den konventionellen Instrumenten aus Edelstahl (Chrom-Nickel-Stahl) besteht in der Pseudoelastizität, d.h. es sind keine irreversiblen plastischen Deformationen nach einer Nutzung in gekrümmten Kanälen zu erwarten (*memory effect*). Jedes Instrument hat seine optimale spezifische Umdrehungszahl, die berücksichtigt werden muss, um das Frakturrisiko zu minimieren und die maximale Effizienz zu erreichen.

1.4.1 Das Self-Adjusting File-System

Die *Self-Adjusting File* (SAF; ReDent-Nova, Ra'anana, Israel) wurde 2010 von Metzger et al. entwickelt (Metzger et al. 2010a; Metzger 2014). Es handelt sich um ein Ein-Feilen-Ni-Ti-System mit kontinuierlicher Spülung während der Präparation, dabei entsteht ein passiver Spüldruck durch die oszillierende Bewegung der Feile und es wird eine aktivierte Spülung erzeugt, ohne die Spülflüssigkeit durch das apikale Foramen zu drücken (Hof et al. 2010). Die Feile arbeitet mit Hubbewegungen von 0,4 mm und 360°- Rotationsbewegung mit 3000–5000 Umin⁻¹. Nach Herstellerangaben wandelt der Behandlungskopf die Umdrehungen in Schwingungen von bis zu 5000 pro Minute um. Die Einstellung ist in dem speziellen Winkelstückkopf (RDT3, ReDent-Nova, Ra'anana, Israel) programmiert, wobei die Rotation mit einem automatischen Widerstand-Brems-Mechanismus kontrolliert wird und nur bei wenig Wandkontakt wieder rotiert. Damit wird eine geringe Krafteinwirkung an der Kanalwand erzeugt und eine Begradigung vermieden. Laut Hersteller soll die Feile 4 min lang im Wurzelkanal arbeiten. Die Menge an Spülflüssigkeit, welche mithilfe einer Pumpe für eine dauerhafte Spülung sorgt, lässt sich durch die Präparationszeit bestimmen (z. B. 4 ml/min). Das Besondere an der Feile ist ihr spezieller Aufbau: sie besteht aus einer graziilen NiTi-Netzstruktur (Abbildung 2). Es handelt sich um eine Hohlfeile und besitzt eine raue, abrasive Oberfläche mit einer abgerundeten Spitze. Die Hohlform lässt sich komprimieren und wieder zurückstellen und ist demnach unabhängig von dem Wurzelkanalquerschnitt. Durch diese Eigenschaft soll sie an der gesamten Wurzelkanalinnenwand arbeiten können und eine gute Reinigung auch in komplexen ovalen Wurzelquerschnitten ermöglichen. Zu

Beginn der Wurzelkanalpräparation ist die Erstellung eines Gleitpfades der ISO-Größe 20 oder 30 nötig, da es die SAF in zwei unterschiedlichen Durchmessern von 1,5 mm oder 2 mm im nicht komprimierten Zustand für schmale oder breite Kanäle gibt. Auch in der Länge gibt es eine Auswahl (21 mm, 25 mm, 31 mm). Es wird empfohlen, eine Feile nur an einem Patienten zu nutzen und anschließend zu entsorgen, da es zur Ermüdungsdeformierung kommt und die Effektivität nachlässt.

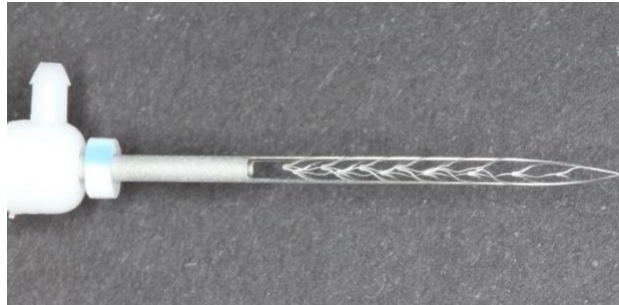


Abbildung 2: SAF-Feile

1.4.2 Studien zu Self-Adjusting File

Die 2010 eingeführte SAF wurde in einigen Studien getestet, darunter auch an Milchzähnen. Es wurde eine effektive und sichere Anwendung in ovalen Kanälen permanenter Zähne nachgewiesen (Metzger et al. 2010b; Paqué und Peters 2011; De-Deus et al. 2011; Versiani et al. 2011; Bakir et al. 2014). Auch in c-förmigen Wurzelkanälen erzielte die SAF bessere bis gleichwertige Ergebnisse als die Vergleichsgruppen ProTaper (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Schweiz) und Reciproc (VDW, München, Deutschland) (Solomonov et al. 2012; Amoroso-Silva et al. 2017). Im Vergleich mit anderen rotierenden Systemen wurde ein geringerer Dentinabtrag festgestellt. Alle Systeme erzielten eine gleichmäßig und homogen bearbeitete Fläche (Versiani et al. 2013; Zuolo et al. 2018). Das Risiko von Dentinrissen nach der Wurzelkanalpräparation wurden bisher bei der SAF kaum (Yoldas et al. 2012) bis selten festgestellt (Hin et al. 2013). Farmakis et al. (2013) untersuchten die Verformung und Frakturanfälligkeit der Feile und stellten fest, dass es an den feinen Bögen und Streben der netzartigen Struktur zu bleibenden Verformungen kam. Frakturen oder Metallfragmente im Wurzelkanal wurden nicht festgestellt.

In den folgenden Studien zur Milchzahnendodontologie überzeugte das SAF-System: Hidalgo et al. stellten im Vergleich mit der konventionellen Handfeile in einer Micro-CT-Analyse eine homogenere Wurzelkanalaufbereitung mit der SAF an Milchmolaren fest. Hinsichtlich der Arbeitssicherheit schnitt diese besser ab, denn die Häufigkeit lateraler Perforationen fiel bei dem SAF-System mit 4,2 %

signifikant geringer aus als bei Präparation mit der konventionellen Handfeile mit 47,8 %. Insgesamt wurde auch hier ein geringerer Dentinabtrag mit den SAF-Feilen festgestellt, wodurch Wurzelkanalverlagerungen seltener vorkamen (Hidalgo et al. 2017). Die Studie bezog sich jedoch nur auf je acht Milchmolaren. In einer weiteren Micro-CT-Studie an 20 Milchmolaren je Gruppe wurde der geringere Dentinabtrag mit der SAF im Vergleich zu der manuellen K-Feile und der Profile (Dentsply/Tulsa Dental, Tulsa, USA) bestätigt und es wurde eine geringere Instrumentationszeit als für die Handfeile bzw. eine gleichwertig kurze Präparationszeit als für die rotierende Profile gemessen (Kaya et al. 2017). Ein entscheidender Aspekt, der für eine Milch Zahnpräparation mit der SAF spricht, ist die Tatsache, dass diese im Vergleich zu ProTaper und der K-Feile die geringste Menge an Debris apikal durch den Wurzelkanal herauspresst (Thakur et al. 2017). Auch Buldur et al. (2018) kamen zu dem Ergebnis, dass die SAF im Vergleich zu anderen Wurzelkanalaufbereitungssystemen einen geringeren Anteil extrudierten Debris aufweist. In der Studie von Manker et al. (2019) wurden besonders geringe, aber flächenhaft gleichmäßige Dentinabträge bei den filigranen Milchzahnwurzelkanälen beobachtet.

1.4.3 Reinigungswirkung der Self-Adjusting File

Studien zur Reinigungswirkung der SAF wiesen an permanenten Zähnen gute Ergebnisse auf. Metzger et al. (2010b) beschrieben in einer REM-Studie an 20 Wurzelkanälen eine 100 %ig von Debris freie Wurzelkanalwand und auch für die *smear layer*-Entfernung wurden gute Werte für saubere Kanalareale verzeichnet: 100 % koronal, 80 % in der Kanalmitte und 65 % apikal. Siqueira Jr et al. (2010) berichteten über eine verbesserte antibakterielle Wirkung in ovalen Wurzelkanälen im Vergleich zu anderen rotierenden NiTi-Instrumenten. In einer Studie zur Entfernung von Debris im Isthmus des Wurzelkanals wurde die SAF mit anderen rotierenden Instrumenten verglichen und konnte überzeugen, es wurde jedoch keine signifikant bessere Reinigungswirkung nachgewiesen (Dietrich et al. 2012). Ruckman et al. (2013) fanden im Vergleich zwischen der SAF und Handfeilen bei der Präparation von ovalen Wurzelkanälen im koronalen und medialen Abschnitt einen signifikant besseren Abtrag mit der SAF, wobei im apikalen Bereich kein Unterschied zwischen den Verfahren zu erkennen war. In einer weiteren Studie an ovalen Wurzelkanälen entfernte die SAF ebenfalls etwas besser als die Handfeile eine künstlich aufgesetzte röntgenopake Schicht von der Wurzelkanalwand, aber schnitt schlechter ab als die anderen rotierenden Systeme: WaveOne (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz), Reciproc (VDW, München, Deutschland), ProTaper (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) (Topcu et al. 2014).

Eine vollständige Reinigung der ovalen Wurzelkanalwände stellten Versiani et al. (2013) nicht fest. Lacerda et al. (2017) zeigten für die Bearbeitung an ovalen Kanälen mit der SAF im apikalen Bereich signifikant mehr bearbeitete Fläche als der XP-Endo Shaper (FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz), wobei eine 100 %ige Reinigung nicht erzielt wurde.

Es wurde nachgewiesen, dass das SAF-System eine effektive Aktivierung der Spüllösung erzeugt, die Reinigungswirkung steigert und sogar signifikant mehr *E. faecalis* entfernte als EndoVac (Discus Dental, Culver City, CA, USA) (Çapar und Aydinbelge 2014; Koçak et al. 2014). Diese Vorteile zeigten sich auch bei der Entfernung von Kalziumhydroxid als medikamentöse Einlage, die mit der SAF wirksamer ausfiel als durch die Spülung mit EndoVac und die konventionelle manuelle Spülung (Capar et al. 2014). Amoroso-Silva et al. (2017) berichteten in ihrer Vergleichsstudie mit Reciproc (VDW, München, Deutschland) und einer abschließenden oszillierenden Abschlusspülung sowohl für Reciproc als auch für die SAF von einer Verbesserung der Wurzelkanalreinigung, wobei Reciproc wesentlich mehr Volumenabtrag zu verzeichnen hatte.

Die chemo-mechanische Wirkung der SAF wurde unter Anwendung verschiedener Konzentrationen von NaOCl (2,5 %, 6 %) und Einwirkzeiten (2 min, 4 min, 6 min) zur Entfernung von *E. faecalis* getestet: die Konzentrationsunterschiede bewirkten keine signifikanten Unterschiede, im Gegensatz zu der Einwirkdauer, wo nach 2 min eine Reduktion der Keimzahlen eintrat und eine Senkung der Bakterienzahl bei längerer Einwirkzeit beobachtet wurde (Alves et al. 2011). Die SAF-Technik erwies sich auch als effektiv beim Einsatz zur Entfernung von Wurzelfüllmaterial in der Revisionstherapie. Im Vergleich mit ProTaper (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) wurde eine signifikante Reduktion der Füllung in gekrümmten Wurzelkanälen notiert (Abramovitz et al. 2012; Pawar et al. 2016).

Nach einer genaueren Untersuchung unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) ergab sich keine signifikant bessere Sauberkeit nach zusätzlicher aktivierter Reinigung mit der SAF. Es wurde koronal und im mittleren Wurzelkanaldrittel eine saubere Dentinfläche dargestellt, wohingegen apikal kaum Veränderungen zu erkennen waren (Keleş et al. 2014).

Die genannten Studien beziehen sich lediglich auf permanente Zähne. Klinische Studien an Milchzähnen spezifisch zur Reinigungswirkung der SAF unter dem REM wurden bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht veröffentlicht.

1.4.4 Das Mtwo-System

Mtwo (VDW, München, Deutschland) zählt seit 2003 zu den „neueren“ NiTi-Systemen für die maschinelle Wurzelkanalpräparation mit eher klassischen NiTi-Feilen, die einen s-förmigen Querschnitt mit zwei aktiven Schneidekanten und einer nicht schneidenden Spitze besitzen (Abbildung 3). Durch die passive Spitze ist eine bessere Zentrierung möglich und das Instrument neigt weniger zu einer Wurzelkanalbegradigung oder Perforation. Der dünne, konvexe Querschnitt erzeugt im Vergleich zu den älteren u-förmigen NiTi- Schneidekanten geometrien weniger Friktion, wodurch eine höhere Flexibilität erreicht wird und eine geringere Torsionsbelastung bei einer höheren Schneidleistung entsteht. Durch die s-Form ist ein größerer Spanraum gegeben, der für einen guten Abtransport von Debris sorgt. Bei Mtwo handelt es sich um ein Mehr-Feilen-System, dass in der *single-length*-Technik angewendet wird, d.h. mit jeder Feile der Basissequenz wird bis auf die Arbeitslänge ohne Druck in bürstenden Bewegungen bei 280 bis 350 Umin⁻¹ präpariert. Eine Basissequenz besteht aus vier unterschiedlichen Feilen in den Größen 10/.04, 15/.05, 20/.06 und 25/.06, wobei in aufsteigender Sequenz von der kleineren zur größeren Feile gearbeitet wird. Begonnen wird mit einem Gleitpfad bis zu einer ISO-Größe 10, der manuell mit einer Handfeile angelegt wird, um den mechanischen Stress für die folgenden Instrumente zu reduzieren. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Arbeitslänge. Nachdem eine Feile die Arbeitslänge erreicht hat, findet ein Wechsel zur nächsten Feilengröße statt. Jede Feile kann in bis zu acht Kanälen wieder verwendet werden. Ist das Kanallumen sehr weit, gibt es zusätzlich noch sechs größere Feilen.



Abbildung 3: Mtwo-Feilen

1.4.5 Studien zu Mtwo

Die Anwendung der Mtwo-Feilen wurde in einigen Studien sowohl an Permanenten (Veltri et al. 2005; Schäfer et al. 2006a; Schäfer et al. 2006b; Sonntag et al. 2007; Kuzekanani et al. 2009) als auch in wenigen Studien an

Milchzähnen erforscht. Gute Resultate erzielte Mtwo im Vergleich zu anderen rotierenden Systemen bei der Präparation gekrümmter Wurzelkanäle, da es seltener zu Wurzelkanalverlagerungen und Instrumentenfrakturen kam (Giovannone et al. 2008). Mtwo zeigte im Vergleich zu der manuellen K-Handfeile eine gleichwertig akzeptable Reinigungswirkung bei einer kürzeren Präparationszeit sowohl bei den Permanentes als auch bei den Milchzähnen (Azar und Mokhtare 2011; Azar et al. 2012; Ramezanali et al. 2015). In einer klinischen Studie an 80 Milchmolaren wurde im Vergleich zur manuellen Wurzelkanalaufbereitung (K-File) eine signifikant schnellere Bearbeitungszeit von durchschnittlich 4,13 min (manuell: 7,80 min) festgestellt (Mokhtari et al. 2017). Der volumetrische Vergleich des Dentinabtrags nach der Wurzelkanalpräparation an Milchmolaren mit Mtwo-Instrumenten und manuellen K-Feilen zeigte signifikant mehr Abtrag und eine konische Präparationsform nach Präparation mit Mtwo (Poornima et al. 2015).

Zurzeit liegen nur wenige klinische Studien vor, die die Anwendung an Milchzähnen beurteilen: Krishna et al. (2019) untersuchten in einer *In-vivo*-Studie die klinische Anwendung von Mtwo bei Kindern und stellten für den Anwender ein angenehmeres und schnelleres Arbeiten fest. 60 % der Kinder hatten jedoch beim Anblick des Mtwo-Systems Angst und 66,7 % bevorzugten die manuelle H-File.

1.4.6 Reinigungswirkung von Mtwo

Die Reinigungswirkung von Mtwo wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Es wurde an permanenten Zähnen sowie an Milchzähnen festgestellt, dass es keine signifikanten Unterschiede zur Reinigungswirkung im Vergleich zu der konventionellen Handfeile gibt und demnach beide Methoden adäquate Ergebnisse erzielen. Einerseits verzeichneten Ramazani et al. (2016) für die Präparation mit Mtwo im Vergleich zur manuellen K-Feilen-Milchzahnpräparation sauberere Kanäle, andererseits stellten Katge et al. (2016) für Mtwo nicht signifikant, aber etwas schlechtere Reinigungswirkungen im koronalen und medialen Drittel fest als für die manuelle H-File, wohingegen im apikalen Wurzelbereich Mtwo und die H-Feile wieder einen ähnlichen Sauberkeitsgrad zeigten. Beobachtungen am REM ergaben an permanenten Zähnen eine debrisfreie Dentinoberfläche im koronalen und mittleren Wurzelkanaldrittel durch die Präparation mit Mtwo-Feilen, während das apikale Drittel weiterhin Debris und *smear layer* enthielt (Foschi et al. 2004; Kuzekanani et al. 2009). Signifikant bessere Werte erreichte die Präparation mit Mtwo an gekrümmten Wurzeln im mittleren Bereich, hier fand sich eine bessere Debris-Entfernung als für andere Systeme, wobei es hinsichtlich der *smear layer*-Entfernung keinen signifikanten Unterschied gab

(Bidar et al. 2010). Um den apikalen Bereich effizienter zu bearbeiten, wurden von Plotino et al. (2014) nach der Basissequenz des Mtwo-Systems spezielle Instrumente zur zusätzlichen apikalen Präparation genutzt und zeigten bessere Ergebnisse.

Beobachtungen am REM von Mtwo präparierten Milchmolaren zur Untersuchung der Reinigungswirkung und *smear layer*-Entfernung wurden bis zum Zeitpunkt der Dissertation noch nicht publiziert.

