

Medizinische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

**Endodontie im Milchgebiss: Einfluss des Wurzelkanalfüllmaterials
auf die Dichte der Wurzelkanalfüllung unter Berücksichtigung des
Krümmungswinkels der Milchzahnwurzel**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Zahnmedizin (Dr. med. dent.)

vorgelegt

der Medizinischen Fakultät

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Franziska Fichtler

geboren am 11. August 1988 in Zeitz

Betreuer: Univ.-Prof. Dr. Hans-Günter Schaller

Univ.-Prof. Dr. Katrin Bekes (Wien)

Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Katrin Bekes (Wien)

PD Dr. Yvonne Wagner (Jena)

PD Dr. Dr. Konstanze Scheller

03.09.2019

13.05.2020

Für meine Eltern

Referat

Die Milchzahnpulpa neigt aufgrund ihrer besonderen Anatomie zu einer schnellen bakteriellen Infizierung. Eine Wurzelkanalbehandlung ist dann das Mittel der Wahl.

Die vorliegende Arbeit untersuchte den Einfluss von zwei Wurzelkanalfüllmaterialien auf die Dichtigkeit der jeweiligen Wurzelkanalfüllung unter Berücksichtigung des Krümmungswinkels der Milchzähne. Neunzig Wurzelkanäle wurden randomisiert den zwei Wurzelkanalfüllmaterialien Vitapex (Kalziumhydroxid-Jodoformpaste) und Zinkoxid-Eugenol zugeordnet. Innerhalb der beiden Materialgruppen erfolgte eine Aufteilung in drei Krümmungsstadien entsprechend der Klassifikation nach Schneider: G- gerade, M- mäßig gekrümmt, S- stark gekrümmt. Alle Wurzelkanäle wurden mit dem maschinellen Aufbereitungssystem Hero 642 (Micro Mega^R) standardisiert aufbereitet und anschließend unter gleichen Bedingungen abgefüllt. Zur Ermittlung der Dichte der Wurzelkanalfüllung wurden die Zähne nach Farbstoffpenetration mit Methylenblau vier Mal im Abstand von einem Millimeter von apikal nach horizontal geschnitten und die Querschnitte unter dem Mikroskop zur Darstellung des prozentualen Anteils von Wurzelkanalfüllmaterial und luftgefülltem Hohlraum fotografiert. Die statistische Analyse zur Bestimmung der Dichtigkeit in den beiden Materialgruppen unter Berücksichtigung der Wurzelkrümmung und der unterschiedlichen Schnittebenen erfolgte mit der Oneway ANOVA und dem Post-hoc-Test nach Mann-Whitney-U.

Insgesamt zeigte Vitapex signifikant bessere Ergebnisse bei den Wurzelkanalbehandlungen als Zinkoxid-Eugenol ($p < 0,05$, Post-hoc-Test). Im Mittel über alle Schnittebenen betrachtet erreichte Vitapex eine Dichtigkeit der Wurzelfüllung von 84,97 % gegenüber Zinkoxid-Eugenol mit 79,39 %. Die Wurzelkanaldichte wurde dabei erheblich von der Lage der Schnittebene beeinflusst ($p < 0,05$, Oneway ANOVA). Sowohl für Vitapex als auch für Zinkoxid-Eugenol fielen die errechneten Mittelwerte mit 73,82 % bzw. 68,99 % für die unterste Ebene deutlich von den Ergebnissen der anderen Ebenen ab. Bei Zinkoxid-Eugenol beeinträchtigte auch die zweite Schnittebene mit einem Dichtigkeitsgrad von 75,63 % das Gesamtergebnis negativ. Beide Materialien wurden hingegen in ihrer Qualität nicht vom Krümmungswinkel der Wurzel beeinflusst ($p > 0,05$, Oneway ANOVA). So unterschieden sich die Mittelwerte in den drei Krümmungswinkeln jeweils nur gering, Vitapex erreichte Ergebnisse zwischen 83,56 % und 86,45 %, Zinkoxid-Eugenol lag im Bereich von 77,33 % und 80,88 %. Beide Stoffe eignen sich schlussendlich als Milchzahnwurzelfüllmaterial, wobei Vitapex aufgrund der besseren Ergebnisse und der einfacheren Handhabung der Vorzug gegeben werden sollte.

Fichtler, Franziska: Endodontie im Milchgebiss: Einfluss des Wurzelkanalfüllmaterials auf die Dichte der Wurzelkanalfüllung unter Berücksichtigung des Krümmungswinkels der Milchzahnwurzel, Halle (Saale), Univ., Med. Fak., Diss. 75 Seiten, 2019

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Milchzahn-anatomie	2
1.2	Ursachen für endodontische Behandlungen im Milchgebiss	4
1.2.1	Karies und frühkindliche Karies	5
1.2.2	Erkrankungen der Pulpa im Milchgebiss	6
1.2.3	Trauma	9
1.3	Therapie	9
1.3.1	Caries profunda	10
1.3.2	Direkte Überkappung	11
1.3.3	Pulpotomie	11
1.3.4	Temporäre Maßnahmen	14
1.4	Pulpektomie	14
1.5	Aufbereitungsmethoden	15
1.5.1	Längenbestimmung der Wurzelkanäle	15
1.5.2	Manuelle Aufbereitung	16
1.5.3	Maschinelle Aufbereitung	17
1.6	Wurzelkanalspülung	18
1.6.1	Spülmittel	19
1.6.2	Ultraschall	20
1.7	Medikamentöse Einlage	20
1.7.1	Ziel und Indikation	20
1.7.2	Kalziumhydroxid	21
1.7.3	Antibiotikaeinlage	21
1.8	Wurzelkanalfüllung	22
1.8.1	Materialien	22
1.8.2	Erfolg und Misserfolg	23

1.9	Postendodontische Restauration	24
1.9.1	Füllungsmaterialien für das Milchgebiss	24
1.10	Untersuchung der Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung	25
1.10.1	Farbstoffpenetrationstest	25
1.10.2	Bakterienpenetrationstest	26
1.10.3	Penetrationstest durch Flüssigkeitsfiltration	26
1.10.4	Glukosepenetrationstest	27
2.	Zielsetzung	28
3.	Material und Methode	29
3.1	Material	29
3.1.1	Milchzähne	29
3.1.2	Spüllösungen	30
3.1.3	Wurzelkanalfüllmaterialien	30
3.1.4	Farbstofflösung	31
3.1.5	Instrumente und Hilfsmittel	32
3.2	Methode	33
3.2.1	Bearbeitung der Versuchszähne	35
3.2.2	Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit Hero 642	35
3.2.3	Wurzelkanalfüllung	36
3.2.4	Abschlussfüllung	36
3.2.5	Lagerung und Weiterverarbeitung der Milchzähne	37
3.2.6	Horizontalschnitte und Digitalisierung der Präparate	37
3.2.7	Statistische Analyse	37
4.	Ergebnisse	38
4.1	Deskriptive Statistik	41
4.1.1	Zusammenfassung deskriptive Statistik	44
4.1.2	Das getrimmte Mittel	45
4.2	Statistische Analyse	46
4.2.1	Normalverteilung	46

4.2.2	Materialabhängigkeit	48
4.2.3	Krümmungswinkeleinfluss	49
4.2.4	Schnittebenenunterschied	50
4.2.5	Zusammenfassung statistische Analyse	53
5.	Diskussion	54
5.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	54
5.2	Ergebnisse	57
6.	Zusammenfassung	60
7.	Quellen	62
8.	Thesen	72
9.	Anlagen	73
10.	Selbstständigkeitserklärung	V
11.	Lebenslauf	VI
12.	Danksagung	VII

Abkürzungsverzeichnis

AAPD	American Society of Paediatric Dentistry
BSPD	British Society of Paediatric Dentistry
CHX	Chlorhexidindigluconat
DAJ	Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Jugendzahnpflege
df	degrees of freedom (Freiheitsgrade)
DGKiZ	Deutsche Gesellschaft für Kinderzahnheilkunde
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
F	Parameter aus SPSS-Programm
FG-Winkelstück	friktion grip Winkelstück
G	gerade
HERO 642	high elasticity in rotation 642
ISO	International Organization for Standardization
KW	Krümmungswinkel
M	mäßig gekrümmt
mm	Millimeter
MTA	Mineral Trioxid Aggregate
n	Anzahl
NaOCl	Natriumhypochlorit
NiTi	Nickel-Titan
p	Signifikanzwert
S	stark gekrümmt
SD	Standardabweichung
V	Vitapex
Z	Zinkoxid-Eugenol

1. Einleitung

Trotz großer Bemühungen in der Prophylaxe führt Karies zu einem erheblichen Behandlungsaufwand bei Kindern. Entsprechend einer von der deutschen Arbeitsgemeinschaft für Jugendzahnpflege (DAJ) in Auftrag gegebenen aktuellen Studie, bei der deutschlandweit mehr als 300.000 Kinder untersucht wurden, leiden die Drei- und Sechs- bis Siebenjährigen stark unter Milchzahnkaries. Schon 14 Prozent der Dreijährigen weisen durchschnittlich drei bis vier kariöse Milchzähne auf. Dieser Anteil steigt stetig an, so dass bei 44 Prozent der Erstklässler ein bis zwei erkrankte Zähne zu diagnostizieren sind. Gegenwärtig zeigt sich ein kontinuierlicher Kariesrückgang nur bei zwölfjährigen Kindern, fast 80 Prozent haben kariesfreie, bleibende Gebisse (DAJ, 2016).

Wie wichtig Milchzähne für die gesunde Entwicklung eines Kindes sind, zeigen deren zahlreiche Funktionen. Sie fördern eine normale Gebissentwicklung, ermöglichen das Kauen, unterstützen die Phonetik und sollten daher bis zu ihrem physiologischen Ausfall erhalten bleiben (DGZMK, 2002).