1.5 Smear layer

Als *smear layer* wird der Schmierfilm bezeichnet, der nach der Wurzelkanalpräparation entsteht und an und in der Wurzelkanalwand haftet. 1975 wurde er von McComb und Smith (1975) erstmals beschrieben. Er besteht aus organischen und anorganischen Bestandteilen: Dentinpartikeln, Überresten vitalen und nekrotischen Pulpagewebes, Bakterienzellresten und Rückständen von Spülflüssigkeiten. Er besitzt eine oberflächliche Schichtdicke von 1–2 µm und kann bis zu 40 µm in die Dentintubuli penetrieren (Mader et al. 1984). Die *smear layer*-Schicht ist ein wichtiger Parameter in der Sauberkeitsbewertung, da der *smear layer* die Dentintubuli verblockt, wodurch eine adäquate Reinigung und Wurzelfüllung verhindert werden (Brännström und Johnson 1974; Loel 1975; Violich und Chandler 2010). Die Notwendigkeit zur Entfernung des *smear layer* bei der Milchzahnwurzelkanalpräparation wird kontrovers diskutiert. In einer klinischen Langzeitstudie von Tannure et al. (2011) wurden 36 Zähne in zwei Gruppen aufgeteilt, dabei erhielt eine Gruppe eine Abschlussspülung mit Zitronensäure, die andere Gruppe nicht. Es wurde kein signifikanter Unterschied in der klinischen Erfolgsquote festgestellt, beide Methoden erzielten nach 36 Monaten über 80 % Erfolg. Barcelos et al. (2012) hingegen stellten in einer klinischen Vergleichsstudie mit 48 Patienten im Verlauf von 24 Monaten signifikant bessere Ergebnisse nach Entfernung des *smear layer* bei Pulpektomie an Milchzähnen fest, dazu zählen Symptomfreiheit und röntgenologisch sichtbare Verbesserungen nach der Therapie. Sisodia et al. (2014) ermittelten einen Zusammenhang zwischen der Dichtigkeit des Wurzelfüllmaterials und der Reinfektionsgefahr: so waren die Entfernung oder die Gegenwart des *smear layer* bei einer dichten Wurzelfüllung gleich effektiv. Im Fall einer weniger dichten Wurzelfüllung führte die Entfernung des *smear layer* jedoch zu einer besseren Barriere gegen das Eindringen von Bakterien. Der allgemeine Konsens in der Literatur erachtet die *smear layer*-Entfernung an Milchzähnen mit Anzeichen einer nekrotischen Pulpa als sinnvoll (Pintor et al. 2016).

1.6 Chemische Desinfektion

Die chemische Desinfektion im Verlauf der Wurzelkanalpräparation ist ein wichtiger Bestandteil der Wurzelkanalbehandlung. Sie dient dazu, nekrotisches und vitales Gewebe, organische und anorganische Bestandteile des *smear layer*, sowie den bakteriellen Biofilm im Wurzelentin aufzulösen und zu entfernen. Für alle Präparationssysteme ist eine zusätzliche adäquate chemische Reinigung unerlässlich. Bei ovalen Kanalquerschnitten bleiben bis zu 35 % der Wandfläche unbearbeitet (Peters et al. 2001; Rödig et al. 2002; Barbizam et al. 2002; Metzger et al. 2010b). Da Milchmolaren zu einer irregulären und ovalen Wurzelkanalmorphologie neigen sowie feine, filigrane Wurzelkanalwände besonders im apikalen und interradiikulären Bereich besitzen, stellt die chemische Desinfektion einen essentiellen Bestandteil der chemo-mechanischen Präparation dar.

Die Anforderungen an Spül- bzw. Desinfektionslösungen sind vielfältig: Die Desinfektion sollte eine antimikrobielle Wirksamkeit aufweisen, bakterielle Endotoxine inaktivieren, organisches und anorganisches Gewebe auflösen, biokompatibel und nicht zytotoxisch im periapikalen Gewebe wirken. Die Spüllösung sollte adäquat Debris abtransportieren, um Blockaden im Kanal zu vermeiden.

Aktuell gibt es keine Spüllösung, die alle Anforderungen erfüllt, so dass eine Kombination bzw. ein Spülprotokoll empfohlen wird (Zehnder 2006; Haapasalo et al. 2014). Folgende Spülflüssigkeiten werden für die Wurzelkanalbehandlung an Milchzähnen empfohlen.

1.6.1 Natriumhypochlorit

Natriumhypochlorit (NaOCl) (1 %) gilt als Standardspüllösung für die Desinfektion des Wurzelkanalsystems sowohl bei permanenten als auch bei Milchzähnen, da es gut gewebeauflösend und antibakteriell wirkt, wodurch die organischen *smear layer*-Bestandteile und vor allem nekrotisches Gewebe gut entfernt werden (Kühnisch et al. 2011; Ahmed 2013; AAPD 2016). Verfügbar ist die Lösung in Konzentrationen zwischen 0,5 %–6 %. Nicht die Konzentration ist entscheidend für die Wirkung (Forghani et al. 2017; Verma et al. 2019), sondern die Einwirkdauer und das Volumen, welches durch eine permanente Zufuhr von frischer Lösung erhöht wird (Siqueira et al. 2000; Haapasalo et al. 2014). An Milchzähnen hat sich eine 1 %ige Konzentration etabliert (Ahmed 2013). NaOCl gibt es auch als Gel, das in Bezug auf die Sauberkeit jedoch schlechtere Ergebnisse erzielt als die NaOCl-Lösung (Singhal et al. 2012).

1.6.2 Zitronensäure

Die Verwendung von Zitronensäure dient als ergänzende Abschlussspülung zur Entfernung der anorganischen Bestandteile des *smear layer*. Um den *smear layer* effektiv zu lösen, wird 6–10 %ige Zitronensäure empfohlen (Salama und Abdelmegid 1994; Götze et al. 2005; Ahmed 2013). Im Vergleich zu EDTA wurden gleichwertige und sogar bessere Reinigungswerte erzielt, ohne die Struktur des Wurzel Dentins anzugreifen (Hariharan et al. 2010; Pitoni et al. 2011; Demirel et al. 2019; Yüksel et al. 2020).

Zurzeit liegen nur wenige klinische Studien an Milchzähnen zur Frage vor, ob eine zusätzliche Abschlussspülung zur Entfernung der anorganischen Schmier-schicht notwendig ist, um den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung zu steigern. Tennure et al. (2011) verzeichneten in ihrer klinischen Studie keine signifikant bessere Erfolgsrate. Studien an permanenten Zähnen belegen jedoch, dass eine Abschlussspülung auch nicht instrumentierte Oberflächen begrenzt reinigen kann (Yamada et al. 1983; Baumgartner und Mader 1987; Sen et al. 1995; Attin et al. 2002).

1.7 Desinfektionstechniken

In der Literatur gibt es keine Studien, die sich mit der Spültechnik an Milchzahnwurzelkanälen beschäftigen. In den klinischen Studien und Richtlinien zur Pulpektomie an Milchzähnen wird die konventionelle dynamische Hand-spülung wie bei den permanenten Zähnen empfohlen (Barr et al. 2000; Kühnisch et al. 2011). Laut Herstellerangaben erzeugt das SAF-System kontinuierlich 5000 Schwingungen pro Minute und ist im Frequenzbereich der Schallaktivierung einzustufen. In einer Vergleichsstudie zu anderen Aktivierungstechniken ergab die Nutzung der SAF gleichwertige und sauberere Wurzelkanalwände (Koçak et al. 2014; Çapar und Aydinbelge 2014).

1.8 Methode zur Untersuchung von *smear layer* und Debris

Eine gängige und präzise Methode zur Beurteilung der Sauberkeit der Wurzelkanalwand stellt die Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop dar, wo Debris und *smear layer* sichtbar dargestellt werden. Als Debris werden große Dentin-Trümmer bezeichnet, die locker an der Kanalwand aufliegen, sie werden meist bei 100–200x Vergrößerung bewertet. Bei der Bestimmung des *smear layer* müssen die kleinen Dentintubuli erkannt werden, dafür ist eine 1000–1500x Vergrößerung üblich (Abbildung 4) (Hülsmann et al. 1997; Metzger et al. 2010b).

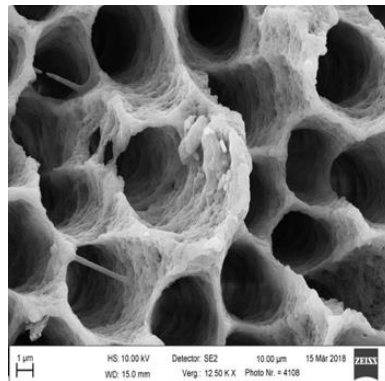


Abbildung 4: REM-Bild sauberer Dentintubuli

1.9 Ziel der Studie

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, an extrahierten Milchmolaren die Reinigungswirkung von zwei maschinellen Wurzelkanalpräparationsystemen (SAF, Mtwo) aus Nickel-Titan mit unterschiedlicher Instrumentengeometrie und Arbeitsweise unter einem Rasterelektronenmikroskop zu untersuchen und zu vergleichen. Die Untersuchung zur Sauberkeit der Wurzelkanalwände erfolgte in Bezug auf die *smear layer*-Entfernung in zwei Wurzelkanalabschnitten (apikal, koronal).

Die Arbeitshypothese lautete, dass sich kein signifikanter Unterschied in der Sauberkeit der Wurzelkanalwände nach der Präparation mit den beiden Systemen nachweisen lässt.

2 Material und Methoden

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

Es wurden 46 extrahierte humane Milchmolaren mit jeweils mindestens drei Wurzelkanälen verwendet, die nach der Extraktion in 0,5 %iger Chloramin-T-Lösung und während der Versuchsphase in Wasser aufbewahrt wurden. Die Extraktion der Zähne erfolgte aus Gründen, die in keinem Zusammenhang zur vorliegenden Untersuchung stehen. Eine Einwilligung in die Verwendung der anonymisierten Zähne zu wissenschaftlichen Zwecken lag von allen Erziehungsberechtigten vor. Es handelte sich um extrahierte Milchzähne mit unterschiedlichen Wurzelkanalkrümmungen und -längen, die in strukturell vergleichbare Zahnpaare (*matched pairs*) sortiert wurden. Insgesamt wurden 23 *matched pairs* nach der Wurzelkanalpräparation unter dem REM ausgewertet, worunter neun Zahnpaare jeweils drei Wurzeln und 14 Zahnpaare jeweils vier Wurzeln besaßen, so dass für jede Gruppe 83 Wurzelhälften zur Verfügung standen. Es wurde jeweils eine Wurzelhälfte pro Wurzel ausgewertet.

2.1 Auswahl der Zähne

Bei der Auswahl der Zähne wurden folgende Kriterien berücksichtigt (Tab.2):

Tabelle 2: Kriterien für die Auswahl der Zähne

Kriterien für die Zahnauswahl
<ul style="list-style-type: none">• vollständig oder partiell erhaltene Zahnkrone, die die Anlage einer Zugangskavität ermöglichte• keine Verwendung tief zerstörter Zähne oder Wurzelreste• keine früheren endodontischen Maßnahmen wie Pulpotomie oder Pulpektomie• keine interradikuläre Wurzelresorption• keine Wurzeldefekte wie z.B. Karies oder Fraktur• Vorhandensein von mehr als 2/3 der Wurzellänge• Mindestlänge von 5 mm• Durchgängigkeit von mind. drei Kanälen je Zahn mit einem Reamer der ISO-Größe 10 (VDW, München).

Um die Gängigkeit der Wurzelkanäle zu überprüfen, wurden die Zähne zunächst trepaniert. Dies erfolgte unter Wasserkühlung mit hochoberflächig rotierenden, grob-

diamantierten Schleifern (Zylinder, ISO 10; Komet, Brassler, Lemgo). Mit Hilfe eines Sonicflex-Handstücks mit inserierter diamantierter Spitze (KaVo, Biberach/Riß) wurde die Zugangskavität von Dentinüberhängen befreit. Mindestens drei Wurzelkanäle pro Milchmolar wurden mit Reamern der ISO-Größe 10 (VDW, München) bis zum Foramen apicale sondiert. Die Lagerung der Proben erfolgte in mit Wasser gefüllten Kunststoffbehältern (Abbildung 5).



Abbildung 5: Aufbewahrung der Zähne

2.1.1 Bestimmung der Zahngruppen anhand der Wurzelkanalmorphologie

Nach makroskopischer Betrachtung der Milchmolaren wurden die 46 Zähne in Zahnpaare vorsortiert. Dabei wurden die Größe der Zähne, die Anzahl der Wurzeln, die Länge der Wurzeln und die sichtbare Wurzelkrümmung berücksichtigt, um die anatomische Streuung zu reduzieren und um eine Vergleichbarkeit der Gruppen zu gewährleisten. Die sortierten *matched pairs* wurden mit einem wasserfesten Stift markiert, so dass sie für die weiteren Untersuchungen randomisiert und anschließend wieder zugeordnet werden konnten.

2.1.2 Präoperative Micro-CT Scans

Die Zähne wurden im Micro-CT (Bruker SkyScan 1272, Bruker AXS, Karlsruhe, Deutschland & Madison, USA) zur Erhebung dreidimensionaler Daten eingescannt. Ein Objektträger aus einem durchsichtigen Kunststoffzylinder und einem Metallständer diente zur Befestigung der Proben an das Gerät. Die Zähne blieben durch ein bewässertes Schaumstoffkissen in einem feuchten Zustand, das gleichzeitig die Fixierung sicherte. Für den Vor-Scan, der für die Gruppeneinteilung benötigt wurde, um vergleichbare Parameter der Zahnpaare präziser zu ermitteln, konnte eine niedrig auflösende Darstellung und dadurch eine geringere Scanzeit programmiert werden, sodass lediglich 4 min pro Zahn bzw. 7 min für zwei Zähne benötigt wurden. Vom Hersteller werden Vor-Scans empfohlen, um einschätzen zu können, wann und ob ein langer Scan benötigt wird (SkyScan Tutorial, S.12 2016). Nachdem die Proben vollständig gescannt wurden, mussten die erstellten Datensätze (sog. Rohdaten) mit einem weiteren Programm (NRecon) rekonstruiert werden. Durch die Rekonstruktion erfolgte eine präzise Auswahl aus mehreren Projektionen bzw. Radiographien, sodass Schnittbilder (rekonstruierte Bilder) entstanden. Durch Anwendung von Anschauungs- und Bearbeitungsprogrammen (DataViewer, CTvox) konnte eine genauere Bewertung und Klassifizierung der Zähne vorgenommen werden.

2.2 Einteilung der zwei Versuchsgruppen

Die folgenden Parameter wurden bei der Gruppierung der Zähne zugrunde gelegt: die Anzahl der Kanäle, die Form der Kanäle (rund, oval), die Wurzelkrümmung und die Wurzellänge.

Es wurden jeweils Paare mit weitestgehend identischer Anatomie gebildet. Die Zuweisung der beiden Zähne eines *matched pairs* zu einer der zwei Versuchsgruppen erfolgte durch Losentscheid.

2.3 Versuchsdurchführung

Die folgende Abbildung fasst den gesamten Versuchsablauf zusammen (Abbildung 6):



Abbildung 6: Flussdiagramm zur Versuchsdurchführung

2.3.1 Präparation Gruppe SAF

Die Verwendung des SAF-Wurzelkanalpräparationssystems erfolgte nach Herstellerangaben. Bevor die maschinelle Wurzelkanalpräparation mit einer SAF-Feile begonnen werden konnte, wurde zunächst manuell ein reproduzierbarer Gleitpfad bis zur ISO-Größe 20 erstellt. Die anschließende Präparation der 23 Zähne erfolgte drei Minuten lang pro Wurzelkanal mit einer kontinuierlichen Spülung von 1 %iger NaOCl-Lösung und einer Fließrate von 4 ml/min, die durch die integrierte Peristaltik-Pumpe erzeugt wurde. Der Endo-Behandlungskopf (Redent/RDT3) führt bei 5000 Umin^{-1} Hubbewegungen von 0,4 mm aus. Für jeden Zahn wurde eine neue Feile verwendet. Im Anschluss erfolgte eine manuelle Abschlusspülung mit 2 ml 10 %iger Zitronensäure pro Wurzelkanal unter Verwendung einer 5 ml Einwegspritze (B. Braun, Melsungen) und einer Spülkanüle der Größe 28G (Endoneedle, Vedefar, Belgien).

2.3.2 Präparation Gruppe Mtwo

Die Verwendung des Mtwo-Wurzelkanalpräparationssystems (VDW, München) erfolgte ebenfalls nach Herstellerangaben. Da es sich bei der Anwendung um eine *single-length*-Technik handelt, werden alle Feilen bis auf die Arbeitslänge eingebracht. Vorher ist ein Gleitpfad bis zur ISO-Größe 10 zu präparieren, da die dünnste Mtwo-Feile der ISO-Größe 10 entspricht. Jeder Wurzelkanal der 23 Zähne wurde bis auf ISO-Größe 30 erweitert, dafür waren fünf Feilengrößen notwendig (10/.04, 15/.05, 20/.06, 25/.06, 30/.05). Ein Austausch der Feilen fand nach jedem vierten Kanal statt. Nach jeder Feilengröße erfolgte eine Handspülung mit 2 ml 1 %iger NaOCl-Lösung, so dass am Ende die gleiche Menge an Spüllösung wie bei dem SAF-System verwendet wurde. Auch die Abschlusspülung wurde in beiden Gruppen identisch durchgeführt. Insgesamt wurde jede Wurzel mit einer Gesamtpülmenge von 12 ml 1 %iger NaOCl-Lösung und 2 ml 10 %iger Zitronensäure gesäubert.

2.4 Herstellung der Präparate für das REM

Jede Wurzel wurde longitudinal in zwei Wurzelkanalhälften gespalten, um eine Einsicht auf die Wurzelkanalwände mit dem REM zu ermöglichen. Um zu gewährleisten, dass das Kanallumen frei von Schleifstaub blieb, wurde ein passender Guttaperchastift eingeführt (VDW, München) (Abbildung 7). Mit einem groben Diamantenbohrer (Zylinder; Komet, Brasseler, Lemgo) wurden die Wurzeln der Milchmolaren von der Zahnkrone unter Wasserkühlung getrennt.

Mit Hilfe eines dünneren Diamantschleifers wurden parallel zum Wurzelkanal zwei Längsrillen als Sollbruchstellen angelegt (Abbildung 8).



Abbildung 7: Wurzelkanäle durch Guttaperchastifte blockiert, resorbierte Wurzeln
 Abbildung 8: Präparierte longitudinale Sollbruchstellen

Mit einem Heidemannspatel (Aesculap, Tuttlingen, Deutschland) und einem Hammer wurden die Wurzeln entlang der Rille vorsichtig gespalten. Im Idealfall entstanden zwei Bruchpräparate der Wurzelkanäle, dies gelang jedoch nicht immer. In allen Fällen war aber mindestens eine Wurzelhälfte für die raster-elektronenmikroskopische Auswertung geeignet. Die Proben wurden auf Aluminiumnieten (Gespia, Mörfelden-Walldorf) mit lichthärtendem Kunststoff (Heraeus Kulzer, Hanau) befestigt, um sie in der Probenhalterung des Rasterelektronenmikroskops befestigen zu können.



Abbildung 9: Trocknung der auf Nieten fixierten Wurzelhälften

Die Trocknung der Wurzelkanalhälften erfolgte auf natürlichem Wege über zwei Wochen (Abbildung 9), so dass eine permanente Fixierung der Oberflächenstruktur durch eine dünne Platin-Palladiumschicht zur Herstellung der elektrischen Leitfähigkeit möglich war (Besputterung mit Leica EM ACE 200, Leica Microsysteme, Wetzlar). Dies macht eine REM-Untersuchung möglich, in der ein Elektronenstrahl auf die oberflächliche Goldschicht trifft, die durch einen Bild-

nehmer elektronisch und vergrößert wiedergegeben werden kann (Raster-elektronenmikroskop DSM 960, Zeiss, Oberkochen) (Abbildung 10/Abbildung 11).



Abbildung 10: Proben im Fein-
vakuum zur Besputterung

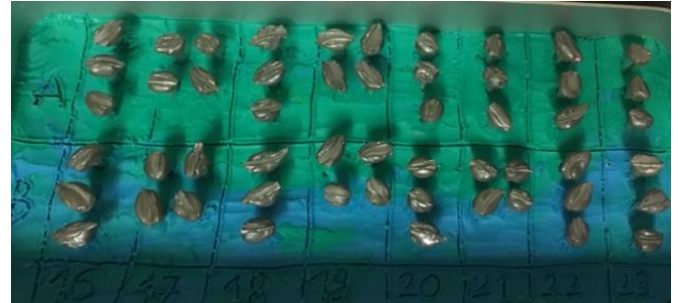


Abbildung 11: Proben nach Besputterung

2.5 Auswertung der REM-Bilder

Es wurde von jeder Wurzelkanalhälfte jeweils koronal und apikal stichprobenartig ein zufällig gewählter Bereich in einer 1000-fachen Vergrößerung festgehalten. Insgesamt waren zwei Wurzelproben nicht auswertbar. Es wurden 328 Aufnahmen von 46 Zähnen angefertigt, von denen 326 bewertet wurden, beide aussortierten Bilder stammen aus der SAF Gruppe. Eine Aufnahme stellte im Kanallumen eine Instrumentenfraktur dar, welche makroskopisch nicht erkennbar war und eine weitere Aufnahme deutete auf eine apikale Verblockung hin.

Die Bewertung der Sauberkeit erfolgte nach einem Vier-Punkte-Score-System von zwei zuvor kalibrierten und unabhängigen Untersuchern. Die digitalen Bilder der Probekörper wurden anonym und randomisiert erstellt und bewertet, so dass die Gruppenzugehörigkeit nicht bekannt war.

2.5.1 *Smear layer Scores*

Zur Bewertung des *smear layer* wurde das folgende vierstufige Score-System unter 1000-facher Vergrößerung verwendet:

Score 1: Kein oder fast kein *smear layer* an der Wand, 75–100 % der Dentintubuli sind offen (Abbildung 12)

Score 2: Etwas *smear layer* an der Wand, 50–74 % der Dentintubuli sind offen (Abbildung 13)

Score 3: Kanalwand zum Teil mit *smear layer* bedeckt, 25–49 % der Dentintubuli sind offen (Abbildung 14)

Score 4: Durchgängige *smear layer*-Schicht, keine oder weniger als 25 % offene Dentintubuli (Abbildung 15).

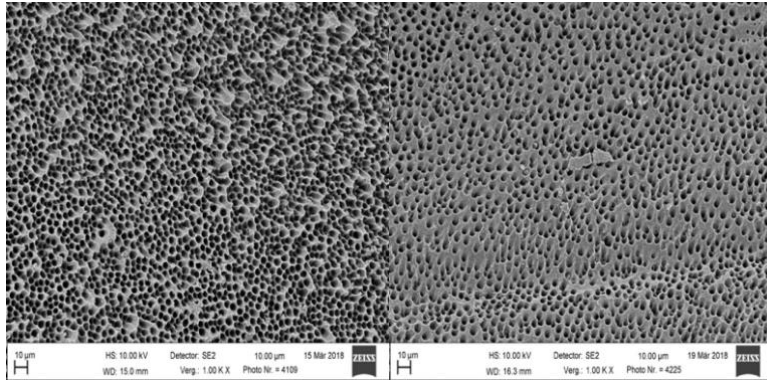


Abbildung 12: Score 1: Kein oder fast kein *smear layer* an der Wand, 75 –100 % der Dentintubuli sind offen

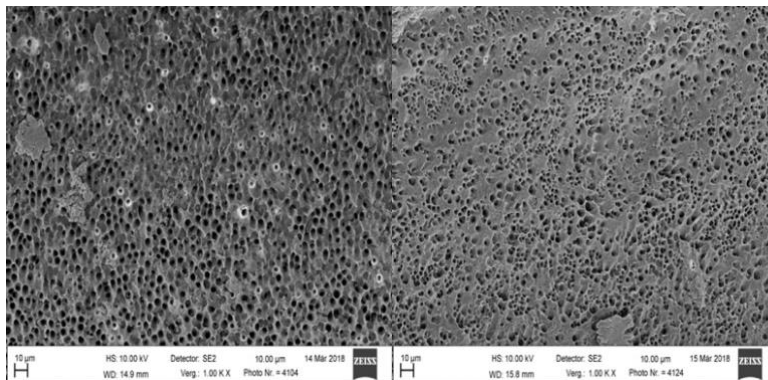


Abbildung 13: Score 2: Etwas *smear layer* an der Wand, 50–74 % der Dentintubuli offen

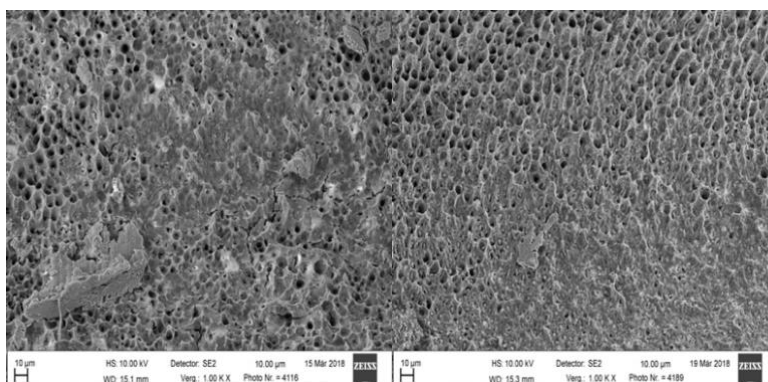


Abbildung 14: Score 3: Kanalwand zum Teil mit *smear layer* bedeckt, 25–49 % der Dentintubuli sind offen

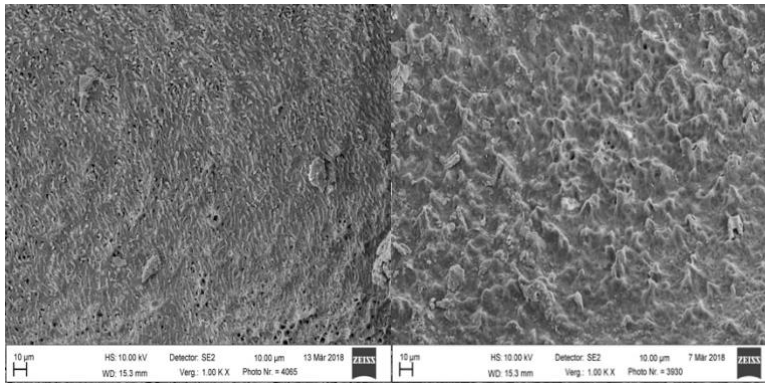


Abbildung 15: Score 4: Durchgängige *smear layer*-Schicht, keine oder weniger als 25 % offene Dentintubuli

2.5.2 Kalibrierung der Untersucher

Die Kalibrierung erfolgte anhand von 50 REM-Bildern. Bei der Auswahl der Kalibrierungsbilder wurde darauf geachtet, dass möglichst jeder Score-Wert gleichmäßig vertreten war. Nach zwei Wochen erfolgte eine Wiederholung. Die Bewertung der zwei Untersucher erfolgte unabhängig voneinander. Bei Bewertungsabweichungen von mehr als einem Score wurden diese mit einem Experten besprochen.

Die Auswertung der 326 REM-Bilder erfolgte eine Woche nach der Kalibrierung mit dem in 2.5.1 genannten *smear layer*-Score-System.

2.6 Statistische Auswertung

Die explorative Analyse der beiden Gruppen wurde mit dem Mann-Whitney-U-Test und Bonferroni-Korrekturen bei einem Signifikanzniveau von 0,05 ($p < 0,05$) durchgeführt. Insgesamt wurden 328 Aufnahmen angefertigt, von denen 326 ausgewertet werden konnten. Zwei Aufnahmen der SAF Gruppe ließen sich nicht auswerten. Bei den zu untersuchten Parametern zur Bestimmung der Sauberkeit der Wurzelkanalwände handelt es sich um eine qualitativ kategoriale Gruppierung mit ordinal skalierten Merkmalen.

Die statistische Auswertung wurde mit dem SPSS *statistics program* (Version 27.0 für Macintosh, IBM Corp., Armonk, New York, USA) erstellt. Mit Hilfe von Word und Excel (Microsoft Corp., Redmond, Washington, USA) wurden die Tabellen und Diagramme entworfen.

3 Ergebnisse

3.1 Reliabilität der Observer

Die intraindividuelle Reproduzierbarkeit der jeweiligen Observer und die interindividuelle Übereinstimmung zwischen den beiden Ratern wurde mit dem Cohen's Kappa berechnet und ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Intra- und Interindividuelle Reliabilität (Cohen's Kappa)

Intraindividuelle Reproduzierbarkeit	
Observer 1	0,87
Observer 2	0,79
Interindividuelle Übereinstimmung	
1. Bewertung	0,72
2. Bewertung	0,73

Es ist zu erkennen, dass die Werte eine beachtliche Übereinstimmung aufwiesen (Landis und Koch 1977).

3.2 Beurteilung der Reinigungswirkung (*smear layer*)

Tabelle 4 fasst die Auswertung der rasterelektronischen Untersuchung zusammen.

Tabelle 4: Verteilung der Reinigungsparameter nach Lokalisation und Häufigkeit in den beiden Versuchsgruppen

<i>smear layer</i> Score	Lokalisation	Mtwo	SAF
1	koronal	47	49
	apikal	34	31
2	koronal	15	21
	apikal	23	22
3	koronal	14	5
	apikal	19	16
4	koronal	6	6
	apikal	6	12

Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse zur Entfernung der *smear layer* im koronalen und apikalen Wurzelkanalanteil unabhängig von der Gruppenzuordnung.

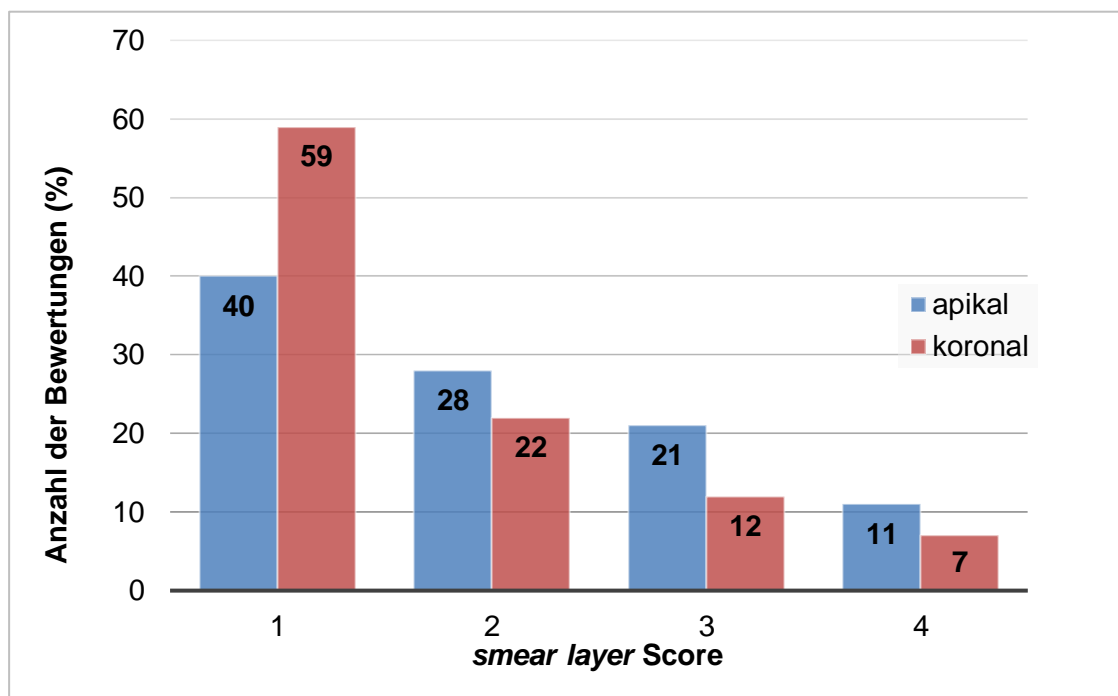


Abbildung 16: Prozentuale Verteilung der Scores für den *smear layer* (apikal und koronal)

Insgesamt ist zu erkennen, dass apikal und koronal am häufigsten der beste Reinigungswert (Score 1) vergeben wurde: 59 % der Wurzeln wurden im koronalen Bereich komplett und/ oder bis zu 75 % von *smear layer* gereinigt, im apikalen Bereich waren es 40 % aller Wurzeln. Der schlechteste Score 4 wurde am seltensten vergeben. Je schlechter die Reinigungsbewertung, desto häufiger war diese im apikalen Bereich zu beobachten.

Der Median für den apikalen Wurzelkanalbereich liegt bei Score 2, koronal bei Score 1. Der Score 4 wurde für den koronalen Bereich nur vereinzelt vergeben. Der Mittelwert für die apikale Reinigung liegt bei 2,04 und für die koronale Reinigung etwas besser bei 1,67.

3.2.1 Reinigungswirkung in der Gruppe Mtwo

Die Verteilung der Scores für die Präparation mit Mtwo ist in Abbildung 17 dargestellt.

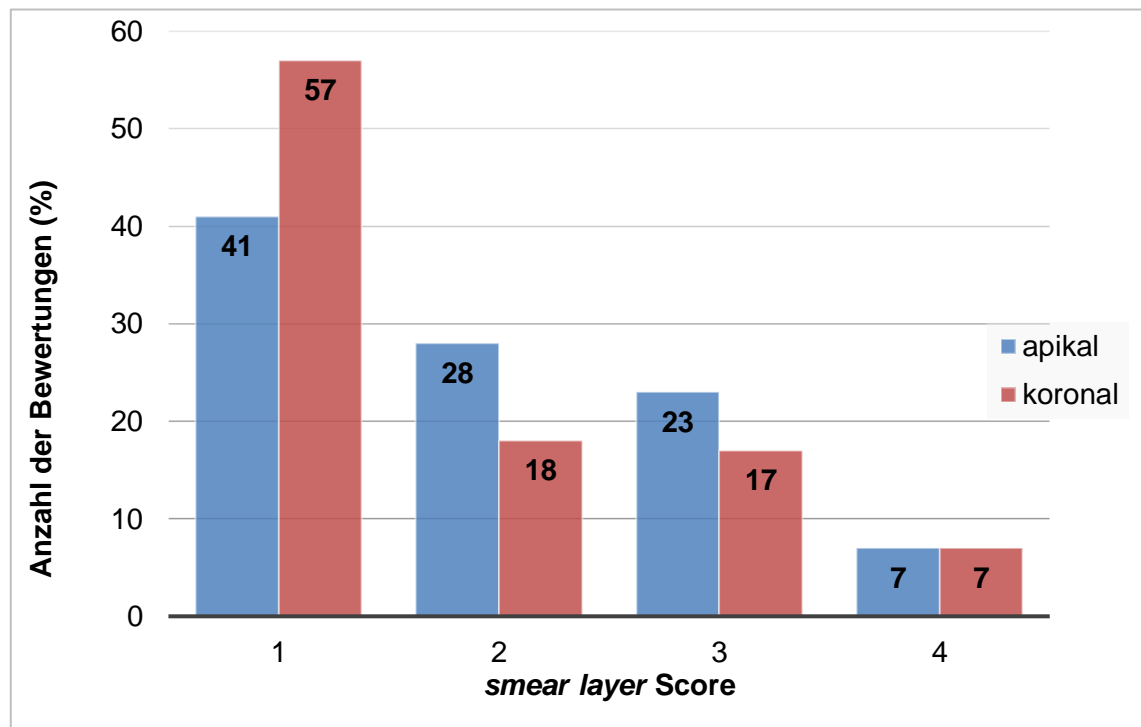


Abbildung 17: Verteilung der *smear layer*-Scores der Gruppe Mtwo

Im koronalen Bereich ist Score 1 mit 57 % am häufigsten vertreten (Abbildung 17): 41% der Proben erhielten im apikalen Wurzelbereich sehr gute Scores für die Reinigung. In den apikalen Abschnitten wurde häufiger mit Score 2 und 3 bewertet.