Neben der restaurativen Versorgung von Milchzähnen gehören endodontische Maßnahmen im Milchgebiss zu den häufigsten Therapieverfahren in der Kinderzahnmedizin (Krämer und Frankenberger, 2007). Die Wurzelkanalbehandlung im Milchgebiss stellt den Behandler jedoch vor spezielle Herausforderungen. Schon die Erstellung einer Diagnose kann sich als schwierig erweisen, erst genaue klinische und radiologische Abklärungen ermöglichen die Beurteilung einer erkrankten Milchzahnpulpa. Zudem ist das Wurzelkanalsystem oft verzweigt, eine vollständige Reinigung durch die natürliche Resorption sehr schwierig (Weber, 2017). Nicht zuletzt muss die erforderliche langwierige und aufwendige, sich möglicherweise wiederholende Behandlung unter trockenem Arbeitsfeld bei dem jungen Patienten und seinen Eltern Akzeptanz finden.

1.1 Milchzahn-anatomie

Die 20 Milchzähne des Menschen entwickeln sich aus der generellen Zahnleiste. Pro Kiefer wachsen seitwärts durch Zellvermehrung zehn epitheliale Gebilde und durchlaufen jeweils drei Stadien: Knospen-, Kappen- und Glockenstadium (Leche, 1896; Weber, 2017). Der normale Durchbruch beginnt im Alter des Kindes von sechs bis zehn Monaten, wobei die mittleren unteren Inzisiven als erstes eruptieren (Schröder, 2000; Weber 2017).

Milchzähne bestehen, genau wie die bleibenden Zähne, aus einer Zahnkrone, einem Zahnhals und den Zahnwurzeln. Die Zähne sind über kollagene Faserbündel, so genannte Sharpey'sche Fasern, im Desmodont elastisch mit der Alveole verbunden. Sie sind nicht fest mit dem umliegenden Knochen verwachsen, so dass die Verbindung straff, aber beweglich ist. Die Fasern werden bei Druck auf den Zahn angespannt und übertragen die Kraft auf den Knochen als Zugkraft. Dieser wird dadurch zum Aufbau beziehungsweise zur Verstärkung angeregt (Gühring und Barth, 1992). Das Desmodont ist eine dichte Bindegewebszone zwischen Zement und knöcherner Alveole und dient als Stoßdämpfer, Fühler des Zahnes und Tastorgan (Stock et al., 2005; Klimm, 2011).

Der außenliegende Schmelz wird während der Entwicklungsphase von Ameloblasten gebildet. Diese Zellen gehen nach der Entstehung der Schmelzprismen zu Grunde, so dass der Zahnschmelz nicht erneuerbar ist. Er besteht zu 95 % aus Hydroxylapatit, einem kristallinen Material, dessen Hauptbestandteile Kalzium und Phosphat sind (Opitz und Schmid, 1968; Nanci, 2007). Mit Hilfe von Fluoriden wird das Hydroxylapatit in das härtere Fluorapatit umgewandelt, weshalb Fluoride in Zahnpasten verwendet werden (Schiffner, 2007).

Die Grundsubstanz, aus der die Zähne aufgebaut sind, ist das Dentin. Dieses wird im Bereich der Zahnkrone und des Zahnhalses von einem Überzug aus Schmelz geschützt. Innerhalb des Dentins befindet sich die Pulpa. Sie enthält Nerven, Lymph- und Blutgefäße und ist über das Foramen apicale mit dem Parodontium verbunden (Opitz und Schmid, 1968; Nanci, 2007).

Odontoblasten, die das Dentin bilden, liegen am äußeren Rand der Pulpa und haben Zellfortsätze, die in kleinen Kanälchen durch das Zahnbein verlaufen. Innerhalb dieser Kanäle werden Schmerzreize zur Pulpa weitergeleitet. Da die Odontoblasten nach Abschluss der Zahnentwicklung erhalten bleiben, kann zeitlebens Dentin gebildet werden. Das regulär nach Abschluss des Wurzelwachstums gebildete Dentin mit normaler Struktur wird als Sekundärdentin bezeichnet. Hiervon ist das Tertiärdentin zu unter-

scheiden, das auf einen äußeren Reiz hin als Abwehrreaktion gebildet wird (Klimm, 2011).

Die Zahnpulpa, ein gallertartiges Gewebe, enthält Fibroblasten, Abwehrzellen, Makrophagen, Bindegewebsfasern, Gefäße und Nerven. Sie entsteht aus der ektomesenchymalen Zahnpapille, die äußerste Schicht wird aus Odontoblasten gebildet (Klimm, 2011). Die Pulpa sorgt für die Ernährung des Zahnes, stellt die Sensibilität sicher, kann Dentin nachbilden und erfüllt eine defensive Funktion (Stock et al., 2005; Hülsmann, 2008; Weber, 2017).

Von Zementoblasten wird das Wurzelzement gebildet, welches das Foramen apicale auskleidet. Diese Schicht ist im Bereich des Zahnhalses sehr dünn und wird zur Wurzelspitze hin dicker. Die kollagenen Faserbündel aus der Wurzelhaut sind im Wurzelzement verankert, es erfüllt somit eine wichtige Aufgabe für den Halt des Zahnes (Klimm, 2011).

Zwar sind Milchzähne und bleibende Zähne grundsätzlich gleich aufgebaut, jedoch bestehen anatomisch in verschiedenen Aspekten Unterschiede, wie Abbildung 1 verdeutlicht.

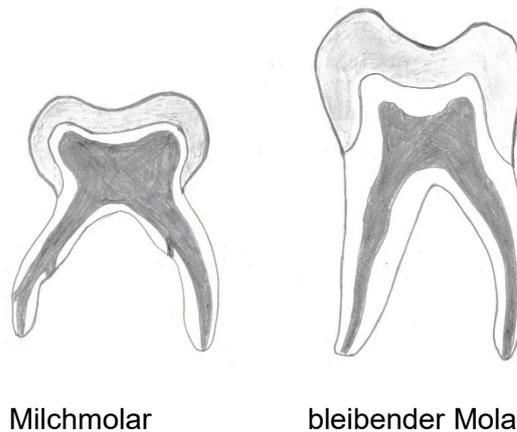


Abbildung 1: modifiziert nach Weber, 2017: Milchmolar im Vergleich zu einem bleibenden Molar

Milchzähne besitzen im Gegensatz zu bleibenden Zähnen einen dünneren Schmelzmantel und eine ausgedehntere Pulpakammer mit ausgeprägten Pulpahörnern. Die schmalere Okklusalfäche wird durch die starke Konvergenz der Krone vom Äquator zur Okklusalfäche verursacht (Einwag et al., 2002). Dentis decedui haben proportional gesehen längere Wurzeln, die in mesiodistaler Richtung abgeflacht sind (Opitz und Schmid, 1968). Befällt eine Karies den Milchzahn, so erreicht diese die Pulpa schneller, wobei die breiten Approximalkontakte zusätzlich die Kariesdiagnostik erschweren (Heinrich-Weltzien und Kühnisch, 2007). In der Füllungstherapie beengt die zervikale Einziehung sowie die Begrenzung der Pulpa die Kavitätenpräparation. Der Halt einer

Matrize wird durch den basalen Schmelzwulst geschwächt (Schwendicke, 2018). Profunde Karies sorgt für eine schnelle Ausbreitung entzündlicher Veränderungen in der koronalen Pulpa. Klinisch resultiert dies in der Tatsache, dass die akute Pulpitis relativ selten und flüchtig bei Milchzähnen auftritt (Butz, 2004).

Liegt eine Pulpanekrose vor, so können der dünne Cavumboden und die akzessorischen Kanäle interradikuläre Symptome verursachen. Eine vollständige Reinigung des Wurzelkanalsystems bei einer Pulpektomie gestaltet sich durch die oft sehr verzweigten Kanäle und die natürliche Resorption des Körpers sehr schwierig (Schwendicke, 2018). Darüber hinaus verfügen Milchzähne, im Vergleich zu bleibenden Zähnen, über ein geringeres Heilungspotenzial. Histologisch ähneln die Milchzahnpulpen zwar denen des jungen bleibenden Zahnes, aber sie weisen eine typische Entzündungsreaktion des Gewebes auf, die stärker als beim bleibenden Zahn ist (Heinrich-Weltzien und Kühnisch, 2007).

Die aufgeführten zahlreichen physiologischen Spezifika verdeutlichen, dass die Behandlung von Dentes decedui besonderen Augenmerkes bedarf.

1.2 Ursachen für endodontische Behandlungen im Milchgebiss

Diagnostik

Um eine Erkrankung des Zahnes zu befunden stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die meist in Kombination zu einer gesicherten Diagnose führen. Nach erfolgter Anamnese ist zunächst die intraorale Inspektion vorzunehmen. Hierbei wird u. a. auf Karies, frakturierte Füllungen, Füllungsverluste, Traumata, Fistelgänge, Lockerungsgrade, Pulpapolyphen oder Schwellungen geachtet (Einwag et al., 2002; Klimm, 2011). Die anschließende Sensibilitätsprüfung testet die Leitfähigkeit und die Funktionalität der Nervenfasern und wird auf thermische (Propan-/Butanspray, Kohlendioxid), elektrische (Elektroden, die zur Erhöhung des Schwellenwertes führen bis der Patient einen Reiz bemerkt) oder mechanische (Probetrepanation) Weise durchgeführt (Hülsmann, 2008; Klimm, 2011). Dabei treten allerdings falsch positive Ergebnisse auf, wenn der Patient sehr ängstlich ist, fehlerhafte Angaben macht oder noch vitales Gewebe in partiell nekrotischen Wurzelkanälen vorhanden ist (Heinrich-Weltzien und Kühnisch, 2007). Dentale Traumata, noch nicht abgeschlossenes Wurzelwachstum oder eine fortgeschrittene Milchzahnresorption können dagegen ursächlich für ein falsch negatives Ergebnis sein (Einwag et al., 2002; Hülsmann, 2008).