3.2.2 Reinigungswirkung in der Gruppe SAF

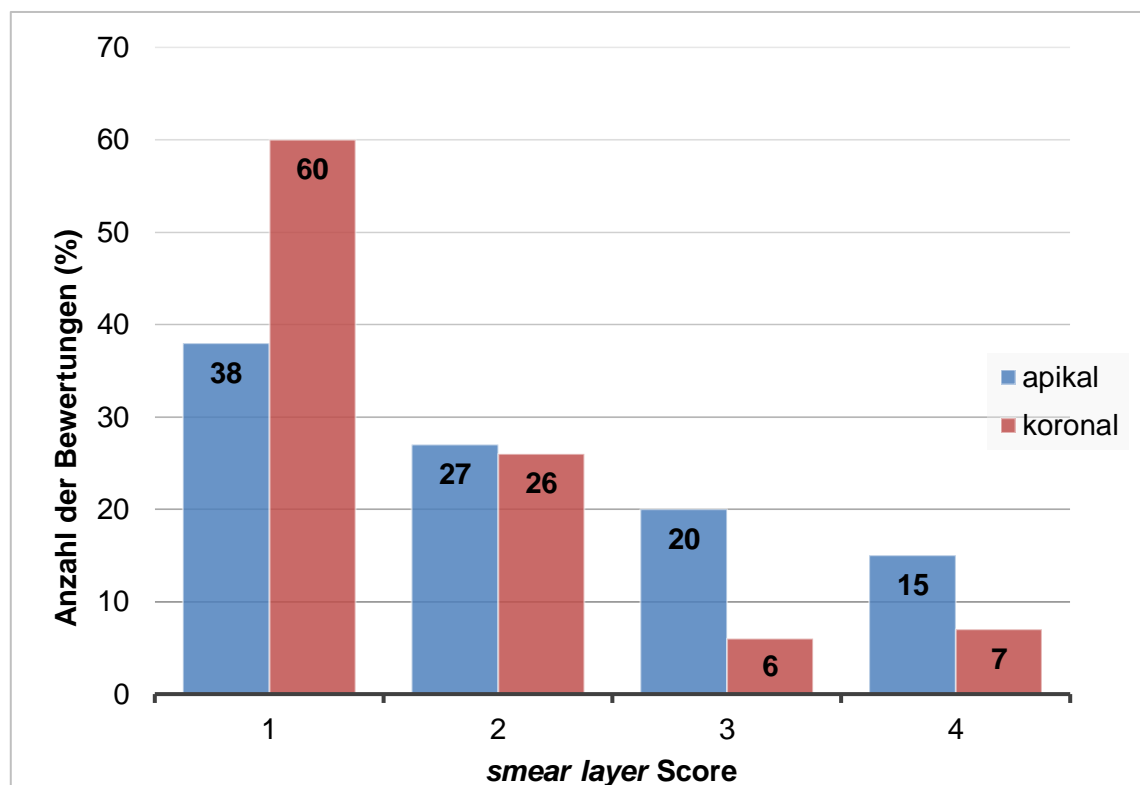


Abbildung 18: Verteilung der *smear layer*-Scores der Gruppe SAF

Die Bewertung ergab für die SAF im koronalen Bereich in 60 % der präparierten Wurzeln sehr gute Reinigungswerte (Score 1) (Abbildung 18). Die apikalen Abschnitte erreichten in 38 % der Fälle die Bewertung mit dem Score 1. Score 2 wurde in dieser Gruppe koronal und apikal fast gleich häufig vergeben. Einen deutlicheren Unterschied erkennt man bei den Scores 3 und 4, die im koronalen Bereich nur noch in 6 % und 7 % der Proben vergeben wurden, wohingegen 20 % und 15 % der Proben in der apikalen Wurzelhälfte mit Score 3 und 4 abschnitten. Somit hat SAF apikal mehr Ausreißer in Richtung schlechter bis sehr schlechter Reinigungsergebnisse (Score 4) als Mtwo.

3.3 Reinigungswirkung im Gruppenvergleich

Unabhängig von der Lokalisation liegen die Mediane sowohl für Mtwo als auch für SAF bei Score 2. Die Mittelwertwerte liegen für beide Gruppen um die 1,85. Einen Unterschied findet sich im 75 %-Quantil, das sich bei der Gruppe Mtwo an Score 3 befindet und bei der Gruppe SAF an Score 2 liegt. Der Score 4 tritt in Gruppe SAF nur als Ausreißer auf.

Wird die Score-Verteilung nur im koronalen Wurzelabschnitt betrachtet, liegen bis zu 75 % der Bewertungen sowohl für Mtwo als auch für SAF bei Score 1 und 2. In beiden Gruppen tritt Score 4 lediglich als Ausreißer auf. Der Mittelwert der koronalen Bewertungen für Gruppe SAF liegt mit 1,60 leicht unter dem Mittelwert für Gruppe Mtwo mit 1,74.

Die Mediane für den apikalen Bereich liegen in Gruppe Mtwo und SAF bei Score 2 und das obere Quantil bei Score 3. Im Vergleich zum koronalen Bereich hat die Häufigkeit der Scores 3 und 4 im apikalen Bereich zugenommen. Auch die Mittelwerte sind etwas gestiegen, wobei diesmal Gruppe SAF mit 2,11 etwas höher liegt als Gruppe Mtwo mit 1,96.

Insgesamt ist zu erkennen, dass sich die Werte für beide Gruppen sehr ähneln.

3.4 Statistik

Mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Test wurden die beiden Gruppen verglichen, dabei gab es keinen signifikanten Unterschied in der Reinigungswirkung zwischen den beiden untersuchten Präparationssystemen (Tabelle 5 Tabelle 6).

Tabelle 5: Gruppenvergleich zwischen SAF und Mtwo

Vergleich zwischen SAF und Mtwo <i>smear layer</i> Score: apikal und koronal	p= 0,95
Vergleich zwischen SAF und Mtwo <i>smear layer</i> Score: koronal	p = 0,44
Vergleich zwischen SAF und Mtwo <i>smear layer</i> Score: apikal	p = 0,45

Es wurde im Gruppenvergleich weder koronal noch apikal zwischen SAF und Mtwo eine Signifikanz bei einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ festgestellt, somit kann die Nullhypothese, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Reinigungswirkung zwischen den beiden Präparationssystemen gibt, angenommen werden.

Tabelle 6: Vergleich nach Lokalisation

Vergleich zwischen apikal und koronal Ohne Berücksichtigung der Gruppen	$p = 0,001$ mit Bonferroni-Korrektur: $p = 163 \times 0,001 = 0,163$
Vergleich zwischen apikal und koronal Gruppe Mtwo	$p = 0,091$
Vergleich zwischen apikal und koronal Gruppe SAF	$p = 0,001$ mit Bonferroni-Korrektur: $p = 82 \times 0,001 = 0,081$

In Tabelle 6 wurde ein Vergleich zwischen koronaler und apikaler Kanalhälfte ohne Berücksichtigung der Gruppen durchgeführt, dabei wurde mit dem Mann-Whitney-U-Test ein signifikanter Unterschied ($p = 0,001$) festgestellt, d.h. dass die koronale Reinigungswirkung signifikant besser war als die apikale.

Betrachtet man die Gruppen separat nach Lokalisation, zeigte Gruppe Mtwo keinen signifikanten Unterschied zwischen der koronalen und der apikalen Reinigung ($p = 0,09$). Gruppe SAF hingegen zeigte koronal eine signifikant bessere Reinigungsbewertung als apikal ($p = 0,001$).

Um die Wahrscheinlichkeit von Zufallsbefunden zu senken, da es sich um multiple Tests handelt, wird bei den ermittelten Signifikanzen die Bonferroni-Korrektur angewendet, wonach die Werte nicht mehr im Signifikanzbereich von $\leq 0,05$ liegen (Tabelle 6).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es statistisch gesehen keinen signifikanten Unterschied in der Reinigungswirkung zwischen den beiden Präparationssystemen gibt. Mit beiden Systemen wurden jedoch überwiegend gute Reinigungswerte erzielt. Tendenziell fiel in beiden Gruppen die koronale Reinigung besser aus als die apikale.

4 Diskussion

4.1 Diskussion von Material und Methode

4.1.1 Auswahl der Zähne und Gruppenzuordnung

Die vorliegende Studie befasst sich ausschließlich mit Milchmolaren, da diese am längsten im Milchgebiss verweilen, häufig an Karies mit Pulpabeteiligung erkranken und frühzeitig gezogen werden müssen (Hughes und Alsheneifi 2001; Grund et al. 2015; Bani et al. 2015; Murshid et al. 2016). Bei günstigen Voraussetzungen ist der Zahnerhalt durch eine Pulpektomie, vor allem der zweiten Milchmolaren, in Erwägung zu ziehen, um die Stützzone zu sichern, Fehlstellungen und Engstand zu vermeiden und dadurch verursachte Durchbruchstörungen zu verhindern (Miyamoto et al. 1976; Bindayel 2019).

Es wurden humane extrahierte Milchmolaren gewählt, um eine realitätsnahe Sauberkeit der Wurzelkanalwände nach der Präparation zu analysieren. Es fand bei der Auswahl keine Differenzierung zwischen Oberkiefer- und Unterkiefermolaren sowie zweiten oder ersten Molaren statt. Die Bildung von *matched pairs* macht eine solche Differenzierung überflüssig, da sich in jeder Gruppe gleich viele und gleichartige Zähne beider Kieferregionen finden.

Das Kriterium des Resorptionsstatus ist klinisch schwer zu erfassen, da der Resorptionsprozess an Milchmolaren interradiikulär erfolgt, wodurch das Wurzel-dentin dort dünner ist und röntgenologisch keine Resorption ersichtlich erscheint (Fumes et al. 2014). Es liegen Studien vor, die regenerative Immunzellen in bereits stark resorbierten Zähnen entdeckt haben (Monteiro et al. 2009; Rajan et al. 2014). Diese Beobachtungen sprechen für zahnerhaltende Maßnahmen wie Pulpotomie oder Pulpektomie auch an stärker resorbierten Milchzähnen. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Erfolgsrate einer Pulpektomie bei präoperativ stark resorbierten Wurzeln signifikant sinkt und die Gefahr der apikalen Extrusion von Debris und dadurch erzeugte Zellkeimschädigung steigt (Thakur et al. 2017; Brar et al. 2019; Topçuoğlu et al. 2020). Nach den aktuellen Empfehlungen der DGZMK zur endodontischen Behandlung von Milchzähnen darf die Wurzellänge zwei Drittel der ursprünglichen Wurzellänge nicht unterschreiten (Kühnisch et al. 2011). In einer Studie an 80 extrahierten Milchmolaren wurde festgestellt, dass Resorptionen im Furkationsbereich häufiger auftraten, wenn die Wurzellänge kürzer als 4 mm war, was somit als Grenze der Behandelbarkeit eingeschätzt werden kann (Rimondini und Baroni 1995). In der vorliegenden Studie handelte es sich ebenfalls um extrahierte Zähne, so dass eine genaue Analyse der Resorptionszustände möglich war. Die mit Hilfe eines dünnen Reamers der ISO-

Größe 10 ermittelten Wurzelkanallängen betragen zwischen 6 und 11 mm, kürzere Wurzelkanäle wurden aus der Studie ausgeschlossen.

Die Fallzahl der vorliegenden Studie von 46 Milchmolaren ließ eine Aufteilung in zwei vergleichbare Gruppen mit je 23 Proben zu. Für eine dritte neutrale Kontrollgruppe wären ungefähr 15 Zähne je Gruppe in Betracht gekommen, dies hätte die Einteilung in *matched pairs* erschwert und die Aussagekraft der Studienergebnisse gemindert. Aktuell liegen keine Studien an Milchzähnen mit einer vergleichbar hohen Fallzahl vor. Um gleiche Bedingungen innerhalb der Versuchsreihe zu schaffen, erfolgte die Zuordnung der Zahngruppenpaare in *matched pairs*. Zunächst wurde darauf geachtet, dass alle extrahierten Zähne eine intakte Zahnkrone besitzen, die während der Wurzelkanalpräparation als Reservoir für die Spüllösung diene. Es wurden annähernd gleiche Ausgangsbedingungen nach Größe der Zähne, Anzahl der Wurzeln, Form, Länge und Krümmung der Wurzeln angestrebt, da die Wurzelkanalmorphologie von Milchzähnen stark variiert (Kurthukoti et al. 2015; Katge und Wakpanjar 2018). Die Verwendung humaner extrahierter Milchzähne bietet keine exakt gleichartig anatomische Voraussetzung der Proben. Dies wäre nur mit künstlich hergestellten Zähnen möglich, wie in einer Pilotstudie von Hecksher et al. (2019) zur Bestimmung der Bearbeitungszeit an künstlichen Milchzähnen mit manuellen und maschinellen Feilen gezeigt wurde. Eine genaue Reproduktion der Wurzelkanaleigenschaften mit all ihren organischen und anorganischen Zusammensetzungen und Strukturen ist kaum möglich und würde die klinische Relevanz besonders zur Bestimmung der Reinigungswirkung senken. Aus diesem Grund wurden die Wurzelkanäle der vorliegenden Studie auch nicht eingefärbt, wie es in einigen Studien durchgeführt wurde (Pascon et al. 2007; Pascon et al. 2012; Azar et al. 2012; Ramezanali et al. 2015; Katge et al. 2016). Die Einfärbung vereinfacht eine Bewertung der Sauberkeit, jedoch repräsentiert sie nicht die natürliche *smear layer*-Entfernung.

4.1.2 Auswahl der Präparationssysteme

Das SAF-System wurde auf Grund seiner innovativen Struktur ausgewählt, da sich die Feilen durch die komprimierbare Netzstruktur an die Querschnittsform der Wurzelkanäle anpassen können. Vor allem ovale und irreguläre Wurzelkanäle, wie sie bei Milchmolaren häufig vorzufinden sind (s. 1.2.3), können so gleichmäßig bearbeitet werden (Metzger et al. 2010b; Paqué und Peters 2011; De-Deus et al. 2011; Solomonov et al. 2012; Metzger 2014; Shah et al. 2017). Eine weitere vorteilhafte Innovation ist die integrierte, permanent aktivierte Spülung. Die SAF zeigte sich in Studien im Vergleich zu rotierenden Systemen als effektiver (Versiani et al. 2011; Bakir et al. 2014), substanzschonender und

kaum bis keine Dentin-Risse verursachend (Yoldas et al. 2012; Hin et al. 2013; Kfir et al. 2017; Zuolo et al. 2017; Bayram et al. 2017; Pawar et al. 2019). Diese Eigenschaften stellen gute Voraussetzungen für eine sichere Präparation an den feinen Milchzahnwurzeln dar. In einigen Studien an Milchzahnwurzelkanälen zeigte die SAF mit der kurzen Arbeitszeit, dem geringen Dentinabtrag und guter Arbeitssicherheit zufriedenstellende Resultate (Kaya et al. 2017; Hidalgo et al. 2017; Buldur et al. 2018; Manker et al. 2019).

In der vorliegenden Studie sollte an Milchzähnen, die Reinigungsleistung des SAF-Systems unter dem REM bewertet und mit dem rotierenden NiTi-System Mtwo verglichen werden. Aktuell gibt es keine vergleichbare Studie zur Reinigungsleistung dieser beiden Systeme.

Das etablierte Mtwo-System diene mit seinen maschinell rotierenden NiTi-Feilen als Vergleichsgruppe. Es arbeitet mit einer *single-length*-Technik und einer Auswahl mehrerer Feilengrößen. Die Mtwo-Feile gibt es bereits ab einer schmalen ISO-Größe von 10/.04, die die Präparation eines Gleitpfades oftmals erübrigt. Zur Präparation gekrümmter Wurzelkanäle in permanenten Zähnen bewährte sich das Mtwo-System und zeigte eine gute Anpassung an den Wurzelkanalverlauf (Schäfer et al. 2006a; Sonntag et al. 2007; Giovannone et al. 2008; Vallaeyss et al. 2016). Mtwo als Mehrfeilensystem arbeitete signifikant schneller als das SAF-Einfeilensystem (Müller 2018). Eine Kombination mit einer maschinellen Gleitpfadpräparation könnte möglicherweise die Präparationszeit der SAF verkürzen. Die schnelle Bearbeitungszeit der Mtwo-Feilen könnte durch die Instrumentengeometrie mit zwei aktiven Schneidekanten begründet sein. Da sie eine nicht schneidende Spitze und einen s-förmigen Verlauf besitzen, bieten die Mtwo-Feilen Sicherheit und einen guten koronalen Abtransport des Dentins der bearbeiteten Wurzelkanalwände (Kuzekanani et al. 2009; Shivashankar et al. 2016; Mesgarani et al. 2018). Im Vergleich zu anderen rotierenden Feilen stellten Khoshbin et al. (2018) weniger Mikrorisse nach der Präparation mit Mtwo fest. Im Vergleich zur SAF erzeugte Mtwo jedoch mehr Dentin-Mikrorisse (Hin et al. 2013). Die Präparation ovaler Wurzelkanäle könnte eine Limitation für den Einsatz der Mtwo-Feilen darstellen, da sie aufgrund ihrer Feilengeometrie runde Durchmesser erzeugen (ElAyouti et al. 2008; Pontes et al. 2014).

Einige Studien untersuchten die Anwendung von Mtwo an Milchzähnen und erzielten akzeptable Ergebnisse (Azar et al. 2012; Poornima et al. 2015; Ramazani et al. 2016). Besonders überzeugen konnte Mtwo mit seiner kurzen Bearbeitungszeit (Azar und Mokhtare 2011; Katge et al. 2016; Krishna et al. 2019). Insgesamt kann anhand der Literatur eine sichere, effektive und schnelle Präparation an Milchzahnwurzelkanälen mit Mtwo konstatiert werden.

Für eine optimale Reinigung ist die Präparationsgröße ein entscheidender Faktor, da die apikale Reinigung von der Größe des Instrumentendurchmessers beeinflusst wird (Fornari et al. 2010). Zu viel Dentinabtrag steigert jedoch die Gefahr einer Perforation, besonders bei den filigranen Milchzahnwurzeln (Barr et al. 2000; Kummer et al. 2008). In der Literatur gibt es keine eindeutigen Empfehlungen bezüglich der Präparationsgröße an Milchmolaren, so dass für Mtwo die ISO-Größe 30 festgelegt wurde, da ab dieser Präparationsgröße ein friktionsloses Einbringen der Spülkanüle bis zum Apex möglich ist (Ram 1977; Boutsoukis et al. 2010). Das SAF-System wird nicht ISO-Größen zugeordnet, jedoch ist die Spülung integriert. Das Einbringen der Feile bis zur Arbeitslänge ist entscheidend, hierfür wurde die kleinste SAF-Feile für die Milch Zahnpräparation mit einem Durchmesser von 1,5 mm und einer Länge von 21 mm gewählt. Bei der Präparation der Milchzahnwurzeln wurde festgestellt, dass häufig eine Gleitpfadpräparation notwendig war, um die SAF bis auf die Arbeitslänge zu führen. Da die Gleitpfadpräparation manuell mit Hilfe von Hedströmfeilen erfolgte, steigerte sich die Präparationszeit (Müller 2018). Um die Anwendung der SAF zu beschleunigen, wäre eine Herstellung schmalerer SAF-Feilen notwendig oder eine maschinelle Gleitpfadpräparation.

4.1.3 Auswahl der chemischen Desinfektion

Nach der Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kinderzahnheilkunde ist bei Milchzahnwurzelkanalbehandlungen die chemische oder mechanische Reinigung vorzuziehen (Kühnisch et al. 2011). Die Sauberkeit der Wurzelkanalwand und das Schaffen eines möglichst bakterienfreien Milieus tragen wesentlich zum Erfolg der Pulpektomie bei (Tannure et al. 2009). Ein wichtiger Aspekt ist somit die Auswahl der chemischen Desinfektionslösung. Zur chemischen Desinfektion wurden die an Milchzähnen bewährten und empfohlenen Spüllösungen gewählt (Salama und Abdelmegid 1994; Hariharan et al. 2010; Tannure et al. 2011; Ahmed 2013; AAPD 2016; Demirel et al. 2019; Yüksel et al. 2020): dazu zählen die 1 %ige NaOCl- und die 10 %ige Zitronensäure-Lösung, die in beiden Gruppen als manuelle Abschlusspülung zur Entfernung des *smear layer* diente. Um vergleichbare Reinigungsbedingungen zwischen den Gruppen zu schaffen, wurde das Spülvolumen angepasst. Der regelmäßige Austausch der Spüllösung während der Präparation und die Einwirkzeit üben einen entscheidenden Effekt auf die Reinigungsleistung aus (Siqueira et al. 2000; Haapasalo et al. 2014). Alves et al. (2011) stellten fest, dass mit dem SAF-System schon nach 2 min Präparationszeit eine bakterielle Reduktion erreicht werden konnte.

Es wurde festgestellt, dass die Anwendung von Zitronensäure zu Dentin-Erosionen führen und starke Demineralisation des intertubulären Wurzel dentins verursachen kann (Takeda et al. 1999; Götze et al. 2005; Hegde und Bapna 2016; Vallabhaneni et al. 2017). Aus diesem Grund erfolgte nach der Abschlusspülung ein neutralisierendes Ausspülen der Wurzelkanäle. Die Anwendung von 6 %iger Zitronensäure hat sich an Milchzähnen bewährt und in Studien keine Dentinschäden verursacht (Hariharan et al. 2010; Demirel et al. 2019). Die Abschlussreinigung mit EDTA konnte in Verbindung mit NaOCl an extrahierten Milchzähnen ebenfalls in der *smear layer*-Entfernung überzeugen und stellt eine gleichwertige Alternative dar, welche jedoch mit höheren Kosten verbunden ist (Pitoni et al. 2011; Pascon et al. 2012). Weitere Desinfektionslösungen wurden in der Literatur zur Reinigung von Milchzahnwurzelkanälen erforscht und empfohlen wie z.B. Kochsalzlösung (NaCl), Chlorhexidin (CHX) und Kombinationspräparate (Rodd et al. 2006; Nelson-Filho et al. 2009; Louwakul und Prucksathamrongkul 2012; Kour et al. 2018).

Die Gefahr des Überpressens der Spüllösung im apikalen Bereich wurde in der vorliegenden Studie nicht überprüft. Aktuell liegen nur wenige Studien vor, die dies untersuchten (Kucukyilmaz et al. 2015). In der Literatur finden sich häufig Angaben zur apikalen Debris-Extrusion. Die Menge des extrudierten Debris ist abhängig von Präparationssystem und -technik. Studien zeigten, dass die manuell eingesetzte Handfeile mehr Extrusionen verursachte als die maschinellen Systeme (Topçuoğlu et al. 2016; Thakur et al. 2017; Buldur et al. 2018; Topçuoğlu et al. 2020). Die apikale Extrusion zytotoxischer Spülmedien und mikrobieller Ablagerungen in die periradikulären Gewebe sollte in der Milchzahnwurzelkanalbehandlung stärker berücksichtigt und untersucht werden, da sie zum klinischen Misserfolg und zur Keimschädigung führen kann (Siqueira 2003).

Der Vergleich beider unterschiedlicher NiTi-Systeme umfasst gleichzeitig einen Vergleich verschiedener Spültechniken: der permanent aktivierten Schallspülung (SAF-System) und der konventionell intermittierenden dynamischen Handspülung (Mtwo). Der reinigungssteigernde Effekt durch die aktivierte Spülung wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Studien berichten von einer gesteigerten Reinigungswirkung durch Nutzung mechanisch aktivierter Spülmethode an permanenten Zähnen (Hülsmann et al. 1997; Jiang et al. 2012; Urban et al. 2017; Susila und Minu 2019). In einer klinischen Studie wurden an 50 Milchmolaren Wurzelkanalbehandlungen mit Ultraschallaktivierung durchgeführt und verzeichneten eine Erfolgsrate von 97,5 % nach ca. 19 Monaten (Singh et al. 2017). Forghani et al. (2017) hingegen stellten bei der Bearbeitung von einwurzeligen Milchzähnen mit dem EndoActivator im Vergleich zur konventionellen Handspülung keine signifikanten Vorteile fest.

4.1.4 Herstellung der Proben für das REM

Die *matched pairs* wurden mit einem wasserfesten Stift kennzeichnet, so dass die Versuche und Bewertungen anonymisiert durchgeführt werden konnten und erst nach der Auswertung der Gruppenvergleich stattfand. Auch nach Präparation und Reinigung aller Zähne wurde jede Wurzel codiert, getrocknet und dann separiert. In der Studie fand keine Differenzierung der Zahnarten oder der Wurzelkanallage statt, da die Anzahl der Milchmolaren begrenzt war und die Wurzelkanal-Morphologie stark variabel und komplex ist (Cleghorn et al. 2010; Fumes et al. 2014; Kurthukoti et al. 2015). Bei einer größeren Anzahl von Proben wäre eine genaue Differenzierung der Zähne und Wurzelformen sinnvoll, um z.B. die Reinigungswirkung in runden oder ovalen Kanälen getrennt analysieren zu können.

Zur Darstellung und Bestimmung der Sauberkeit der Wurzelkanalwände ist eine gute Gesamtübersicht über das Kanallumen notwendig, dafür musste jede Milchzahnwurzel längs gespalten werden. Durch die Spaltung wurde eine von außen verursachte Verschmutzung der Wurzelkanalinnenwand riskiert; um dies zu verhindern, wurde vor der Trennung und Spaltung der Wurzeln ein passender Guttaperchastift eingelegt. Der Spaltungsvorgang erfolgte wie in vorausgegangenen Studien an permanenten Zähnen (Hülsmann et al. 1997; Prati et al. 2004; Zmener et al. 2005) und Milchzähnen (Götze et al. 2005; Pinheiro et al. 2012; Balto et al. 2015).

Eine Einteilung in apikale und koronale Abschnitte war unter dem REM möglich, wodurch insgesamt 328 Aufnahmen von 46 Zähnen angefertigt werden konnten. 326 waren auswertbar, da zwei Aufnahmen der Gruppe SAF nicht beurteilt werden konnten und der Ausschluss lediglich im REM ersichtlich war: Eine Aufnahme zeigte im Kanallumen eine Instrumentenfraktur (Abbildung 19), welche makroskopisch nicht zu erkennen war und vermutlich eine feine Querstrebe der SAF oder eine feine Handfeilenspitze, die zur Gleitpfadpräparation diente, abbildete. Eine weitere Aufnahme deutete auf eine apikale Verblockung des Wurzelkanals hin (Abbildung 20).

Dieser Defekt könnte durch eine mangelnde Beachtung der Arbeitslänge zurückzuführen sein. Beide Aufnahmen stammen aus der SAF-Gruppe.

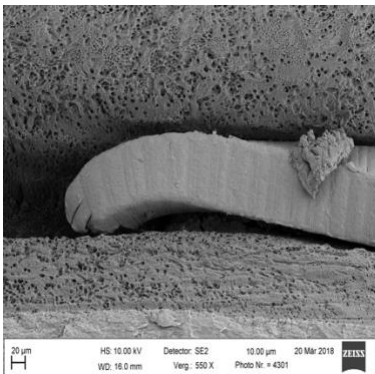


Abbildung 19: Wurzelkanal mit Instrumentenfragment

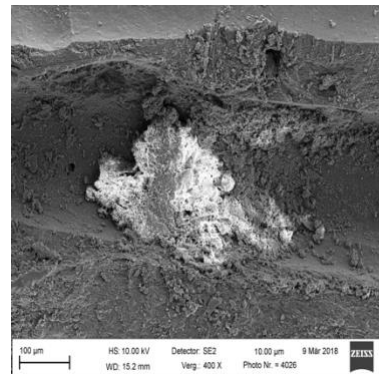


Abbildung 20: Wurzelkanal mit apikaler Verblockung

4.1.5 Auswertung der REM-Aufnahmen

Die REM-Aufnahmen wurden nach dem Zufallsprinzip im koronalen und apikalen Bereich angefertigt. Hierzu wurde bei niedrigster Vergrößerung ein zentraler Bezirk im koronalen und apikalen Kanalanteil ausgewählt und anschließend erst bei höherer Vergrößerung die Sauberkeit bewertet. Dies sollte verhindern, dass zur Auswertung nur selektierte Bezirke, z.B. mit starker Verschmutzung oder extremer Sauberkeit ausgewählt wurden.

Die Auswertung der stichprobenartig aufgenommenen und codierten Bilder erfolgte nach mehrmaliger Kalibrierung durch zwei Observer mit einer guten Übereinstimmung (s. 3.1). Bei großen Unstimmigkeiten wurden die Bilder gemeinsam mit einem Experten besprochen. Zur Auswertung wurde der in vielen Studien zusätzlich untersuchte Reinigungsparameter „Debris“ ausgeschlossen, da dieser in den meisten Fällen gar nicht oder nur geringfügig vorhanden war. Das Hauptaugenmerk zur Reinigungswirkung lag auf der *smear layer*-Schicht bzw. der Fläche der frei sichtbaren Dentintubuli.

In der vorliegenden Studie wurde der nach Prati et al. (2004) modifizierte Score zur Beurteilung des *smear layer* verwendet. In weiteren häufig angewandten Fünf-Punkte-Score-Systemen nach Hülsmann et al. (1997) und Rome et al. (1985) ist zum Teil eine subjektive Einschätzung bezüglich der Score-Definition notwendig (Hariharan et al. 2010; Hegde und Bapna 2016; Subramaniam et al. 2016; Vallabhaneni et al. 2017). Der verwendete Score verfügt dagegen über eine klare prozentuale Definition.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Im Abstand von 14 Tagen wurden 50 digitale REM-Bilder, in denen alle vier Scores enthalten waren, bewertet. Diese Kalibrierung diente zur reproduzierbaren Bewertung der Observer. Trotz der klar definierten Score-Einteilung traten Differenzen in der Beurteilung einiger Bilder auf. Dieses Problem wurde gemeinsam unter Einbeziehung eines Experten gelöst. Die Auswertung aller 326 REM-Bilder erfolgte eine Woche nach der Kalibrierung, eine Wiederholung der Auswertung erfolgte nach weiteren 14 Tagen, dabei ergaben sich nur wenige Unstimmigkeiten (Abbildung 21), die im Konsens geklärt wurden.

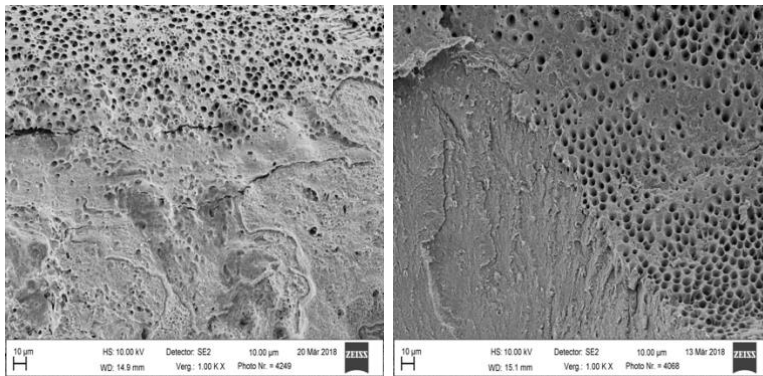


Abbildung 21: Unklare Differenzierung der Sauberkeitsbewertung

Die Sauberkeitsbewertungen wurden anhand digital randomisiert erstellter Bildausschnitte bestimmt. Durch die Fallzahl von 81 (Gruppe SAF) bzw. 82 (Gruppe Mtwo) Wurzelhälften je Gruppe ergibt sich eine hohe Aussagekraft der Ergebnisse. Es liegt zurzeit keine Studie an Milchzähnen mit einer gleichwertig hohen Fallzahl vor. Pinheiro et al. (2012) und Subramaniam et al. (2016) verglichen in ihren Studien die manuelle mit der maschinellen Wurzelkanalpräparation an Milchzähnen, wobei beide zu dem Ergebnis kamen, dass es keine signifikanten Unterschiede in der *smear layer*-Entfernung zwischen beiden Methoden gab. Die meisten Milchzahnstudien bewerteten die Reinigungswirkung mit Hilfe von Einfärbe-Methoden (Silva et al. 2004; Moghaddam et al. 2009; Madan et al. 2011; Azar et al. 2012; Musale und Mujawar 2014; Ramazani et al. 2016; Katge et al. 2016). Die Einfärbe-Methode zur Sauberkeitswirkung wird kontrovers betrachtet, da z.B. falsche Ergebnisse durch die Insertion der Farbe entstehen können; Ramezanalil et al. (2015) äußerten sich zu ihren Studienergebnissen selbstkritisch, da sie in allen Vergleichsgruppen apikal eine bessere Reinigung der Milchmolaren feststellten und begründeten dies mit der höheren Farbkonzentration in den koronalen Bereichen, welche nach apikal hin geringer wurde.

4.2.1 Reinigungswirkung Mtwo

Insgesamt zeigte Mtwo in der vorliegenden Studie bei der Sauberkeitsbewertung sehr gute Ergebnisse: im koronalen Bereich wurden 57 % der bearbeiteten Wurzeln mit Score 1 bewertet, dies entspricht einer 76–100 %igen *smear layer*-Entfernung; 41 % aller Wurzeln zeigten apikal diese gute Reinigung. Eine etwas schlechtere apikale Reinigung durch die Präparation mit Mtwo stellten auch Studien an permanenten Zähnen fest, die jedoch ebenso in den jeweiligen Vergleichsgruppen vermerkt wurden (Foschi et al. 2004; Kuzekanani et al. 2009; Bidar et al. 2010), wobei Bidar et al. für die Mtwo-Gruppe in allen Abschnitten die saubersten Wurzelkanalwände fanden. Bürklein et al. (2012) beschrieben für Mtwo im Vergleich zu ProTaper und WaveOne eine bessere apikale Reinigung in gekrümmten Kanälen. Ramazani et al. (2016) verglichen Mtwo mit der manuellen K-File und der reziprozierenden Reciproc-Feile an 64 Milchmolaren und verzeichneten häufiger gute Score-Werte im koronalen und medialen Abschnitt als im apikalen Schnitt, wobei keine Signifikanz festgestellt wurde: Mtwo und Reciproc erzielten hier eine bessere Reinigungswirkung als die K-Feile. Azar et al. (2012) fanden in ihrer Milchmolaren-Studie an 160 Wurzelkanälen für Mtwo im Vergleich zur K-Feile und ProTaper in allen Wurzelkanalabschnitten gleichwertig gute Reinigungsergebnisse.

In der Gesamtbewertung erkennt man in der vorliegenden Studie in der Gruppe Mtwo eine etwas weitere Streuung der Score Werte als in der SAF-Gruppe, wobei die Mediane in beiden Gruppen im guten Sauberkeitsbereich (Score 2) liegen. Diese Streuung lässt sich möglicherweise damit erklären, dass es innerhalb des Wurzelkanalverlaufes Unterschiede in der Querschnittsgeometrie geben kann, dies konnte sowohl an permanenten Zahnwurzeln (Wu et al. 2000) als auch an Milchzahnwurzeln (Cleghorn et al. 2010) festgestellt werden.