In der klinischen Befunderhebung schließt sich der Perkussionstest an, welcher bei einem positiven Ergebnis auf eine akute Entzündung im apikalen Parodont bei vorliegender Pulpitis oder infizierter Pulpanekrose hinweist (Klimm, 2011). Als zusätzliches

diagnostisches Mittel zum Erkennen eventueller Frakturlinien steht die Transillumination mittels Kaltlichtsonde zur Verfügung (Weber, 2017). Zur Absicherung der Diagnose muss auch bei Kindern, wenn eindeutige klinische Anhaltspunkte fehlen, ein Röntgenbild angefertigt werden. In akuten Fällen ist der Zahnfilm als gezielt befundbezogene Untersuchung angezeigt. Auf diese Weise können die Zahnhartsubstanz (Ausdehnung einer möglichen Karies, Frakturlinien, Lage der Pulpahörner und des Pulpacavums, Zahl und Lage der Wurzelkanäle, Stand der Wurzelresorption), der Knochen (Lagebeziehung zum Keim des bleibenden Nachfolgers, Kieferhöhlen, Desmodontalspalt, Knochenabbau, periradikuläre Veränderungen, Fistelgang) und die Therapie (Qualität der Wurzelfüllung, Instrumentenfraktur) beurteilt werden (Einwag et al., 2002; Hülsmann, 2008; Klimm, 2011).

1.2.1 Karies und frühkindliche Karies

Karies

Karies hat ihren Ursprung in der bakteriellen Plaque. Durch Verstoffwechslung von Kohlenhydraten auf der Zahnoberfläche entstehen Säuren, welche das Zahnhartgewebe demineralisieren (Finke, 2012).

Eine den Zahn befallende Karies durchläuft vom White Spot bis zur Caries penetrans verschiedene Stadien. Schon der White Spot ist eine Läsion, die eine Vielzahl von Mikroläsionen umfasst. Der älteste Part der Läsion mit der größten Eindringtiefe liegt zentral, wohingegen die peripheren Anteile neueren Ursprungsdatums sind (Bjørndal und Thylstrup, 1995; Finke, 2012). Dabei können schon bei klar definierten kariösen Schmelzläsionen morphologische Veränderungen der Odontoblasten nachgewiesen werden (Bjørndal und Darnnavan, 1999). Die Reaktion der Pulpa auf einen Kariesbefall beginnt somit sehr früh. Die erste histologische Veränderung zeigt sich in der Dentinschicht unterhalb der Schmelzläsion in einer Hypermineralisation der Dentintubuli. Dringt die Karies bis in die Dentinschicht vor, so schützt die Schmelzschicht den Zahn vor einer bakteriellen Kontamination. Erst bei Einbruch der Schmelzschicht kommt es zur mikrobiellen Infektion (Bjørndal, 2008).

Von entscheidender Bedeutung sind dabei der Zustand des Dentins am Kavitätenboden und die Menge an verbleibender Resthartsubstanz, denn hat die weiche Karies die Pulpa erreicht, gilt diese als mikrobiell kontaminiert (Hülsmann, 2008). Bei Pulpaeröffnung weist eine dunkelrote, heftige Blutung auf eine massive Entzündung hin, wohingegen eine helle, leichte Blutung auf eine geringe Entzündung schließen lässt (Einwag et al., 2002).

Frühkindliche Karies

Üblicherweise entsteht eine Karies zunächst an Prädilektionsstellen wie Fissuren oder Approximalflächen, wo sie sich langsam von einer Initiailläsion bis zur Kavitation entwickeln kann. Bei der frühkindlichen Karies erkranken jedoch zu Beginn die Glattflächen der oberen Schneidezähne (Borutta et al., 2010). Ohne frühzeitige Behandlung kommt es zur kompletten Zersetzung der Zahnkrone (Kagihara et al., 2009). Als Ursache gilt neben der frühen Infektion mit kariogenen Keimen über die Mutter das häufige Zuführen von kohlenhydratreicher Nahrung, zum Beispiel in Form von zuckerhaltigen Getränken (Borutta et al., 2010). Unzureichende Mundhygiene beschleunigt zusätzlich den Prozess (Harris et al., 2004). Ein niedriger sozio-ökonomischer Status, ein Migrationshintergrund, unzureichendes Gesundheitswissen und eine geringe Schulbildung stellen weitere Einflussfaktoren der frühkindlichen Karies dar (Borutta et al., 2010; DAJ, 2016). Bedos et al. fanden in ihrer Studie heraus, dass Kinder, deren Eltern oder Geschwister unter erheblichem Kariesbefall litten, selbst ein erhöhtes Kariesrisiko aufwiesen (Bedos et al., 2005). Dies macht deutlich, dass die Aufklärung der Erziehungsberechtigten über das Thema Mundgesundheit und Ernährung sowie engmaschige Kontrolluntersuchungen mit regelmäßiger Fluoridapplikation entscheidend für das Auftreten und den Verlauf einer frühkindlichen Karies sind (Kawashita et al., 2011). Die Therapie besteht aus der Restauration oder Entfernung der befallenen Zähne. Allerdings hat sich gezeigt, dass innerhalb eines Jahres nach Behandlung in bis zu 40 % der Fälle ein Wiederauftreten der Karies festzustellen ist. Die Prävention spielt somit eine maßgebliche Rolle (Kawashita et al., 2011).

1.2.2 Erkrankungen der Pulpa im Milchgebiss

Mit Beginn der physiologischen Wurzelresorption lässt die Abwehrkraft der Pulpa nach, reparative Prozesse verlaufen langsamer oder finden gar nicht mehr statt. Eine entzündete Pulpa reagiert ohne Schmerzreiz, so dass der tatsächliche Pulpazustand für das Kind und den behandelnden Zahnarzt verborgen bleibt. Dieser primär chronische Entzündungsverlauf findet sich im Milchgebiss häufig sowohl bei den Pulpaerkrankungen als auch bei den apikalen Parodontitiden, die oft aus früheren akuten oder chronischen Pulpitiden entstehen (Bekes, 2018).

Voraussetzung für eine Erkrankung der Pulpa ist immer eine Besiedelung mit Mikroorganismen, wie sie in der Mundflora vorkommen. Im Tierexperiment mit Ratten konnte gezeigt werden, dass freigelegte Pulpen bei keimfreien Ratten keine Pulpanekrosen, Abszesse oder periapikale Granulome aufwiesen (Kakehashi et al., 1965).

Infektionspforten für Mikroorganismen stellen Schmelz- und Dentinsprünge, Karies, Traumata, Erosionen, apikale Foramen, iatrogen geöffnete Pulpenkammern oder undichte koronale Restaurationen dar (Hülsmann, 2008).

Die Pulpa kann bereits über Schmelz-Dentin-Sprünge infiziert werden, meist ausgelöst durch Beißen auf einen kleinen harten Gegenstand (Cracked-tooth-Syndrom). Der Patient beklagt nach dem isolierten Zubeißen einen spontanen Schmerz (Banerji et al., 2010; Klimm, 2011). Oft ist jedoch eine fortgeschrittene Karies Ursache für Pulpaentzündungen. Das Milchgebiss weist die Besonderheit auf, dass es keinen Unterschied von Caries media und Caries profunda gibt und Reizdentin nur gering gebildet wird. Die Pulpa wird somit schneller und frühzeitiger erreicht (Butz, 2004).

Neben Traumata als mögliche Ursache einer Kontamination (Klimm, 2011) kann es bei der Kariesentfernung zur iatrogenen Eröffnung mit nachfolgender Pulpaentzündung kommen. Darüber hinaus wirkt sich die Austrocknung des freigelegten Dentins durch den Luftbläser zusätzlich negativ auf den Pulpazustand aus (Brännström, 1960).

Reversible Pulpitis

Die reversible Pulpitis kennzeichnet ein durchdringender Schmerz, welcher durch Wärme oder Kälte, meist jedoch durch Kälte, ausgelöst wird. Dieser Schmerz dauert nur so lange wie der Reiz auf den Zahn wirkt (Baumann und Beer, 2007). Auf Vitalitätstests reagiert der betroffene Zahn positiv. Beim Perkussionstest spürt der Patient keine Veränderung und eine Palpation im Wurzelbereich kann schmerzfrei erfolgen. Wird ein Röntgenbild angefertigt, so ist keine Veränderung sichtbar (Stock et al., 2005; Schwendicke, 2018).

Irreversible Pulpitis

Entsteht der Schmerz durch Kälte oder Wärme und dauert Minuten an, spricht man von einer irreversiblen Pulpitis. Der Schmerz kann nachts stärker werden und ist zunächst vom Patienten nicht lokalisierbar (Baumann und Beer, 2007; Schwendicke, 2018). Im Verlauf ändert sich das Schmerzbild, die Beschwerden treten auch spontan auf und die Patienten verspüren eine Linderung bei Kälte (Stock et al., 2005). Der Vitalitätstest fällt meist positiv aus, der Perkussionstest kann sowohl negativ als auch positiv sein. Bei fortgeschrittener Pulpitis wird auf dem Röntgenbild eine Veränderung im Bereich des Parodontalspaltes sichtbar (Hülsmann, 2008).

Pulpanekrose

Bleibt eine Pulpainfektion unbehandelt, entwickelt sich eine Entzündung der periapikalen Region und eine Pulpanekrose entsteht (Hülsmann, 2008).

Der Patient beschreibt einen Spontanschmerz, welcher nicht durch Reize wie Wärme oder Kälte ausgelöst wird, gleichzeitig reagiert er nicht auf einen Sensibilitätstest (Baumann und Beer, 2007). Hat sich die Entzündung auf das periradikuläre Gewebe ausgebreitet ist die Perkussion positiv. Im Röntgenbild zeigt sich möglicherweise ein erweiterter Parodontalspalt (Stock et al., 2005; Weber, 2017).

Parodontitis apicalis

Eine Entzündung des apikalen Parodonts mit pulpaler Ursache wird als apikale Parodontitis bezeichnet. Ein akuter apikaler Prozess zeigt sich durch eitriges Exsudat um den Apex. Der Patient leidet unter pulsierendem Spontanschmerz, der Zahn ist extrem berührungs- und aufbisempfindlich, später sind Schwellungen und die Lockerung des Zahnes möglich (Klimm, 2011). Der Vitalitätstest fällt negativ aus, der Perkussionstest ist ausgeprägt positiv. Bei einer Parodontitis apicalis acuta werden folgende Phasen durchlaufen: periodontale Phase, enostale Phase, subperiostale Phase, submuköse Phase (Klimm, 2011). Im Röntgenbild kann ein erweiterter Parodontalspalt sichtbar sein (Gängler et al., 2005; Stock et al., 2005; Weber, 2017).

Spürt der Patient den Zahn nur von Zeit zu Zeit und tritt eine asymptomatische Entzündung um den Apex auf, so handelt es sich um eine chronische apikale Parodontitis. Im Röntgenbild kann sich eine unterschiedlich starke Aufhellung zeigen und eine Fistel vorhanden sein. Die Pulpa ist devital (Stock et al., 2005).

Bei der Exazerbation der Parodontitis apicalis chronica entwickeln sich die Beschwerden aus einem chronischen Prozess heraus. Der Patient bemerkt einen pulsierenden Spontanschmerz, verbunden mit starker Aufbisempfindlichkeit. Auf den Perkussionstest reagiert der Patient stark positiv und die Palpation im Wurzelbereich schmerzt. Im Röntgenbild ist eine periapikale Aufhellung sichtbar (Gängler et al., 2005; Weber, 2017).

Mikroflora des infizierten Wurzelkanals und der apikalen Parodontitis

Die Parodontitis apicalis wird durch eine polymikrobielle Opportunisteninfektion des endodontischen Systems ausgelöst (Theilade, 2003). Ihre Entwicklung ist an die bakterielle Kontamination der Pulpa geknüpft, welche durch den Verlust der Integrität der Zahnhartsubstanz entsteht. Die Besiedlungsfolge der mikrobiellen Arten im Wurzelkanal wird u. a. durch das intrakanaläre Sauerstoffangebot geregelt. So dominieren in der frühen Wurzelkanalflora Aerobier und fakultative Anaerobier. Nach Sauerstoffverbrauch wachsen obligate Anaerobier (Fabricius et al., 1982). Die prädominante Spezies bei persistierenden intraradikulären Infektionen ist *E. faecalis* (Klimm, 2011).

1.2.3 Trauma

Unfälle im Milchgebiss ereignen sich vor allem zwischen dem zweiten und dritten Lebensjahr, da in diesem Alter die Entwicklung der motorischen Koordination beginnt. Durch die enge topografische Lage der Milchzähne zu den Zahnkeimen der zweiten Dentition besteht die Gefahr, den bleibenden Nachfolger zu verletzen (Filippi und Krastl, 2007). Aus diesem Grund ist die oberste Priorität bei der Behandlung traumatisierter Milchzähne der Schutz des nachfolgenden bleibenden Zahnes (Pelka, 2013).

Grundsätzlich können Milchzähne die gleichen Verletzungen wie bleibende Zähne erleiden. Aufgrund der gegebenenfalls bereits partiell resorbierten Wurzeln, des spongioseren Alveolarfortsatzes sowie des breiteren Parodontalspaltens treten bei Dentis decidui jedoch deutlich häufiger Dislokationsverletzungen als Frakturen auf (Schatz und Joho, 1994; Filippi und Krastl, 2007).

Unkomplizierte Kronenfrakturen können geglättet beziehungsweise minimalinvasiv rekonstruiert werden. Ein Zahn mit einer Kronenfraktur und exponierter Pulpa wird, je nach Dauer der Exposition, pulpotomiert oder eine Pulpektomie vorgenommen. Bei Kronen-Wurzel-Frakturen oder Wurzelfrakturen mit mobilem koronalem Fragment wird, ebenso wie bei stark extrudierten Milchzähnen, die Extraktion empfohlen (Pelka, 2013).

1.3 Therapie

Zur Behandlung eines erkrankten Milchzahnes bzw. einer erkrankten Milchzahnpulpa stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Dabei ist der klinische und röntgenologische Zustand des Zahnes ausschlaggebend, um eine optimale Therapie zu ermöglichen.

In den letzten Jahren hat in der Kinderzahnheilkunde ein Paradigmenwechsel stattgefunden. Non- und mikroinvasive Therapien wie Biofilmkontrolle oder Versiegelung wurden bisher vorzugsweise bei der Behandlung von Karies ohne Kavitation durchgeführt. Sie können jedoch unter bestimmten Voraussetzungen auch bei tieferen Läsionen eingesetzt werden, so lange es sich um reinigungsfähige Kavitäten handelt. Das Einsetzen einer konfektionierten Stahlkrone (Hall-Technik) ohne Exkavation stellt eine solche Methode dar. In den meisten Fällen muss der behandelnde Zahnarzt jedoch auf invasive Eingriffe zurückgreifen (Schwendicke, 2018). Wie viel kariöses Gewebe dabei entfernt werden muss um eine Restauration einsetzen zu können und wann eine endodontische Behandlung am Milchzahn indiziert ist, wird in diesem Kapitel betrachtet.

1.3.1 Caries profunda

Ist ein Zahn von einer Caries profunda betroffen und besteht bei der Exkavation das Risiko die Pulpa zu eröffnen, so wird die indirekte Überkappung angewendet. Der Milchzahn darf dabei nicht perkussionsempfindlich sein oder pulpitische Symptome aufweisen (Einwag et al., 2002; Schwendicke, 2018).

Nach teilweiser oder vollständiger Kariesexkavation wird der Kavitätenboden mit einem Kalziumhydroxidpräparat abgedeckt, um verbleibende Bakterien abzutöten und die Remineralisierung und Dentinreparatur anzuregen. Eine neue Generation odontoblasten-ähnlicher Zellen differenziert und bildet tubuläres Tertiärdentin (Bjørndal et al., 1999). Dabei ist die Restdentinstärke des Kavitätenbodens ein Indikator für den Behandlungserfolg. Eine geschätzte Dentindicke von 0,5 bis 1,0 mm ist prognostisch günstig, während eine geringere Restdentinstärke ungünstig bewertet wird (Murray et al., 2003). Neuere Studien zeigen jedoch auch, dass die Anzahl der noch vorhandenen Bakterien nicht durch Kalziumhydroxid beeinflusst wird (Pinto et al., 2006; Büyükgöral et al., 2008).

In jüngster Zeit wird auch Mineral Trioxid Aggregate (MTA) als Versiegelung eingesetzt, da es vermehrt zur Dentin-Brückenbildung führt (Schwendicke, 2018).

Während in den vergangenen Jahrzehnten die vollständige Kariesexkavation unstrittig war, wird jetzt ein zurückhaltendes Vorgehen diskutiert (DGKiZ, 2012). Bei Sicherstellung eines dichten Kavitätenverschlusses kann kariös-erweichtes Dentin in pulpanahen Arealen belassen werden (BSPD, 2006; AAPD, 2016). Lula et al. verglichen in einer Studie hierzu zwei Gruppen. In der ersten Gruppe von 16 Milchmolaren erfolgte die vollständige Entfernung der Karies, in der zweiten Gruppe wurde eine dünne Schicht Restkaries am Kavitätenboden belassen und die Zähne mit einer Füllung dicht verschlossen. Im Ergebnis stellten Lula et al. fest, dass ein späteres Wiedereröffnen der Kavität mit Restkaries unnötig ist, da mikrobiell kein Unterschied in der Anzahl der verbliebenen Bakterien in den beiden Gruppen bestand (Lula et al., 2009). Auch Bressani et al. bestätigten in ihrer Studie diesen Standpunkt (Brenassi et al., 2013).

Neben dem Risiko, bei der Wiedereröffnung die Pulpa zu verletzen, ist die schrittweise Kariesentfernung mit zusätzlichem Aufwand für Behandler und Patient verbunden (Schwendicke, 2018). Somit wird heute der einzeitigen Kariesexkavation gegenüber dem zweizeitigen Vorgehen der Vorzug eingeräumt (Fuks, 2008; DGKiZ, 2012). Essentiell für das Gelingen ist dabei der dichte Verschluss des Zahnes mit einer Füllung, wobei die Kavitätenränder unabhängig von der Wahl des definitiven Füllungsmaterials in kariesfreier Zahnhartsubstanz liegen müssen. Nur so sind klinisch-röntgenologische

Erfolgsraten über 90 % nach mehrjähriger Beobachtungszeit zu erzielen (Stock et al., 2005; Gruythuysen et al., 2010; DGKiZ, 2012).

In jüngster Vergangenheit hat sich eine weitere Therapieoption für kariöse Milchmolaren, die Hall-Technik, etabliert. Eine konfektionierte Krone wird auf den betreffenden Zahn zementiert, ohne eine Kariesexkavation im Dentin, Anästhesie oder Präparation vorzunehmen (Innes et al., 2006). Diese Methode konnte sich in klinischen Studien bewähren und wird von Kindern wegen des non-invasiven Vorgehens oft sehr gut toleriert (Schwendicke, 2018). Ihre Indikation ist jedoch streng begrenzt und die Durchführung wird kontrovers in der Literatur diskutiert (Bekes, 2018).