Die Mtwo-Feile bearbeitete bei rein runden Wurzelkanalformen bis zu 99 % der Wurzelkanaloberfläche, in ovalen Wurzelkanäle nur noch 62,3 %, dieser Unterschied lässt sich durch den Querschnitt und rotierenden Bewegungsablauf der Mtwo-Feilen erklären, der nur eine abschließende runde Querschnittsform des Wurzelkanals zulässt. Dies wurde in einigen Micro-CT Darstellungen an oval geformten Wurzelkanälen besonders deutlich analysiert und erklärt, warum mehr unbearbeitete Wurzelkanalabschnitte verzeichnet wurden (Müller 2018). Pontes et al. (2014) vermerkten ähnliche Werte von 41,5 % unbearbeiteten Umfangs bei der Präparation mit Mtwo in oval geformten permanenten Wurzelkanälen; dies wurde durch die ergänzende Präparation mit Hedströmfeilen auf 26,7 % und durch die Anwendung zusätzlicher Reinigungsmethoden (Ultraschall-Feilen) auf 16,7 % gesenkt.

4.2.2 Reinigungswirkung SAF

Die SAF reinigte insgesamt im koronalen Wurzelabschnitt bis zu 60 % aller Wurzeln sehr gut und liegt damit etwas vor Mtwo, aber nicht signifikant. Der Sauberkeitsgrad 1 wurde im apikalen Bereich nur noch bei 38 % der Wurzeln ermittelt und fällt somit um 3 % schlechter aus als für Mtwo. Die etwas schlechtere apikale Reinigung zeigte sich auch bei Metzger et al. (2010b), welcher in allen Kanälen eine 100 %ige *smear layer*-Entfernung im koronalen und an mehr als der Hälfte aller Wurzeln eine 65 %ige Sauberkeit im apikalen Abschnitt beobachtete, dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass er an 20 geraden, einwurzeligen Kanälen permanenter Zähne forschte. Das etwas schlechtere Abscheiden der apikalen Reinigung im Vergleich zur Mtwo-Gruppe könnte an dem etwas breiteren Umfang der Feile im apikalen Bereich liegen, da die SAF trotz Gleitpfadpräparation auch nach 3 Minuten nicht immer bis auf Arbeitslänge in die filigranen Milchzahnwurzeln eingebracht werden konnte (Müller 2018). In der Studie von Lacerda et al. (2017) wurde die SAF mit zwei anderen rotierenden Feilen an 33 extrahierten permanenten Molaren mit ovalen Kanälen verglichen, dabei wurde für alle Systeme eine ähnliche Reinigungsleistung auf der gesamten Wurzelkanalfläche festgestellt, zusätzlich wies die SAF im apikalen Bereich signifikant mehr bearbeitete Oberfläche auf als eine der beiden rotierenden Feilen, aber keines der Präparationssysteme erzielte eine 100 %ige Reinigung. Eine 100 %ige Bearbeitung der gesamten Wurzelkanaloberfläche an ovalen Kanälen stellten auch Versiani et al. (2013) und Zuolo et al. (2018) nicht fest, jedoch zeigte die SAF ähnliche Ergebnisse wie die rotierenden Vergleichsgruppen (WaveOne, ProTaper und BioRace, Reciproc, BioRace). Solomonov et al. (2012) beschrieben eine überlegene Präparationsleistung der SAF an c-förmigen Kanälen im Vergleich zu ProTaper. Im Vergleich zu Reciproc zeigte sich die SAF an c-förmigen Kanälen mit 34 % unbearbeiteter Flächen nicht signifikant unterlegen, aber Amoroso-Silva et al. (2017) steigerten die Präparations- und Reinigungsleistung der SAF durch eine zusätzliche oszillierende Spülaktivierung auf 15 % unbearbeiteter Wurzelkanaloberfläche. Kaya et al. (2017) verglichen an 60 Milchmolaren die SAF mit der K-Feile und der ProFile, dabei wurde der geringste Dentinabtrag mit der SAF erzeugt und der höchste mit der manuellen K-Feile. Bei der Präparation der feinen Milchzahnwurzelstruktur ist ein flächendeckender geringerer Abtrag von Vorteil, da die Perforationsgefahr an den stärker resorbierten Wurzelbereichen minimiert wird. Bei der Volumenveränderung zeigte sich die SAF auch im Vergleich zu Mtwo substanzschonender und verursachte seltener Perforationsdefekte (Müller 2018).

4.3 Abschließende Bewertung beider Systeme

Die Sauberkeit der Wurzelkanalwände ist ein essenzieller Aspekt in der Wurzelkanaltherapie. In der vorliegenden Studie wurde insgesamt eine gute Sauberkeit der Wurzelkanäle durch die Präparation mit beiden Systemen erreicht. Die koronale Reinigung schneidet insgesamt etwas besser ab als die apikale, aber nicht signifikant. Wie in der Literatur beschrieben, kann auch in der vorliegenden Studie kein Rückschluss auf den Einfluss der jeweiligen Spültechnik festgestellt werden (Sluis et al. 2006). Die kontinuierlich aktivierte Schallspülung durch das SAF-System und die konventionell, intermittierende Handspülung nach der Präparation mit Mtwo zeigten keinen signifikanten Unterschied in der Auswirkung auf die Sauberkeit der Wurzelkanäle. In der Literatur wird der Einsatz der Hybridtechnik, einer Kombination aus manueller und maschineller Präparation, als reinigungssteigernde Methode vor allem im apikalen Bereich an Milchzähnen empfohlen (Madan et al. 2011; Deshpande et al. 2017), wobei sie signifikant mehr Zeit in Anspruch nimmt, aber die höchste bakterielle Reduktion zeigte (Pinheiro et al. 2012). Eine kombinierte Anwendung von rotierender Mtwo-Gleitfadpräparation und einer anschließenden SAF-Präparation könnte zu einer effektiv schnelleren, sicheren und sauberen maschinellen Hybridtechnik führen.

Einige Studien berichten von einem NiTi-System: Kedo-S, welches speziell für Milchzähne entwickelt wurde (Jeevanandan 2017; Govindaraju et al. 2018; Panchal et al. 2019b; Jeevanandan et al. 2020; Seema et al. 2020). Zusätzlich gibt es Endodontiemotoren, die gleichzeitig zur Präparation eine elektronische Längenmessung ermöglichen und somit die Pulpektomie auch an Milchzähnen sicherer machen, beschleunigen und vereinfachen (Bodur et al. 2008).

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden *In-vitro*-Studie wurde die Reinigungswirkung von zwei maschinellen Nickel-Titan-Wurzelkanalsystemen in Wurzelkanalwänden von Milchmolaren untersucht. Ziel war es herauszufinden, welches System bei gleichen Spülmengen und -konzentrationen den Wurzelkanal effektiv reinigt.

Material und Methoden: 46 Milchmolaren mit drei bis vier Wurzelkanälen wurden trepaniert und anhand von Micro-CT-Scans (Bruker SkyScan 1272, Bruker AXS, Karlsruhe) (Auflösung: 29 μm) in 23 *matched pairs* nach weitestgehend gleicher Wurzelanzahl, -form, -länge und -krümmung in zwei vergleichbare Gruppen eingeteilt. Eine Gruppe wurde mit dem SAF-System, das auf die Ein-Feilen-Technik basiert, für 3 min pro Wurzelkanal und einer kontinuierlichen NaOCl (1 %)-Spülung mit einer Fließrate von 4 ml/min präpariert. Die andere Gruppe wurde mit dem Mtwo-System präpariert, das auf der *single-length*-Technik basiert, wobei insgesamt fünf Feilen verwendet wurden und nach jedem Instrument eine manuelle 2 ml NaOCl (1 %)-Spülung folgte, so dass beide Gruppen eine Gesamtpülmenge von 12 ml 1 %iger NaOCl-Lösung und eine Abschlusspülung mit 2 ml 10 %iger Zitronensäure je Kanal durchliefen. Abschließend wurden die Wurzeln longitudinal gespalten und unter dem REM (Feldemissionsraster-elektronenmikroskop Ultra plus, Fa. Zeiss, Oberkochen) vergrößert und digitale Bilder von zwei je apikal und koronal zufällig gewählten Wurzelkanalbereichen angefertigt. Die Sauberkeit der Wurzelkanäle wurde durch zwei verblindete Untersucher anhand von insgesamt 326 REM-Aufnahmen bei 1000-facher Vergrößerung mit Hilfe eines vierstufigen Score-Bewertungssystems (Grad 1: 0–24 % *smear layer*, Grad 2: 25–49 % *smear layer*, Grad 3: 50–74 % *smear layer*, Grad 4: 75–100 % *smear layer*) bewertet. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Mann-Whitney-U-Test und Bonferroni-Korrekturen ($p < 0,05$).

Ergebnisse: Der Vergleich von SAF und Mtwo zeigt keinen signifikanten Unterschied in der Reinigungswirkung ($p = 0,95$). Im Vergleich der koronalen gegen die apikale Reinigung zeigten weder Mtwo ($p = 0,09$) noch SAF ($p = 0,08$) signifikante Unterschiede. Im gesamten Vergleich von koronal gegen apikal konnte insgesamt tendenziell eine bessere Reinigung im koronalen Bereich festgestellt werden.

Schlussfolgerung: Keines der beiden Präparationssysteme zeigte sich im Hinblick auf die *smear layer*-Entfernung überlegen. Beide Systeme erzielten in dieser *In-vitro*-Studie überwiegend Score 1 und 2 und weisen somit eine gute Reinigungswirkung auf. Die Präparation von Milchzahnwurzelkanälen mit beiden Systemen in Kombination mit dem jeweiligen Spülprotokoll kann empfohlen werden.

Abstract

Introduction: In the present in-vitro study the cleaning efficacy of two rotary Ni-Ti preparation systems was examined on the root canal walls of primary molars. The aim was to compare the different rotary systems with the same irrigation amount and concentration and to find out, which cleans the root canal more effective.

Material and methods: 46 extracted primary molars with three to four root canals were accessed and divided into 23 matched pairs according to the same number, similar shape, length and curvature of the roots based on a three-dimensional micro-CT analysis (Bruker SkyScan 1272, Bruker AXS, Karlsruhe) (resolution: 29 μm). The matched pairs were randomly assigned to two comparable groups (n=23). One group was instrumented using the SAF system, which is based on a one-file technique, continuous irrigation with NaOCl (1 %) for 3 min per root canal and a flow of 4 ml/min. The other group was prepared using Mtwo rotary files, which is based on a single-length-technique. A total of five files were used and after each instrument a manual rinse with 2 ml NaOCl (1 %) was performed, therefore both experimental groups had a total amount of 12 ml of 1 % NaOCl irrigant and a final rinse with 2 ml of 10 % citric acid per root canal. Finally, the roots were split longitudinally and the exposed root canal walls were observed under the SEM (field emission scanning electron microscope Ultra plus, Fa. Zeiss, Oberkochen) and digital images were taken of two randomly selected root canal areas of the apical und coronal part. The cleanliness of the root canal walls was assessed by two blinded examiners on the basis of a total of 326 SEM images at 1,000x magnification using a four-stage score evaluation system (grade 1: 0–24 % surface covered by smear layer, grade 2: 25–49 %, grade 3: 50–74 %, grade 4: 75–100 %). The statistical evaluation was performed using the Mann-Whitney U-test and the Bonferroni correction ($p < 0.05$).

Results: The comparison of SAF and Mtwo shows no significant difference in the cleaning effect ($p = 0.95$). Comparing the coronal versus the apical cleaning, neither Mtwo (0.09) nor SAF (0.08) showed significant differences. The comparison of the coronal versus the apical part of the root canals revealed a better cleanliness in the coronal area.

Conclusion: Neither of the two preparation systems was found to be superior in terms of smear layer removal. In this in vitro study, both systems predominantly achieved score 1 and 2 and thus offer a good cleaning efficacy. The preparation of root canals of primary teeth can be recommended with both systems in combination with the respective irrigation protocol.

6 Anhang

6.1 Materialliste und Herstellerverzeichnis

Tabelle 7: Materialliste und Herstellerangaben

Materialien	Hersteller
Aluminiumnieten (DIN 661, 3,0 mm x 12,0 mm)	Gesipa, Mörfelden-Walldorf, Deutschland
BA Optima 10 LED Polymerisationslampe	B.A. International, Northampton, England
Diamantierte zylindrische Schleifer	Komet Dental, Lemgo, Deutschland
Guttapercha ISO-Größen 10–30	VDW, München, Deutschland
Heidemannspatel	Aesculap, Tuttlingen, Deutschland
Kunststoffeinwegspritze 5 ml	B. Braun, Melsungen, Deutschland
Lichthärtendes Komposit Venus	Heraeus, Hanau, Deutschland
Micro-CT Bruker SkyScan 1272	Bruker AXS, Karlsruhe, Deutschland und Madison, USA
Microsoft Office, Word, Exel	Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA
Mtwo-System	VDW, München, Deutschland
Natriumhypochlorit 1 %	Apotheke des Universitätsklinikums Göttingen, Deutschland
Reamer ISO-Größe 10	VDW, München, Deutschland
SAF-System	ReDent-Nova, Ra'anana, Israel
Sonicflex Handstück mit diamantierter Spitze	KaVo Dental, Biberach/Riß, Deutschland
SPSS Statistic Program Version 27.0	IBM Corp., New York, USA
Spülkanüle VMK Endoneedle nach Dr. J. Buquet 0,35 mm 28G	Vedefar NV, Dilbeek, Belgien

Sputter Leica EM ACE200 Feinvakuum-Coater	Leica Microsysteme, Wetzlar, Deutschland
Zeiss Ultra Plus Rasterelektronenmikroskop DSM 960	Zeiss, Oberkochen, Deutschland
Zitronensäure 10 %	Apotheke des Universitätsklinikums Göttingen, Deutschland

7 Literaturverzeichnis

- AAPD (American Academy on Pediatric Dentistry) (2016): Guideline on pulp therapy for primary and immature permanent teeth. *Pediatr Dent* 38, 280–288
- Abramovitz I, Relles-Bonar S, Baransi B, Kfir A (2012): The effectiveness of a Self-Adjusting File to remove residual gutta-percha after retreatment with rotary files. *Int Endod J* 45, 386–392
- Ahmed HMA (2013): Anatomical challenges, electronic working length determination and current developments in root canal preparation of primary molar teeth. *Int Endod J* 46, 1011–1022
- Ahmed HMA, Musale PK, Shahawy OIE, Dummer PMH (2020): Application of a new system for classifying tooth, root and canal morphology in the primary dentition. *Int Endod J* 53, 27–35
- Alves FRF, Almeida BM, Neves MAS, Rôças IN, Siqueira Jr. JF (2011): Time-dependent antibacterial effects of the Self-Adjusting File used with two sodium hypochlorite concentrations. *J Endod* 37, 1451–1455
- Aminabadi NA, Farahani RMZ, Gajan EB (2008): Study of root canal accessibility in human primary molars. *J Oral Sci* 50, 69–74
- 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
- Attin, Buchalla W., Zirkel C, Lussi A (2002): Clinical evaluation of the cleansing properties of the noninstrumental technique for cleaning root canals. *Int Endod J* 35, 929–933
- Azar M-R, 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, 363–363
- 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* 9, 146–151
- Bagherian A, Kalhori KAM, Sadeghi M, Mirhosseini F, Parisay I (2010): An in vitro study of root and canal morphology of human deciduous molars in an Iranian population. *J Oral Sci* 52, 397–403
- Bakir DK, Al-Huwaizi HF, Salman RF (2014): Micro CT analysis of amount of dentin removal created by SAF vs. ProTaper systems. *J Baghdad Coll Dent* 26, 9–12

- Balto H, Salama F, Al-Mofareh S, Al-Yahya F (2015): Evaluation of different irrigating solutions on smear layer removal of primary root dentin. *J Contemp Dent Pract* 16, 187–191
- Bani M, Akal N, Bodur H, Odabaş ME, Tüzüner T, Delilbaşı AE, Özdoğan YT (2015): The reasons for extractions of primary teeth in Turkish children. *Eur J Paediatr Dent* 16, 187–190
- Barbizam JVB, Fariniuk LF, Marchesan MA, Pecora JD, Sousa-Neto MD (2002): Effectiveness of manual and rotary instrumentation techniques for cleaning flattened root canals. *J Endod* 28, 365–366
- Barcelos R, Tannure PN, Gleiser R, Luiz RR, Primo LG (2012): The influence of smear layer removal on primary tooth pulpectomy outcome: A 24-month, double-blind, randomized, and controlled clinical trial evaluation. *Int J Paediatr Dent* 22, 369–381
- Barr ES, Flatiz CM, Hicks MJ (1991): A retrospective radiographic evaluation of primary molar pulpectomies. *Pediatr Dent* 13, 4–9
- Barr ES, Kleier DJ, Barr NV (2000): Use of nickel-titanium rotary files for root canal preparation in primary teeth. *Pediatr Dent* 22, 77–78
- Baumgartner JC, Mader CL (1987): A scanning electron microscopic evaluation of four root canal irrigation regimens. *J Endod* 13, 147–157
- Bayram HM, Bayram E, Ocak M, Uygun AD, Celik HH (2017): Effect of ProTaper Gold, Self-Adjusting File, and XP-endo Shaper instruments on dentinal microcrack formation: A micro-computed tomographic study. *J Endod* 43, 1166–1169
- Berkowitz RJ (2003): Causes, treatment and prevention of early childhood caries: A microbiologic perspective. *J Can Dent Assoc* 69, 304–307
- Bhujel N, Duggal M, Munyombwe T, Godson J, Day P (2014): The effect of premature extraction of primary teeth on the subsequent need for orthodontic treatment. *Eur Arch Paediatr Dent* 15, 393–400
- Bidar M, Moradi S, Forghani M, Bidad S, Azghadi M, Rezvani S, Khoyneshad S (2010): Microscopic evaluation of cleaning efficiency of three different Nickel-Titanium rotary instruments. *Iran Endod J* 5, 174–178
- Bindayel NA (2019): Clinical evaluation of short term space variation following premature loss of primary second molar, at early permanent dentition stage. *Saudi Dent J* 31, 311–315
- Bodur H, Odabaş M, Tulunoğlu Ö, Tinaz AC (2008): Accuracy of two different apex locators in primary teeth with and without root resorption. *Clin Oral Investig* 12, 137–141
- Borutta A, Heinrich-Weltzien R (2002): Endodontie im Milchgebiss. Wissenschaftliche Stellungnahme der DGZMK. *Dtsch Zahnärztl Z* 2002,

57. <https://www.dgzmk.de/endodontie-im-milchgebiss1>; abgerufen am 06.02.2018
- Boutsioukis C, Gogos C, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, van der Sluis LWM (2010): The effect of apical preparation size on irrigant flow in root canals evaluated using an unsteady computational fluid dynamics model. *Int Endod J* 43, 874–881
- Brännström M, Johnson G (1974): Effects of various conditioners and cleaning agents on prepared dentin surfaces: a scanning electron microscopic investigation. *J Prosthet Dent* 31, 422–430
- Brar GS, Bajaj N, Bhole M, Brar JK (2019): Clinical evaluation of root resorption and its correlation with obturation quality in pulpectomized deciduous teeth with different obturating materials: An in vivo study. *Contemp Clin Dent* 10, 243–248
- Brothwell DJ (1997): Guidelines on the use of space maintainers following premature loss of primary teeth. *J Can Dent Assoc* 10, 753, 757–60, 764–766
- Brustolin JP, Mariath AAS, Ardenghi TM, Casagrande L (2017): Survival and factors associated with failure of pulpectomies performed in primary teeth by dental students. *Braz Dent J* 28, 121–128
- Buldur B, Hascizmeci C, Aksoy S, Nur Aydin M, Guvendi ON (2018): Apical extrusion of debris in primary molar root canals using mechanical and manual systems. *Eur J Paediatr Dent* 19, 16–20
- Bürklein S, Hinschitza K, Dammaschke T, Schäfer E (2012): Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. *Int Endod J* 45, 449–461
- Çapar İD, 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
- Çapar İD, Özcan E, Arslan H, Ertas H, Aydinbelge HA (2014): Effect of different final irrigation methods on the removal of calcium hydroxide from an artificial standardized groove in the apical third of root canals. *J Endod* 40, 451–454
- Chandwani M, Chandak S (2017): Assessment of facultative anaerobes from the root canals of deciduous molars: An in vivo study. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 11, 96–100
- Chauhan A, Saini S, Dua P, Mangla R (2019): Rotary endodontics in pediatric dentistry: Embracing the new alternative. *Int J Clin Pediatr Dent* 12, 460–463
- Cholmakow-Bodechtel C, Füßl-Grünig E, Geyer S, Hertrampf K, Hoffmann T, Holtfreter B, Jordan A R, Kocher T, Micheelis W, Nitschke I, et al. (2016):

- Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS V), DÄV, Köln 2016, 35
https://www.bzaek.de/fileadmin/PDFs/dms/Zusammenfassung_DMS_V.pdf;
abgetufen am 12.02.2018
- Cleghorn BM, Boorberg NB, Christie WH (2010): Primary human teeth and their root canal systems. *Endod Top* 23, 6–33
- Cohen MM, Jores SM, Calisti LP (1960): Bacteriologic study of infected deciduous molars. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 13, 1382–1386
- Corrêa-Faria P, Viana KA, Raggio DP, Hosey MT, Costa LR (2020): Recommended procedures for the management of early childhood caries lesions – A scoping review by the Children Experiencing Dental Anxiety: Collaboration on Research and Education. *BMC Oral Health* 20, 75
- 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
- Curzon MEJ, Preston AJ (2004): Risk groups: Nursing bottle caries/Caries in the elderly. *Caries Res* 38, 24–33
- Dammaschke T, Witt M, Ott K, Schäfer E (2004): Scanning electron microscopic investigation of incidence, location, and size of accessory foramina in primary and permanent molars. *Quintessence Int* 1985 35, 699–705
- De-Deus G, Souza EM, Barino B, Maia J, Zamolyi RQ, Reis C, Kfir A (2011): The Self-Adjusting File optimizes debridement quality in oval-shaped root canals. *J Endod* 37, 701–705
- Demirel A, Yüksel BN, Ziya M, Gümüş H, Doğan S, Sari Ş (2019): The effect of different irrigation protocols on smear layer removal in root canals of primary teeth: A SEM study. *Acta Odontol Scand* 77, 380–385
- Deshpande AN, Joshi NH, Naik KS (2017): In vitro comparative evaluation of cleaning efficacy and volumetric filling in primary molars: Cone beam computed tomography evaluation. *Contemp Clin Dent* 8, 33–37
- Dietrich MA, Kirkpatrick TC, Yaccino JM (2012): In vitro canal and isthmus debris removal of the Self-Adjusting File, K3, and WaveOne files in the mesial root of human mandibular molars. *J Endod* 38, 1140–1144
- Edelstein BL, Chinn CH (2009): Update on disparities in oral health and access to dental care for America's children. *Acad Pediatr* 9, 415–419
- EIAyouti A, Chu A-L, Kimionis I, Klein C, Weiger R, Löst C (2008): Efficacy of rotary instruments with greater taper in preparing oval root canals. *Int Endod J* 41, 1088–1092
- Farmakis ETR, Sotiropoulos GG, Pantazis N, Kozyrakis K (2013): The permanent deformation of the Self-Adjusting Files when used in canals of extracted teeth. *Int Endod J* 46, 863–869

- Forghani M, Afshari E, Parisay I, Garajian R (2017): Effect of a passive sonic irrigation system on elimination of *Enterococcus faecalis* from root canal systems of primary teeth, using different concentrations of sodium hypochlorite: An in vitro evaluation. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 11, 177–182
- Fornari VJ, Silva-Sousa YTC, Vanni JR, Pécora JD, Versiani MA, Sousa-Neto MD (2010): Histological evaluation of the effectiveness of increased apical enlargement for cleaning the apical third of curved canals. *Int Endod J* 43, 988–994
- Foschi F, Nucci C, Montebugnoli L, Marchionni S, Breschi L, Malagnino VA, Prati C (2004): SEM evaluation of canal wall dentine following use of Mtwo and ProTaper NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 37, 832–839
- Fox AG, Heeley JD (1980): Histological study of pulps of human primary teeth. *Arch Oral Biol* 25, 103–110
- Fumes AC, Sousa-Neto MD, Leoni GB, Versiani MA, da Silva L a. B, da Silva R a. B, Consolaro A (2014): Root canal morphology of primary molars: A micro-computed tomography study. *Eur Arch Paediatr Dent* 15, 317–326
- George S, Anandaraj S, Issac JS, John SA, Harris A (2016): Rotary endodontics in primary teeth – A review. *Saudi Dent J* 28, 12–17
- Giovannone T, Migliau G, Bedini R, Ferrari M, Gallottini L (2008): Shaping outcomes using two Ni-Ti rotary instruments in simulated canals. *Minerva Stomatol* 57, 143–154
- Goerig AC, Camp JH (1983): Root canal treatment in primary teeth: A review. *Pediatr Dent* 5, 33–37
- Götze G da R, Cunha CBCS, Primo LS de SG, Maia LC (2005): Effect of the sodium hypochlorite and citric acid association on smear layer removal of primary molars. *Braz Oral Res* 19, 261–266
- Govindaraju L, Jeevanandan G, Subramanian E (2017): Clinical evaluation of quality of obturation and instrumentation time using two modified rotary file systems with manual instrumentation in primary teeth. *J Clin Diagn Res* 11, ZC55–ZC58
- Govindaraju L, Jeevanandan G, Emg S, Vishawanathaiah S (2018): Assessment of quality of obturation, instrumentation time and intensity of pain with pediatric rotary file (Kedo-S) in primary anterior teeth: A randomized controlled clinical trial. *Int J Clin Pediatr Dent* 11, 462–467
- Grund K, Goddon I, Schüler 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
- Gupta D, Grewal N (2005): Root canal configuration of deciduous mandibular first molars - An in vitro study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 23, 134–137

- Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y (2014): Irrigation in endodontics. *Br Dent J* 216, 299–303
- Hariharan VS, Nandlal B, Srilatha KT (2010): Efficacy of various root canal irrigants on removal of smear layer in the primary root canals after hand instrumentation: A scanning electron microscopy study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 28, 271–277
- Hecksher F, Vidigal B, Coelho P, Otoni D, Alvarenga C, Nunes E (2019): Endodontic treatment in artificial deciduous teeth through manual and mechanical instrumentation: A pilot study. *Int J Clin Pediatr Dent* 12, 15–17
- Hegde RJ, Bapna K (2016): Comparison of removal of endodontic smear layer using ethylene glycol bis (beta-amino ethyl ether)-N, N, N', N'-tetraacetic acid and citric acid in primary teeth: A scanning electron microscopic study. *Contemp Clin Dent* 7, 216–220
- Heidemann D, Baumann MA, Haunfelder D, Diedrich P, Betz W, Geurtsen W, Hickel P, Hülsmann M, Löst C, Petschelt A, et al.: *Endodontie*. 4. Auflage; Elsevier, Urban & Fischer, München [u.a.] 2005
- Hetzer G (2004): Wissenschaftliche Stellungnahme „Indikation und Gestaltung von Lückenhaltern nach vorzeitigem Milchzahnverlust“ der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund-, Kieferheilkunde (DGZMK). <https://www.dgzmk.de/indikation-und-gestaltung-von-lueckenhaltern-nach-vorzeitigem-milchzahnverlust1>; abgerufen am 18.01.2021
- Hidalgo LR da C, Silva LAB da, Leoni GB, Mazzi-Chaves JF, Carvalho EE da S, Consolaro A, Sousa-Neto MD (2017): Mechanical preparation showed superior shaping ability than manual technique in primary molars - A micro-computed tomography study. *Braz Dent J* 28, 453–460
- Hin ES, Wu M-K, Wesselink PR, Shemesh H (2013): Effects of Self-Adjusting File, Mtwo and ProTaper on the root canal wall. *J Endod* 39, 262–264
- Hof R, Perevalov V, Eltanani M, Zary R, Metzger Z (2010): The Self-Adjusting File (SAF). Part 2: Mechanical analysis. *J Endod* 36, 691–696
- Holt R, Roberts G, Scully C (2000): Oral health and disease. *BMJ* 320, 1652–1655
- Hughes CV, Alsheneifi T (2001): Reasons for dental extractions in children. *Pediatr Dent* 23, 109–112
- Hülsmann M (2008): Endodontie im Milchgebiss– Aktueller Stand. *Das Gesundheitswesen* 70, A46; Thieme E-Journals. <http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/s-2008-1076553>; abgerufen am 17.01.2018
- Hülsmann M, Rummelin C, Schäfers F (1997): Root canal cleanliness after preparation with different endodontic handpieces and hand instruments: A comparative SEM investigation. *J Endod* 23, 301–306

- Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH (2005): Mechanical preparation of root canals: Shaping goals, techniques and means. *Endod Top* 10, 30–76
- Jeevanandan G (2017): Kedo-S paediatric rotary files for root canal preparation in primary teeth – Case report. *J Clin Diagn Res* 11, ZR03–ZR05
- Jeevanandan G, Thomas E (2018): Volumetric analysis of hand, reciprocating and rotary instrumentation techniques in primary molars using spiral computed tomography: An in vitro comparative study. *Eur J Dent* 12, 21–26
- Jeevanandan G, Ravindran V, Subramanian EM, Kumar AS (2020): Postoperative pain with hand, reciprocating and rotary instrumentation techniques after root canal preparation in primary molars: A randomized clinical trial. *Int J Clin Pediatr Dent* 13, 21–26
- Jiang L-M, Lak B, Eijssvogels LM, Wesselink P, van der Sluis LWM (2012): Comparison of the cleaning efficacy of different final irrigation techniques. *J Endod* 38, 838–841
- Katge F, Wakpanjar MM (2018): Root canal morphology of primary molars by clearing technique: An in vitro study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 36, 151–157
- Katge F, Chimata VK, Poojari M, Shetty S, Rusawat B (2016): Comparison of cleaning efficacy and instrumentation time between rotary and manual instrumentation techniques in primary teeth: An in vitro study. *Int J Clin Pediatr Dent* 9, 124–127
- Kaya E, Elbay M, Yiğit 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
- Keleş A, Şimşek N, Alçin H, Ahmetoglu F, Yologlu S (2014): Retreatment of flat-oval root canals with a Self-Adjusting File: An SEM study. *Dent Mater J* 33, 786–791
- Kfir A, Elkes D, Pawar A, Weissman A, Tsesis I (2017): Incidence of microcracks in maxillary first premolars after instrumentation with three different mechanized file systems: A comparative ex vivo study. *Clin Oral Investig* 21, 405–411
- Khoshbin E, Donyavi Z, Atibeh EA, Roshanaei G, Amani F (2018): The effect of canal preparation with four different rotary systems on formation of dentinal cracks: An in vitro evaluation. *Iran Endod J* 13, 163–168
- Koçak S, Koçak MM, Sağlam BC, Aktaş 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

- Kour G, Masih U, Dhindsa A, Gojanur S, Gupta SK, Singh B (2018): Comparative clinical and microbial evaluation of two endodontic file systems and irrigating solutions in pediatric patients. *Contemp Clin Dent* 9, 637–643
- Krishna DRM, Setty JV, Srinivasan I, Melwani A (2019): Comparison between rotary (Mtwo) and manual (H-Files) techniques for instrumentation of primary teeth root canals. *Indian J Dent Res* 30, 899–903
- Kucukyilmaz E, Savas S, Gokhan S, Banu U (2015): Evaluation of apically extruded debris and irrigant produced by different Nickel-Titanium instrument systems in primary teeth. *J Contemp Dent Pract* 16, 864–868
- Kühnisch J, Heinrich-Weltzien R., Schäfer E. (2011): Wissenschaftliche Mitteilung „Endodontie im Milchgebiss“ der Deutschen Gesellschaft für Kinderzahnheilkunde (DGK) und der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ). <https://www.dgzmk.de/endodontie-im-milchgebiss>; abgerufen am 18.11.2016
- Kummer TR, Calvo MC, Cordeiro MMR, 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–e92
- Kuo C, Wang Y, Chang H, Huang G, Lin C, Li U (2006): Application of Ni-Ti rotary files for pulpectomy in primary molars. *J Dent Sci* 1, 10–15
- Kupietzky A, Holan G (2003): Treatment of crown fractures with pulp exposure in primary incisors. *Pediatr Dent* 25, 241–247
- 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
- Kuzekanani M, Walsh LJ, Yousefi MA (2009): Cleaning and shaping curved root canals: Mtwo vs ProTaper instruments, a lab comparison. *Indian J Dent Res* 20, 268–270
- Lacerda MFLS, Marceliano-Alves MF, Pérez AR, Provenzano JC, Neves MAS, Pires FR, Gonçalves LS, Rôças IN, Siqueira JF (2017): Cleaning and shaping oval canals with 3 instrumentation systems: A correlative micro-computed tomographic and histologic study. *J Endod* 43, 1878–1884
- Landis JR, Koch GG (1977): The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33, 159–174
- Law CS (2013): Management of premature primary tooth loss in the child patient. *J Calif Dent Assoc* 41, 612–618
- Loel DA (1975): Use of acid cleanser in endodontic therapy. *J Am Dent Assoc* 90, 148–151

- 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
- Mader CL, Baumgartner JC, Peters DD (1984): Scanning electron microscopic investigation of the smeared layer on root canal walls. *J Endod* 10, 477–483
- Magnusson BO (1980): Pulpotomy in primary molars: Long-term clinical and histological evaluation. *Int Endod J* 13, 143–155
- Mahoney P (2010): Two-dimensional patterns of human enamel thickness on deciduous (dm1, dm2) and permanent first (M1) mandibular molars. *Arch Oral Biol* 55, 115–126
- 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
- Manker A, Solanki M, Tripathi A, Jain ML (2019): Biomechanical preparation in primary molars using manual and three NiTi instruments: A cone-beam-computed tomographic in vitro study. *Eur Arch Paediatr Dent* 20, 1–11
- Mansour Ockell N, Bågesund M (2010): Reasons for extractions, and treatment preceding caries-related extractions in 3-8 year-old children. *Eur Arch Paediatr Dent* 11, 122–130
- Marthaler TM (2004): Changes in dental caries 1953–2003. *Caries Res* 38, 173–181
- McComb D, Smith DC (1975): A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. *J Endod* 1, 238–242
- Mehlawat R, Kapoor R, Gandhi K, Kumar D, Malhotra R, Ahuja S (2019): Comparative evaluation of instrumentation timing and cleaning efficacy in extracted primary molars using manual and NiTi rotary technique – In vitro study. *J Oral Biol Craniofacial Res* 9, 151–155
- Mesgarani A, Hamidi MR, Haghanifar S, Naiemi S, Bijani A (2018): Comparison of apical transportation and centering ability of Mtwo and Reciproc R25 in severely curved canals using cone-beam computed tomography. *Dent Res J* 15, 57–62
- Metzger Z (2014): The Self-Adjusting File (SAF) system: An evidence-based update. *J Conserv Dent* 17, 401–409

- Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R (2010a): The Self-Adjusting File (SAF). Part 1: Respecting the root canal anatomy—A new concept of endodontic files and its implementation. *J Endod* 36, 679–690
- Metzger Z, Teperovich E, Cohen R, Zary R, Paqué F, Hülsmann M (2010b): The Self-Adjusting File (SAF). Part 3: Removal of debris and smear layer- A scanning electron microscope study. *J Endod* 36, 697–702
- 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
- Moghaddam KN, 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
- Mokhtari N, Shirazi A-S, Ebrahimi M (2017): A smart rotary technique versus conventional pulpectomy for primary teeth: A randomized controlled clinical study. *J Clin Exp Dent* 9, e1292–e1296
- Monteiro J, Day P, Duggal M, Morgan C, Rodd H (2009): Pulpal status of human primary teeth with physiological root resorption. *Int J Paediatr Dent* 19, 16–25
- Mortazavi M, Abbasi A, Khodadadi E (2005): Comparison of the success rate and cleaning time of pulpectomy in necrotic primary molar teeth using manual and rotary instruments. *J Dent Shiraz Univ Med Sci* 6, 111–119
- Moskovitz M, Sammara E, Holan G (2005): Success rate of root canal treatment in primary molars. *J Dent* 33, 41–47
- Müller LM: In-vitro-Studie zur Milchzahnwurzelkanalpräparation mit unterschiedlichen Nickel-Titan-Systemen. Med. Diss. Göttingen 2018
- Murshid SA, Al-Labani MA, Aldhorae KA, Rodis OMM (2016): Prevalence of prematurely lost primary teeth in 5–10-year-old children in Tamar city, Yemen: A cross-sectional study. *J Int Soc Prev Community Dent* 6, S126–S130
- Musale PK, Mujawar S a. V (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
- Nakornchai S, Banditsing P, Visetratana N (2010): Clinical evaluation of 3Mix and Vitapex as treatment options for pulpally involved primary molars. *Int J Paediatr Dent* 20, 214–221