1.3.2 Direkte Überkappung

Die direkte Überkappung wird bei punktförmiger Pulpafreilegung, bei Kariesexkavation oder nach traumatischer Exposition, die nicht älter als 24 Stunden sein darf, angewendet (AAPD, 2016). Die Pulpa sollte symptomlos und nur geringfügig im gesunden Dentin eröffnet worden sein (DGKiZ, 2012).

Nach Säuberung der exponierten Pulpa mit sterilem Wasser oder Salzlösung sollte es nach maximal 5 Minuten zum Stopp der Blutung kommen. Ein Kalziumhydroxidpräparat wird zum Abdecken verwendet, darüber wird eine Füllung gelegt (Stock et al., 2005; BSPD, 2006). Kalziumhydroxid führt zunächst oberflächlich zur Gewebenekrose in der Kontaktzone mit der Pulpa. Die darunter liegende, intakte Pulpa wird dadurch zur Ausbildung neuen Dentins angeregt (Hülsmann, 2008).

Auch mit MTA überkappte Milchzähne zeigten in neueren Studien eine gute Pulpareaktion (Hilton et al., 2013).

Insgesamt weist die direkte Überkappung allerdings eine hohe Misserfolgsrate auf, vor allem wenn die Pulpa durch ein Trauma oder mechanisch verletzt wurde (Fuks, 2008; Ghajari et al., 2013). Das Versagen beruht wahrscheinlich auf internen Resorptionen oder akuten dentoalveolären Abszessen (Fuks, 2008).

1.3.3 Pulpotomie

Führt eine Kariesexkavation zur großflächigen Eröffnung der Milchzahnpulpa, wird die Pulpa im kariösen Dentin freigelegt oder nach einer traumatischen, maximal 24 Stunden zurückliegenden Pulpaexposition ist die Pulpotomie indiziert (Hülsmann, 2008; Klimm, 2011). Das Ziel der Amputation besteht in der Vitalerhaltung der Restpulpa, der Verhütung des Fortschreitens der Infektion und der Sicherung der ungestörten Resorption der Wurzeln bis zum physiologischen Zahnwechsel (Butz, 2004). Zähne, deren

Pulpa schon durch eine Karies eröffnet wurde, sind meist nicht vollständig vital und eignen sich nicht für eine Pulpotomie (Coll, 2008).

Die Pulpotomie wird entweder partiell (Entfernung des Pulpagewebes nur unterhalb der Expositionsstelle) oder vollständig (Entfernung der gesamten Kronenpulpa) durchgeführt. Die Milchzahnpulpa sollte dabei vital sein oder maximal die Zeichen einer partiellen, koronalen Pulpitis aufweisen (BSPD, 2006, AAPD, 2016). Im möglichst absolut trockenen Arbeitsfeld wird das Pulpdach entfernt und die Kronenpulpa im Bereich der Wurzeingänge mit einem Diamantschleifer unter Kochsalzberieselung amputiert (BSPD, 2006). Kochsalzlösung, Eisen-III-Sulfat-Lösung oder ein feuchtes Wattepellet werden zur Blutstillung verwendet (DGKiZ, 2012; AAPD, 2016). Die Blutstillung ist dabei entscheidend, um die Ausbildung eines Blutkoagulum an der Amputationsstelle zu vermeiden. Das Koagulum würde die Entwicklung einer Entzündungsreaktion begünstigen, die Ausbildung einer Hartgewebsbrücke verhindern und interne Resorptionsvorgänge fördern (DGZMK, 2002).

Zum Einsatz von Laser- und Elektrochirurgie zur Hämostase gibt es vergleichsweise wenig Studien bzw. Langzeitergebnisse. Methodenspezifische Aspekte wie Stromstärke, Wellenlänge, Energiedichte, Expositionszeit sowie thermische Nebenwirkungen konnten bislang nicht geklärt werden. Die Techniksensibilität und der hohe Kostenaufwand unterstützen die routinemäßige Anwendung ebenfalls nicht (Bekes, 2018).

Die Behandlung wird mit dem Anlegen des Wundverbandes fortgeführt (DGKiZ, 2012; AAPD, 2016). Als Materialien stehen unter anderem Zinkoxid-Eugenol, Kalziumhydroxid-Jodoformpaste, MTA, Biodentine™ und Medcem MTA® zur Verfügung. Der Wundverband sollte bakterizid wirken, die Heilung der Wurzelpulpa fördern, unbedenklich für zahnumgebende Strukturen sein und die Resorption der Milchzahnwurzel nicht behindern (Klimm, 2011). Zinkoxid-Eugenol führt zwar zu partiellem Dentinbridging, allerdings werden auch häufig Misserfolge mit chronischen Pulpaentzündungen und hydrolytischen Auflösungserscheinungen beschrieben (van Waes, 2011).

Kalziumhydroxid dient der Bildung einer Hartschichtbarriere und keimfreier Verhältnisse im Bereich der Amputationswunde.

Portland Zemente (PZ) mit einem Zusatz von Bismutoxid werden als MTA bezeichnet und seit 1993 mit großem Erfolg in der Endodontie angewendet. MTA sorgt für einen bakteriendichten Verschluss der Wurzelpulpa und induziert eine Hartgewebsneubildung. Es weist eine höhere mechanische Stabilität als Kalziumhydroxid auf (Heinrich-Weltzien und Kühnisch, 2007). Seit 1999 werden MTA-Materialien auch wirksam in der Kinderzahnheilkunde als Medikament zur Deckung von Pulpaamputationswunden eingesetzt (Joffe, 2002). Liu et al. ermittelten, dass MTA höhere Erfolgsraten in der Pulpotomie erzielt als Kalziumhydroxid (Liu et al., 2011). Interne Resorption ist die häufigste

Ursache, die mit dem Versagen von Kalziumhydroxid in Verbindung gebracht wird (Ranly, 2000; Sönmez und Durutürk, 2008).

Ursprünglich wurde MTA als graues Material in den Markt eingeführt. Um den damit verbundenen ästhetischen Einschränkungen zu begegnen, entwickelte man eine weiße Farbvariante (Naik und Hedge, 2005; Roberts et al., 2008). Weißes MTA enthält gegenüber grauem in seiner Zusammensetzung weniger Aluminiumtrioxid, Magnesiumoxid und vor allem weniger Eisenoxid (Asgary et al., 2005; Camilleri et al., 2005). Aufgrund des hohen Preises ist MTA jedoch nur bedingt für die Milchzahnendodontie einsetzbar (Steffen und van Waes, 2009).

Neuere Mittel, die als Wundverband verwendet werden können, sind Biodentine™ und Medcem MTA®. Biodentine™, ein bioaktiver Kalzium-Silikat-Zement, dient einerseits als Dentinersatz, andererseits der Vitalerhaltung der Pulpa bzw. zur Anregung der Hartgewebsneubildung (Zanini et al., 2012). Es wird aus einem Pulver, welches hauptsächlich aus Tri- und Dikalziumsilikat sowie aus Kalziumkarbonat besteht, und einer Flüssigkeit angemischt. Diese setzt sich aus einer wässrigen Kalziumchlorid-Lösung mit einem modifizierten Polykarboxylat zusammen (Laurent et al., 2012). Erste Studien belegen eine gute Wirksamkeit als Pulpotomie-Medikament (Niranjani et al., 2015; Cuadros-Fernández et al., 2016).

Medcem MTA® ist ein MTA der zweiten Generation. Das Röntgenkontrastmittel Bismutoxid wurde durch das farbstabile und reaktionsneutrale Zirkonium ersetzt. Klinischer Einsatz, Verarbeitung und Abbindeverhalten der MTA erster und zweiter Generation sowie des medizinischen Portlandzements sind identisch (Steffen, 2017). Medcem MTA® stellt dabei eine wesentlich kostengünstigere Alternative zum klassischen MTA dar. Armas Serret et al. verwendeten Medcem erfolgreich in einer klinischen Untersuchung als Wundverband (Armas Serret et al., 2015). Insgesamt ist die Studienlage bezüglich der biologischen Eigenschaften jedoch noch unzureichend.

Die in der Vergangenheit eingesetzte Formokresol-Lösung führte zwar zu hohen Erfolgsraten, allerdings zeigte sich, dass der enthaltende Formaldehyd zytotoxisch, mutagen, karzinogen und allergisierend wirkt (Wu et al., 1989; IARC, 2006).

Grundsätzlich werden die klinisch-röntgenologischen Erfolgsraten für die Vitalamputation mit ca. 80 % bis 90 % nach einer Beobachtungszeit von zwei Jahren angegeben (Huth et al., 2005; Kühnisch et al., 2012).

Entscheidend für eine erfolgreiche Pulpotomie sind dabei eine kurze Blutungsdauer, eine dichte koronale Restauration und regelmäßige Röntgenkontrollaufnahmen (Waterhouse et al., 2000).

1.3.4 Temporäre Maßnahmen

Die alleinige Trepanation von Milchzähnen sowie ihr Belassen sind lediglich kurzzeitige Kompromisslösungen. Das Belassen unbehandelter kariöser und avitaler Dentis decidui birgt die Gefahr der Exazerbation, der rezidivierenden Abszedierungen und von Strukturanomalien in den bleibenden Zähnen (DGZMK, 2002).