- Nelson-Filho P, Leite G de AS, Fernandes PM, da Silva RAB, Rueda JCA (2009): Efficacy of SmearClear and ethylenediaminetetraacetic acid for smear layer removal in primary teeth. *J Dent Child Chic Ill* 76, 74–77
- Nurko C, Garcia-Godoy F (1999): Evaluation of a calcium hydroxide/iodoform paste (Vitapex) in root canal therapy for primary teeth. *J Clin Pediatr Dent* 23, 289–294
- Ochoa-Romero T, Mendez-Gonzalez V, Flores-Reyes H, Pozos-Guillen A (2011): Comparison between rotary and manual techniques on duration of instrumentation and obturation times in primary teeth. *J Clin Pediatr Dent* 35, 359–364
- Ozalp N, Saroğlu I, Sönmez H (2005): Evaluation of various root canal filling materials in primary molar pulpectomies: An in vivo study. *Am J Dent* 18, 347–350
- Panchal V, Jeevanandan G, Erulappan SM (2019a): Comparison between the effectiveness of rotary and manual instrumentation in primary teeth: A systematic review. *Int J Clin Pediatr Dent* 12, 340–346
- Panchal V, Jeevanandan G, Subramanian E (2019b): Comparison of instrumentation time and obturation quality between hand K-file, H-files, and rotary Kedo-S in root canal treatment of primary teeth: A randomized controlled trial. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 37, 75–79
- Paqué F, Peters OA (2011): Micro-computed tomography evaluation of the preparation of long oval root canals in mandibular molars with the Self-Adjusting File. *J Endod* 37, 517–521
- Park K, Jung D-W, Kim J-Y (2009): Three-dimensional space changes after premature loss of a maxillary primary first molar. *Int J Paediatr Dent* 19, 383–389
- Pascon FM, Kantovitz KR, Borges AFS, Puppini-Rontani RM (2007): Effect of cleansers and irrigation methods on primary root dentin permeability. *J Dent Child* 74, 30–35
- Pascon FM, Kantovitz KR, Cavallaro FD, Puppini-Rontani RM (2012): Permeability and smear layer removal: Effects of different chemical agents on the primary root dentin. *Pediatr Dent* 34, e81-85
- Pawar AM, Thakur B, Metzger Z, Kfir A, Pawar M (2016): The efficacy of the Self-Adjusting File versus WaveOne in removal of root filling residue that remains in oval canals after the use of ProTaper retreatment files: A cone-beam computed tomography study. *J Conserv Dent* 19, 72–76
- Pawar AM, Thakur B, Kfir A, Kim H-C (2019): Dentinal defects induced by 6 different endodontic files when used for oval root canals: An in vitro comparative study. *Restor Dent Endod* 44, e31–e31

- Pedersen J, Stensgaard K, Melsen B (1978): Prevalence of malocclusion in relation to premature loss of primary teeth. *Community Dent Oral Epidemiol* 6, 204–209
- Peters OA, Paqué F (2010): Current developments in rotary root canal instrument technology and clinical use: A review. *Quintessence Int* 1985 41, 479–488
- Peters OA, Schönenberger K, Laib A (2001): Effects of four Ni–Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J* 34, 221–230
- 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
- Pintor AVB, Dos Santos MRM, Ferreira DM, Barcelos R, Primo LG, Maia LC (2016): Does smear layer removal influence root canal therapy outcome? A systematic review. *J Clin Pediatr Dent* 40, 1–7
- Pitoni CM, Figueiredo MC, Araújo FB, Souza MAL (2011): Ethylenediaminetetraacetic acid and citric acid solutions for smear layer removal in primary tooth root canals. *J Dent Child* 78, 131–137
- Pitts N, Boyles J, J Nugent Z, Thomas N, Pine C (2007): The dental caries experience of 5-year-old children in Great Britain (2005/6). Surveys coordinated by the British Association for the Study of Community Dentistry. *Community Dent Hlth* 24, 59–63
- Plotino G, Grande NM, Tocci L, Testarelli L, Gambarini G (2014): Influence of different apical preparations on root canal cleanliness in human molars: A SEM study. *J Oral Maxillofac Res* 5, e4–e4
- Pontes CM, Sassone LM, Murad CF, Fidel RAS, Vilhena FS (2014): Refinement influence in the cleaning efficacy of rotary nickel-titanium Mtwo instruments in oval-shaped canals by means of optical microscopy. *Indian J Dent Res* 25, 279–283
- Poornima P, Disha P, Nagaveni NB, Roopa KB, Bharath KP, Neena IE (2015): Volumetric analysis of hand and rotary root canal instrumentation and filling in primary teeth using Spiral Computed Tomography – An in vitro study. *Int J Paediatr Dent* 26, 193–198
- Prati C, Foschi F, Nucci C, Montebugnoli L, Marchionni S (2004): Appearance of the root canal walls after preparation with NiTi rotary instruments: A comparative SEM investigation. *Clin Oral Investig* 8, 102–110
- Rajan S, Day PF, Christmas C, Munyombwe T, Duggal M, Rodd HD (2014): Pulpal status of human primary molars with coexisting caries and physiological root resorption. *Int J Paediatr Dent* 24, 268–276
- Ram D, Holan G (1994): Partial pulpotomy in a traumatized primary incisor with pulp exposure: case report. *Pediatr Dent* 16, 44–48

- Ram Z (1977): Effectiveness of root canal irrigation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 44, 306–312
- 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
- Rimondini L, Baroni C (1995): Morphologic criteria for root canal treatment of primary molars undergoing resorption. *Dent Traumatol* 11, 136–141
- Ringelstein D, Seow WK (1989): The prevalence of furcation foramina in primary molars. *Pediatr Dent* 11, 198–202
- Rodd HD, Waterhouse PJ, Fuks AB, Fayle SA, Moffat MA (2006): Pulp therapy for primary molars. *Int J Paediatr Dent* 16, 15–23
- Rödig T, Hülsmann M, Mühge M, Schäfers F (2002): Quality of preparation of oval distal root canals in mandibular molars using nickel-titanium instruments. *Int Endod J* 35, 919–928
- Rome WJ, Doran JE, Walker WA (1985): The effectiveness of Gly-Oxide and sodium hypochlorite in preventing smear layer formation. *J Endod* 11, 281–288
- Rönnerman A (1977): The effect of early loss of primary molars on tooth eruption and space conditions. A longitudinal study. *Acta Odontol Scand* 35, 229–239
- 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
- Salama FS, Abdelmegid FY (1994): Six percent citric acid better than hydrogen peroxide in removing smear layer: An in vitro pilot study. *Pediatr Dent* 16, 424–426
- Sato T, Hoshino E, Uematsu H, Noda T (1993): Predominant obligate anaerobes in necrotic pulps of human deciduous teeth. *Microb Ecol Health Dis* 6, 269–275
- Schäfer E, Erler M, Dammaschke T (2006a): 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
- Schäfer E, Erler M, Dammaschke T (2006b): Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 2. Cleaning

- effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 39, 203–212
- Seale NS (2005): Stainless steel crowns improve success rate of root canal treatment in primary teeth. *J Evid-Based Dent Pract* 5, 205–206
- Seema T, Ahammed H, Parul S, Cheranjeevi J (2020): Comparative evaluation of dentin removal and taper of root canal preparation of hand K file, ProTaper rotary file, and Kedo S rotary file in primary molars using Cone-beam Computed Tomography. *Int J Clin Pediatr Dent* 13, 332–336
- Sen BH, Wesselink PR, Türkün M (1995): The smear layer: A phenomenon in root canal therapy. *Int Endod J* 28, 141–148
- Shah DY, Wadekar SI, Dadpe AM, Jadhav GR, Choudhary LJ, Kalra DD (2017): Canal transportation and centering ability of Protaper and Self-Adjusting File system in long oval canals: An ex-vivo cone-beam computed tomography analysis. *J Conserv Dent* 20, 105–109
- Shaikh SM, Goswami M (2018): Evaluation of the effect of different root canal preparation techniques in primary teeth using CBCT. *J Clin Pediatr Dent* 42, 250–255
- 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 LAB da, Nelson-Filho P, Faria G, Souza-Gugelmin MCM de, Ito IY (2006): Bacterial profile in primary teeth with necrotic pulp and periapical lesions. *Braz Dent J* 17, 144–148
- Silva LA, Nelson-Filho P, Leonardo MR, Tanomaru JM (2004): Comparison of rotary and manual instrumentation techniques on cleaning capacity and instrumentation time in deciduous molars. *J Dent Child* 71, 45–47
- Singh R, Barua P, Kumar M, Safaya R, Monajemi H, Monajemi H (2017): Effect of ultrasonic instrumentation in treatment of primary molars. *J Contemp Dent Pract* 18, 750–753
- Singhal P, Das UM, Vishwanathan D, Singhal A (2012): Carisolv as an endodontic irrigant in deciduous teeth: An SEM study. *Indian J Dent Res* 23, 120–121
- Siqueira JF (2003): Microbial causes of endodontic flare-ups. *Int Endod J* 36, 453–463
- Siqueira JF, Rôças IN, Favieri A, Lima KC (2000): Chemomechanical reduction of the bacterial population in the root canal after instrumentation and irrigation with 1%, 2.5%, and 5.25% sodium hypochlorite. *J Endod* 26, 331–334

- Siqueira Jr. JF, Alves FRF, Almeida BM, Machado de Oliveira JC, Rôças IN (2010): Ability of chemomechanical preparation with either rotary instruments or Self-Adjusting File to disinfect oval-shaped root canals. *J Endod* 36, 1860–1865
- Sisodia R, Ravi K, Shashikiran N, Singla S, Kulkarni V (2014): Bacterial penetration along different root canal fillings in the presence or absence of Smear Layer in primary teeth. *J Clin Pediatr Dent* 38, 229–234
- Sluis LWMVD, Gambarini G, Wu MK, Wesselink PR (2006): The influence of volume, type of irrigant and flushing method on removing artificially placed dentine debris from the apical root canal during passive ultrasonic irrigation. *Int Endod J* 39, 472–476
- Solomonov M, Paqué 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
- Sonntag D, Ott M, Kook K, Stachniss V (2007): Root canal preparation with the NiTi systems K3, Mtwo and ProTaper. *Aust Endod J* 33, 73–81
- Subramaniam P, Tabrez T, Girish Babu K (2013): Microbiological assessment of root canals following use of rotary and manual instruments in primary molars. *J Clin Pediatr Dent* 38, 123–127
- Subramaniam P, Girish Babu K, Tabrez T (2016): Effectiveness of rotary endodontic instruments on smear layer removal in root canals of primary teeth: A scanning electron microscopy study. *J Clin Pediatr Dent* 40, 141–146
- Susila A, Minu J (2019): Activated irrigation vs. conventional non-activated irrigation in endodontics – A systematic review. *Eur Endod J* 4, 96–110
- Takeda FH, Harashima T, Kimura Y, Matsumoto K (1999): A comparative study of the removal of smear layer by three endodontic irrigants and two types of laser. *Int Endod J* 32, 32–39
- Tang Y, Xu W (2017): Therapeutic effects of pulpotomy and pulpectomy on deciduous molars with deep caries. *Pak J Med Sci* 33, 1468–1472
- Tannure PN, Barcelos R, Portela MB, Gleiser R, Primo LG (2009): Histopathologic and SEM analysis of primary teeth with pulpectomy failure. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 108, e29–e33
- Tannure PN, Azevedo CP, Barcelos R, Gleiser R, Primo LG (2011): Long-term outcomes of primary tooth pulpectomy with and without smear layer removal: A randomized split-mouth clinical trial. *Pediatr Dent* 33, 316–320
- Thakur B, Pawar AM, Kfir A, Neelakantan P (2017): Extrusion of debris from primary molar root canals following instrumentation with traditional and new file systems. *J Contemp Dent Pract* 18, 1040–1044

- Tinanoff N, Baez RJ, Guillory CD, Donly KJ, Feldens CA, McGrath C, Phantumvanit P, Pitts NB, Seow WK, Sharkov N, et al. (2019): Early childhood caries epidemiology, aetiology, risk assessment, societal burden, management, education, and policy: Global perspective. *Int J Paediatr Dent* 29, 238–248
- 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
- Topçuoğlu G, Topçuoğlu HS, Akpek F (2016): Evaluation of apically extruded debris during root canal preparation in primary molar teeth using three different rotary systems and hand files. *Int J Paediatr Dent* 26, 357–363
- Topçuoğlu HS, Demirbuga S, Topçuoğlu G (2020): Evaluation of apically extruded debris during the removal of canal filling material using three different Ni-Ti systems and hand files in teeth with simulated apical root resorption. *Int Endod J* 53, 403–409
- Urban K, Donnermeyer D, Schäfer E, Bürklein S (2017): Canal cleanliness using different irrigation activation systems: A SEM evaluation. *Clin Oral Investig* 21, 2681–2687
- Valderhaug J (1974): A histologic study of experimentally induced periapical inflammation in primary teeth in monkeys. *Int J Oral Surg* 3, 111–123
- Vallabhaneni K, Kakarla P, Avula SSJ, Reddy NVG, Gowd MP, Vardhan KR (2017): Comparative analyses of smear layer removal using four different irrigant solutions in the primary root canals – A scanning electron microscopic study. *J Clin Diagn Res* 11, ZC64–ZC67
- Vallaey K, Chevalier V, Arbab-Chirani R (2016): Comparative analysis of canal transportation and centring ability of three Ni–Ti rotary endodontic systems: Protaper, MTwo and Revo-S, assessed by micro-computed tomography. *Odontology* 104, 83–88
- Veltri M, Mollo, Mantovani L, Pini P, Balleri P, Grandini S (2005): A comparative study of Endoflare–Hero Shaper and Mtwo NiTi instruments in the preparation of curved root canals. *Int Endod J* 38, 610–616
- Verma N, Sangwan P, Tewari S, Duhan J (2019): Effect of different concentrations of sodium hypochlorite on outcome of primary root canal treatment: A randomized controlled trial. *J Endod* 45, 357–363
- Versiani MA, Pécora JD, de Sousa-Neto MD (2011): Flat-oval root canal preparation with Self-Adjusting File instrument: A micro-computed tomography study. *J Endod* 37, 1002–1007
- Versiani MA, Leoni GB, Steier L, De-Deus G, Tassani S, Pécora 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

- Violich DR, Chandler NP (2010): The smear layer in endodontics - A review. *Int Endod J* 43, 2–15
- Winter GB, Kramer IR (1972): Changes in periodontal membrane, bone and permanent teeth following experimental pulpal injury in deciduous molar teeth of monkeys (*Macaca irus*). *Arch Oral Biol* 17, 1771–1779
- Wrbas KT, Kielbassa AM, Hellwig E (1997): Microscopic studies of accessory canals in primary molar furcations. *J Dent Child* 64, 118–122
- Wu M-K, R'oris A, Barkis D, Wesselink PR (2000): Prevalence and extent of long oval canals in the apical third. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 89, 739–743
- Yamada RS, Armas A, Goldman M, Lin PS (1983): A scanning electron microscopic comparison of a high volume final flush with several irrigating solutions: Part 3. *J Endod* 9, 137–142
- Yared GM, Dagher FEB, Machtou P (2001): Influence of rotational speed, torque and operator's proficiency on ProFile failures. *Int Endod J* 34, 47–53
- Yoldas O, Yilmaz S, Atakan G, Kuden C, Kasan Z (2012): Dentinal microcrack formation during root canal preparations by different NiTi rotary instruments and the Self-Adjusting File. *J Endod* 38, 232–235
- Yüksel BN, Demirel A, Ziya M, Kolçakoğlu K, Doğan S, Sarı Ş (2020): The effects of various irrigation protocols on root canal wall adaptation and apical microleakage in primary teeth. *Acta Odontol Scand* 78, 321–326
- Zehnder M (2006): Root canal irrigants. *J Endod* 32, 389–398
- Zmener O, Pameijer CH, Banegas G (2005): Effectiveness in cleaning oval-shaped root canals using anatomic endodontic technology, ProFile and manual instrumentation: A scanning electron microscopic study. *Int Endod J* 38, 356–363
- Zoremchhingi null, Joseph T, Varma B, Mungara J (2005): A study of root canal morphology of human primary molars using computerised tomography: An in vitro study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 23, 7–12
- Zuolo ML, De-Deus G, Belladonna FG, Silva EJNL da, Lopes RT, Souza EM, Versiani MA, Zaia AA (2017): Micro-computed tomography assessment of dentinal micro-cracks after root canal preparation with TRUShape and Self-Adjusting File systems. *J Endod* 43, 619–622
- Zuolo ML, Zaia AA, Belladonna FG, Silva EJNL, Souza EM, Versiani MA, Lopes RT, De-Deus G (2018): 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 herzlichster Dank geht an Herrn Prof. Dr. med. dent. Michael Hülsmann für die Überlassung des Dissertationsthemas, die professionelle Unterstützung, die Geduld, Motivation und stets zuverlässigen und bemerkenswert schnellen Rückmeldungen. Vielen Dank an Frau Carola Hartje und Frau Dr. Lea Marey Müller für die freundliche Beschaffung der Materialien und Proben. Ich danke auch Herrn Hans-Georg Sydow sehr für die Hilfe bei der Herstellung der REM-Aufnahmen. Ein weiterer Dank geht an Frau Dr. Baxter für die Betreuung und Unterstützung.