1.4 Pulpektomie

Wird durch klinische und röntgenologische Untersuchung eine komplette Infektion der Pulpa festgestellt, ist eine Pulpektomie zum Zahnerhalt indiziert (DGKiZ, 2012). Milchzähne, insbesondere die Molaren, sollten bis zu ihrem physiologischen Ausfall erhalten werden, um Kaufunktion, Phonetik, Ästhetik und eine normale Gebissentwicklung zu sichern (DGZMK, 2002; Heinrich-Weltzien und Kühnisch, 2007). Jedoch gibt es Faktoren, die gegen eine Wurzelkanalbehandlung sprechen. Sind mehr als 1/3 der Wurzellänge resorbiert, liegen interradiäre Entzündungsprozesse vor oder sind ausgedehnte interne Resorptionen aufgetreten, sollte eine Extraktion vorgezogen werden (Heinrich-Weltzien und Kühnisch, 2007). Auch Lockerungsgrade bzw. baldige Exfoliation stellen Kontraindikationen dar, genau wie mangelnde Kooperationsbereitschaft des Kindes und der Eltern (Einwag et al., 2002; BSPD, 2006; Hülsmann, 2008; Klimm, 2011).

Ist eine Pulpektomie angezeigt, wird unter trockenem Arbeitsfeld nach vollständiger Kariesentfernung das Pulpdach abgetragen, um die Wurzelkanäle darzustellen. Die Bestimmung der Arbeitslänge erfolgt mittels Röntgenmessaufnahme oder Endometrie, Sicherheit bietet die Anwendung beider Messmethoden (DGKiZ, 2012). Die Wurzelkanäle werden gereinigt und mit 1 %igem Natriumhypochlorit oder Chlorhexidin gespült (AAPD, 2016). Je nach Zustand der Pulpa wird entweder eine Zwischeneinlage mit Kalziumhydroxid vorgenommen oder die Wurzel direkt gefüllt (Einwag et al., 2002; BSPD, 2006; Klimm, 2011). Das Füllmaterial sollte dabei resorbierbar, biokompatibel und röntgenopak sein. Die Resorption der Milchzahnwurzel darf nicht behindert werden, Zinkoxid-Eugenol-Pasten, Kalziumhydroxid-Suspensionen und Kalziumhydroxid-Jodoformpasten haben sich bewährt (Kubota et al., 1992; AAPD, 2016). Der Zahn wird anschließend dicht koronal verschlossen und die Qualität der Wurzelfüllung mittels eines Röntgenbildes geprüft (DGKiZ, 2012).

Die klinisch-röntgenologischen Erfolgsraten der Wurzelkanalbehandlung fluktuieren zwischen 31 % und 96 % (Ng et al., 2007; Howley et al., 2012; Shenkin, 2012). Der umfangreiche und sensitive klinische Arbeitsablauf sowie die oftmals mangelnde Kooperationsfähigkeit kindlicher Patienten schränken die Indikation und Prognose des

Verfahrens ein (Ng et al., 2008). Ng et al. kamen zu dem Ergebnis, dass drei Faktoren den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung besonders beeinflussen:

- eine apikale Aufhellung, im Röntgenbild präoperativ
- eine dichte Wurzelfüllung, die sich bis 2 mm zum röntgenologischen Apex erstreckt und
- ein suffizienter koronaler Verschluss (Ng et al., 2007).

In den folgenden Kapiteln soll der Ablauf der Pulpektomie erörtert werden.

1.5 Aufbereitungsmethoden

Ziel

Die Aufbereitung des Wurzelkanals, ob maschinell oder manuell, schafft zunächst einen Zugang für antibakterielle Materialien und Wurzelfüllmittel zum Wurzelkanalsystem. Die Instrumente sollten in den Apikalbereich eingebracht werden ohne die Durchgängigkeit des Kanals zu beeinträchtigen. Eine alleinige mechanische Aufbereitung reicht jedoch nicht aus, um den mikrobiellen Biofilm vollständig zu entfernen (Stock et al., 2005; AAPD, 2016).

1.5.1 Längenbestimmung der Wurzelkanäle

Zur vollständigen und korrekten Aufbereitung der Wurzelkanäle muss der Behandler die Länge der Kanäle bestimmen, um die Arbeitslänge zu ermitteln. Dazu stehen ihm verschiedene Methoden zur Verfügung (DGKiZ, 2012).

Bei der Röntgenmessaufnahme wird eine Feile mit reproduzierbarem Referenzpunkt in den Wurzelkanal eingebracht. Mit Hilfe folgender Gleichung kann die tatsächliche Länge des Zahnes bestimmt werden:

$$L_Z = L_{\text{Ins}} \cdot L_{\text{röZ}} / L_{\text{röF}}$$

Länge des Zahnes L_Z ergibt sich aus Instrumentenlänge L_{Ins} multipliziert mit röntgenologischer Länge des Zahnes $L_{\text{röZ}}$ dividiert durch die röntgenologische Länge der Feile $L_{\text{röF}}$.

Die Arbeitslänge beträgt dann Länge des Zahnes L_Z minus 1 mm (Weber, 2017).

Weitere Ansätze zur Längenbestimmung sehen die Aufbereitung bis 2 mm vor röntgenologischem Apex (BSPD, 2006; Kühnisch et al., 2012) beziehungsweise nur bis auf 2/3 der Wurzellänge vor, um eine Überinstrumentierung zu vermeiden (Hülsmann, 2008).

Bei der Endometrie der Kanallänge wird der elektrische Widerstand zwischen dem

Wurzelkanal und der Mundschleimhaut gemessen. Dieser fällt bei Erreichen der Wurzelspitze schlagartig ab, was dem Behandler optisch und / oder akustisch aufgezeigt wird (ElAyouti und Löst, 2012). Studien zeigen, dass in 85 % bis über 95 % der Messungen der vom jeweiligen Gerät angegebene Endpunkt maximal 0,5 mm von der apikalen Konstriktion entfernt liegt (Gordon und Chandler, 2004).

Die apikale Konstriktion kann auch taktil ermittelt werden, wovon allerdings abzuraten ist, da nicht alle Zähne über eine derartige Verengung verfügen. Desweiteren muss die engste Stelle des Wurzelkanals an der Wurzelspitze liegen. Diese Voraussetzung ist selten erfüllt und führt zu Fehlern bei der Behandlung (Stock et al., 2005).

Bewährt hat sich die Kombination verschiedener Methoden. Die Länge des Wurzelkanals wird zunächst taktil geschätzt, danach durch Endometrie bestimmt. Die ermittelte Arbeitslänge kann dann anhand eines Röntgenbilds überprüft werden. So sichert der Behandler eine größtmögliche Genauigkeit der bestimmten Arbeitslänge ab (ElAyouti und Löst, 2012).

1.5.2 Manuelle Aufbereitung

Die manuelle Aufbereitung erfolgt mit Hilfe endodontischer Handinstrumente, welche nach ihrem Herstellungsmodus unterschieden werden. K-Typ-Instrumente sind aus Stählen mit Dreikant- oder Vierkantprofil gedreht. Je nach Anzahl der Spiralwindungen entsteht eine Feile oder ein Reamer (DGZMK, 2000).

H-Typ-Instrumente werden aus Rundstählen gefräst. Dabei sind die Schneiden nicht von der Masse des Metalls gestützt, die Frakturresistenz des Instrumentes ist abhängig von der Stärke des verbleibenden Metallkerns (Weber, 2017).

Der Aufbau der Handinstrumente richtet sich nach den Vorgaben der ISO 3630. Die Gesamtlänge beträgt 21 mm, 25 mm, 28 mm oder 31 mm, wobei der schneidfähige Bereich immer 16 mm lang ist. Ein spezielles Farbsystem erlaubt die visuelle Erkennung der entsprechenden Durchmesser am Griff (Weber, 2017). Die Auswahl der Instrumente ist abhängig von der Aufbereitungstechnik, Form und Krümmung der Wurzel und letztlich den Vorlieben des Behandlers (Muselmani et al., 2008).

In der Praxis haben sich verschiedene Techniken im Bereich der manuellen Aufbereitung entwickelt, nachfolgend sollen 3 Methoden beispielhaft dargestellt werden.

Bei der Step-Back-Technik wird zunächst die Aufbereitung des Kanals um die angestrebte ISO-Größe auf Arbeitslänge vorgenommen. Anschließend erfolgt die koronale Erweiterung des Kanals, indem alle folgenden Instrumente mit jeweils um einen Millimeter reduzierter Arbeitslänge eingesetzt werden (Hülsmann, 2008).

Nach der Erweiterung des koronalen und mittleren Kanalteils mit dünnen Handinstrumenten wird bei der Step-Down-Technik bis zum Beginn der Kanalkrümmung mit Gates-Glidden-Bohrern aufbereitet. Anschließend erfolgt die Instrumentation auf volle Arbeitslänge (Weber, 2017).

Die Crown-Down-Pressureless-Technik kennzeichnet die Instrumentierung mit kleinen Feilen bis in das apikale Kanaldrittel. Eine Feile der ISO-Größe 35 wird möglichst tief in den Kanal eingebracht und zwei Mal vollständig ohne apikalen Druck gedreht. Anschließend wird mit kleineren Feilen in Millimeterintervallen bis zur Arbeitslänge aufbereitet (Hülsmann, 2008).

Unabhängig von der eingesetzten Technik erhöht sich mit zunehmender Kanalkrümmung und abnehmendem Krümmungsradius die Schwierigkeit, einen Wurzelkanal formgerecht und gleichzeitig weitestgehend frei von Gewebsresten zu erweitern (Schäfer und Zapke, 2000). Bei sehr stark gekrümmten Kanälen kann es unter Umständen nicht möglich sein, diese manuell vollständig zu instrumentieren (DGZMK, 2000).

Im Gegensatz zum bleibenden Zahn spielt die mechanische Kanalreinigung gegenüber der Desinfektion durch Spüllösungen im Milchgebiss aufgrund der grazilen Anatomie der Wurzeln besonders im apikalen Bereich eine untergeordnete Rolle (Kühnisch et al., 2012).

1.5.3 Maschinelle Aufbereitung

Die Entwicklung der maschinellen Aufbereitung mit Nickel-Titan-Systemen erleichtert dem Behandler das sehr mühsame und zeitaufwendige Verfahren der händischen Wurzelkanalaufbereitung (Muselmani et al., 2008).

Es handelt sich dabei um Feilen, die auch bei ausgeprägter Verformung rückstellbar und elastisch reagieren. Somit kann die Kanalkrümmung erhalten bleiben (Hülsmann, 2008). Dennoch weisen solche Instrumente im Vergleich zu Handinstrumenten ein größeres Frakturrisiko auf und sollten je nach mechanischer Belastung nach wenigen Einsätzen aussortiert werden (DGZMK, 2000). Ursächlich dafür ist, dass die Rotation des Instruments, kombiniert mit lateraler Auslenkung, zu Biegebeanspruchung, lokaler Härtung und Materialermüdung führt. Verklemmt sich ein Instrument im Kanal und kann sich der koronale Feilenteil noch bewegen, kommt es bei Torsionsüberlast zur Instrumentenfraktur (Weber, 2017).

Der Markt bietet eine große Vielfalt von Systemen, wobei hier das zur Anwendung gekommene Hero 642 detailliert betrachtet werden soll.

Hero ist Synonym für high elasticity in rotation. Zur Verfügung stehen 12 Feilen in unterschiedlicher Größe und Konizität, die je nach Krümmungsgrad des Wurzelkanals in

verschiedener Sequenz eingesetzt werden. Mittels Crown-Down-Technik wird der Wurzelkanal aufbereitet, wobei die passive Instrumentenspitze nicht mit der Kanalwand in Kontakt tritt (Hülsmann, 2008). Nach Bestimmung des Krümmungswinkels wählt der Behandler die entsprechend farblich markierten Feilen aus. Bei einem geraden Kanal wird mit einer Hero 0.6 ISO 30 Feile begonnen und der Kanal auf 2/3 der Arbeitslänge erweitert. Darauf folgt eine Hero 0.4 ISO 30 Feile auf Arbeitslänge minus 2 mm. Mit der Feile Hero 0.2 ISO 30 wird abschließend auf Arbeitslänge aufbereitet. Die Anzahl der Feilen steigert sich bei einem Krümmungswinkel von 5° bis 25° auf 5 Instrumente und über 25° auf 6 Instrumente (Shade, 2000; Klimm, 2011).

Garip und Gençoğlu untersuchten die Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle durch ProFile, GT File und Hero 642. Sie konnten dabei keinen signifikanten Unterschied zwischen den genannten Systemen feststellen (Garip und Gençoğlu, 2006).

Die neueste Generation von Feilen basiert auf der Balance-Forced-Technik, einer reziproken Bewegung, bei der nach einer Rotation im Uhrzeigersinn eine Bewegung gegen den Uhrzeigersinn erfolgt, um das Instrument zu entlasten (Roane et al., 1985). Studien haben gezeigt, dass die Feilen so widerstandsfähiger gegen Ermüdungsfrakturen sind (Gavini et al., 2012; Kim et al., 2012). Verbunden mit der verringerten Aufbereitungszeit ergibt sich dadurch auch für ungeübte Behandler eine Erleichterung des Arbeitsalltages (Bürklein et al., 2014).

Die maschinelle Aufbereitung von Milchzähnen hat im Praxisalltag kaum Einzug gehalten, es liegen wenige Studien vor. Diese erreichten allerdings Erfolgsraten von 95 % (Kuo et al., 2006). Crespo et al. verglichen die manuelle mit der maschinellen Aufbereitung im Milchgebiss und kamen zu dem Ergebnis, dass der maschinellen Aufbereitung der Vorzug zu geben ist, da diese eine deutliche Zeitersparnis bedeutet und eine konische Gestaltung des Wurzelkanals ermöglicht. Gegen die maschinelle Aufbereitung sprechen die im Vergleich hohen Kosten (Crespo et al., 2008).

1.6 Wurzelkanalspülung

Ziel

Die chemische Wurzelkanalaufbereitung dient dem Abtransport von Dentinspänen und der Verhinderung einer Blockade des Wurzelkanals. Sie wirkt antibakteriell und sorgt besonders in den Seitenkanälen für die Auflösung organischen und anorganischen Kanalinhalt (DGZMK, 2006). Die Zerstörung des Biofilms und die Neutralisation der Bakterientoxine gehören weiterhin zu ihren Aufgaben. Zusätzlich unterstützt die Spüllösung die Gleitfähigkeit der Instrumente (Hecker et al., 2007).

Voraussetzung für die chemische Wurzelkanalaufbereitung ist eine gute Gewebeerträglichkeit sowie eine ausreichende Aufbereitung. Die dünnen Spülkanülen sind möglichst tief in die Wurzelkanäle einzubringen, da die Wirkung der Spülung nur wenige Millimeter über die Nadelspitze hinaus reicht. Je stärker die Kontamination des Kanals ist, umso häufiger muss langsam und drucklos gespült werden (Stock et al., 2005; DGZMK, 2006).

1.6.1 Spülmittel

Natriumhypochlorit (NaOCl) gehört zu den gebräuchlichsten Spüllösungen (Whitten et al., 1996). Es löst vitales und avitales Gewebe auf, hat einen sehr guten antibakteriellen Effekt und wirkt zytotoxisch (Klimm, 2011). Die gewebssauflösende Wirkung steigt in Abhängigkeit von der Menge, der Applikationsdauer, der Konzentration und der Temperatur der Lösung (DGZMK, 2006). Natriumhypochlorit ist von allen Spülmaterialien am besten in der Lage, einen Biofilm zu zerstören (Hecker et al., 2007). Anwendung findet es in Konzentrationen von 0,5 % bis 5,25 % (DGZMK, 2006; Klimm, 2011). Jedoch muss berücksichtigt werden, dass Natriumhypochlorit im periapikalen Gewebe Nekrosen, Emphyseme mit einschließenden starken Schmerzen sowie Parästhesien auslösen kann (Hecker et al., 2007). Aufgrund seiner guten Wirksamkeit wird auch bei der Wurzelkanalbehandlung von Milchzähnen das Spülen mit NaOCl empfohlen (BSPD, 2006; AAPD, 2016).

Chlorhexidin, nur gering toxisch, zeigt eine antibakterielle Wirkung gegen ein breites Spektrum von Mikroorganismen wie *E. faecalis* und Pilze, weshalb es häufig bei Revisionen zum Einsatz kommt (DGZMK, 2006). In Konzentrationen zwischen 0,2 % bis 2,0 % angewendet, hat Chlorhexidin die Fähigkeit sich an Hydroxylapatit zu binden. Somit bleibt die Wirkung im Kanalsystem über einen längeren Zeitraum erhalten (Hauman und Love, 2003). Allerdings führt es nicht zur Gewebssauflösung und hat keine neutralisierende Wirkung gegen Endotoxine (Hülsmann, 2008).

EDTA ist ein Chelator, welcher Kanalwanddentin erweichen und demineralisieren kann. Er verfügt über eine geringe antibakterielle Wirkung und kann die Schmierschicht entfernen, weshalb er oft als Gleitmittel (Glyde) für die Wurzelkanalinstrumente eingesetzt wird (DGZMK, 2006; Klimm, 2011). EDTA sollte nicht im Wechsel mit Natriumhypochlorit angewendet werden, da hierdurch Hypochlorit inaktiviert wird (Grawehr et al., 2003).

Das in früheren Zeiten zum Einsatz gekommene Wasserstoffperoxid wird heute nicht mehr angewandt, da sowohl antibakterielle Wirkung als auch Gewebsslöslichkeit gegenüber NaOCl wesentlich geringer sind (Hecker et al., 2007; Hülsmann, 2008). Auch

die Wechselfpülung mit NaOCl ist nicht zu empfehlen, da die antimikrobielle als auch die gewebsauflösende Wirkung durch gegenseitige Neutralisation stark reduziert wird (Harrison et al., 1978; The SD, 1979; DGZMK, 2006).

1.6.2 Ultraschall

Der Einsatz von Ultraschall kann die Reinigungswirkung der Spüllösungen signifikant verstärken, da durch die schwingende Feile feinste Strömungsphänomene in der Spülflüssigkeit erzeugt werden. Diese können besser als die Handspülung in instrumentell nicht erreichbare Areale vordringen (Hecker et al., 2007; van der Sluis et al., 2007). Um die Ultraschallenergie auf die Spüllösung zu übertragen, muss ein möglichst dünnes Instrument am besten ohne Wandkontakt im flüssigkeitsgefüllten Kanal schwingen. Bei Wandkontakt, der in gekrümmten oder engeren Kanälen kaum vermeidbar ist, nimmt die Schwingungsenergie massiv ab (Ahmad et al., 1992; Weber, 2017). Da gerade Milchzähne über enge und gekrümmte Kanäle verfügen und bis zum heutigen Zeitpunkt wenige Studien zur Anwendung von Ultraschall bei der Wurzelkanalbehandlung im Milchgebiss vorliegen, ist vom Gebrauch abzuraten (Canoglu et al., 2006).

1.7 Medikamentöse Einlage

Kann die endodontische Behandlung nicht in einer Sitzung abgeschlossen werden, wird eine medikamentöse Einlage in das Wurzelkanalsystem eingebracht und der Zahn bis zur nächsten Sitzung verschlossen. Ob ein „Single-visit“ - oder ein „Multiple-visit“ Konzept vorzuziehen ist, wird generell kontrovers diskutiert. In der Praxis entscheiden oft neben dem Infektionsgrad der Pulpa, die allgemeinen medizinischen Risiken, die individuelle Erfahrung des Behandlers, die Kooperationsbereitschaft des Patienten und die zur Verfügung stehende Zeit über das Vorgehen (Schwendicke, 2018).

1.7.1 Ziel und Indikation

Die medikamentöse Einlage dient der Reduktion der Keimzahl im Kanal und der Verhinderung der Rekontamination zwischen zwei Behandlungsterminen (Chong und Pitt Ford, 1992). Dabei ist eine medikamentöse Einlage bei Wurzelkanälen mit apikalem Exsudat indiziert (Weber, 2017).

Im Rahmen einer antiseptischen Behandlung von infizierten Kanälen sollten Wurzelkanalmedikamente unterdessen nur als ein Teil der Wurzelkanaldesinfektion verstanden werden (Dammaschke, 2008).

Für eine sinnvolle, effektive und sichere Anwendung muss ein Wurzelkanalmedikament eine Reihe von Anforderungen erfüllen. Entscheidend ist eine antibakterielle, entzündungshemmende Wirkung, Biokompatibilität, Diffusion in Dentintubuli, langanhaltende Wirksamkeit und leichte Applizierbarkeit (Dammaschke, 2008). Leider gibt es bisher kein Medikament, das all diese aufgeführten Anforderungen erfüllt (Doran und Radtke, 1998; Zehnder et al., 2003).

1.7.2 Kalziumhydroxid

Die Effektivität von Kalziumhydroxid resultiert hauptsächlich aus seiner antibakteriellen Wirkung, ohne dabei zytotoxisch zu sein. Es löst Weichgewebe im Wurzelkanal auf und stimuliert eine Hartgewebsbildung (Abbott, 1990). Durch die Freisetzung von Hydroxylionen entsteht ein hoher, alkalischer pH-Wert, bei dem die meisten Bakterien im Wurzelkanal nicht überleben können (Athassiadis et al., 2007). Pulpagewebe wird aufgelöst und Entzündungsreaktionen am Apex reduziert (Abbott, 1990; Athassiadis et al., 2007). Weitere Vorteile sind die Biokompatibilität und die Resorbierbarkeit (Haumann und Love, 2003; El Karim et al., 2007).

Das Kalziumhydroxid wird in pastöser Konsistenz angerührt und bis zur Arbeitslänge kompakt in den Kanal eingebracht. Der Zahn wird bakteriendicht verschlossen, wobei die Größe und Ausdehnung der Kavität sowie die mechanische Belastung und Liegedauer über die Wahl des Verschlussmaterials entscheiden. Bei großen Defekten hat sich die weitgehende Wiederherstellung des Zahns durch eine Aufbaufüllung aus Komposit bewährt. Bei einflächigen Kavitäten kann bei kurzer Liegedauer der Verschluss mit pastenförmigen Präparaten erfolgen (Weber, 2017). Für eine optimale Wirkung sollte Kalziumhydroxid mindestens eine Woche im Wurzelkanal verbleiben, da kürzere Zeitintervalle deutlich weniger effektiv sind (Doran und Radtke, 1998).

Bei Milchzähnen wird die Wurzelkanalbehandlung zwar oft in einer Sitzung abgeschlossen, treten jedoch Entzündungszeichen auf, sollte Kalziumhydroxid als medikamentöse Einlage verwendet werden (BSPD, 2006).

1.7.3 Antibiotikaeinlage

Takushige et al. führten zum Einsatz von Antibiotika eine klinische Studie mit 56 Kindern durch und befundeten insgesamt 87 Dentes decedui mit infiziertem Kanalsystem. Dabei zeigten 81 Zähne eine physiologische Wurzelresorption in unterschiedlichem Maße, teilweise traten Gingivaschwellungen und Fistelbildungen auf.

Die Milchzähne wurden trepaniert und ein Zugang zu den Kanaleingängen geschaffen, um das Einbringen eines Salben-Mix aus Ciproxan, Trichocide und Minomycin zu ermöglichen. Anschließend wurden die Zähne dicht verschlossen. In allen 87 Fällen verschwanden die klinischen Symptome nach der Behandlung, wobei die Prozedur bei 4 Zähnen wiederholt werden musste (Takushige et al., 2004).

Die hohe Erfolgsrate konnte auch in anderen Studien (Prabhakar et al., 2008; Pinky et al., 2011) bestätigt werden. Hingegen ist generell bei der Gabe von Antibiotika, egal ob systemisch oder lokal, besondere Vorsicht geboten. Obwohl die Menge der applizierten Medikamente klein ist, sollten mögliche Allergien oder Unverträglichkeiten des Patienten vor der Behandlung bekannt sein.

1.8 Wurzelkanalfüllung

Ziel

Nach abgeschlossener Präparation und Desinfektion aller Kanäle müssen diese dicht verschlossen werden, um eine Rekolonisierung des Endodonts von koronal zu verhindern und die Abriegelung der verbliebenen Mikroorganismen vom apikalen Parodont und von möglichen Nahrungsquellen zur Heilung der Parodontitis apicalis zu erreichen (ESE, 2006; Hülsmann, 2008).

Mit der Wurzelkanalfüllung kann begonnen werden, wenn der Patient schmerzfrei, der Zahn nicht perkussionsempfindlich und keine Schwellung oder ein Fistelgang vorhanden ist (Weber, 2017).

1.8.1 Materialien

Im bleibenden Gebiss ist Guttapercha in Kombination mit einem Sealer das Mittel der Wahl (Connert et al., 2016). Guttapercha ist biokompatibel, nicht resorbierbar, dimensionsstabil und röntgenopak. Der aus 2 Komponenten bestehende erhärtende Sealer füllt die kleinen Unebenheiten zwischen Kanalwand und Guttapercha aus (Connert et al., 2016). Die Guttaperchaspitzen liegen in normierter und nichtnormierter Form vor. Als Standardtechnik gilt heute noch die laterale Kondensation, wobei sich auch weitere Techniken etabliert haben. Beispielhaft zu nennen sind hier die vertikale Kondensation, Thermafil, Zentralstifttechnik und das Guttaperchainjektionsverfahren (Savani et al., 2014; Connert et al., 2016).

Bei der Milchzahnendodontie ist Guttapercha als Füllmaterial kontraindiziert. Hier müssen resorbierbare, biokompatible Materialien zum Einsatz kommen, die ungefährlich für den Keim des bleibenden Zahnes und leicht zu applizieren sind (Einwag et al., 2002;

Butz, 2004; Klimm, 2011). Zur Verfügung stehen dabei Jodoformpasten, Zinkoxid-Eugenol oder Kalziumhydroxid-Jodoform-Mischpasten wie Vitapex (Butz, 2004). Diese Pasten werden mittels spezieller, durch den Hersteller mitgelieferter Applikationsspritzen oder durch ein Lentulo in den Wurzelkanal eingebracht (Butz, 2004).

Frühere Studien zeigen, dass aufgrund ihrer schnellen Resorption reine Jodoformpasten abzulehnen sind (Bekes, 2018).

Wurzelkanalfüllpasten auf Zinkoxid-Eugenol-Basis sind als Zweikomponenten-Präparate verfügbar, die nach Vermischen von Pulver und Flüssigkeit durch Bildung eines Zinkeugenolates erhärten. Dieser Zement ist hydrolytisch instabil, lässt sich aber gut an Kavitätenwände adaptieren (Wilson et al., 1973). Im periradikulären Gewebe tritt teilweise Resorption und bindegewebige Abkapselung auf. Bei massiver Überfüllung des Materials kann es zu einer negativen Beeinflussung des Heilungsverlaufs bis hin zu Nekrosen des Desmodonts oder des Knochens kommen (DGZMK, 1999; Heinrich-Weltzien und Kühnisch, 2007). Im Gegensatz dazu zeigen Kalziumhydroxid-Jodoform-Mischpasten eine gute Resorptionsfähigkeit sogar beim Überpressen des Materials über den Apex hinaus (Özalp et al., 2005).

Barcelos et al. verglichen Studien, um die Erfolgsraten unterschiedlicher Füllmaterialien gegenüberzustellen. Hinsichtlich der ausgewählten klinischen und röntgenologischen Kriterien lagen diese für Zinkoxid-Eugenol zwischen 85 % und 100 % und für Vitapex zwischen 89 % und 100 % (Barcelos et al., 2011).

1.8.2 Erfolg und Misserfolg

Der Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung wird durch klinische und röntgenologische Parameter definiert.

Das Anfertigen von Röntgenbildern stellt eine Grundvoraussetzung für die Wurzelkanalbehandlung dar. In Studien für Wurzelkanalbehandlungen bei Kindern wird oft im Abstand von einem, drei, sechs und zwölf Monaten geröntgt (Pinto et al., 2011), im Praxisalltag entscheidet auch die Kooperationsbereitschaft der Eltern und des Kindes über die Häufigkeit des Röntgens, die wegen der Strahlenbelastung selbstverständlich auf das notwendige Minimum zu begrenzen ist. Die AAPD empfiehlt bei Kindern mit hohem Kariesrisiko Röntgenkontrollaufnahmen im Abstand von 6 Monaten (AAPD, 2011).

Das Röntgenbild sollte direkt nach Abfüllen des Kanals eine randständige, dichte, homogene und bis zum Apex reichende Wurzelfüllung zeigen (ESE, 2006). Ein durchgehender PA-Spalt und eine deutliche Verkleinerung der vorhandenen Aufhellung müssen auf späteren Kontrollbildern sichtbar sein.

Beim beschwerdefreien Patienten dürfen intraoral keine Schwellung oder Fistel auftreten (Ng et al., 2011).

Klagt der Patient hingegen über Beschwerden, ist eine Schwellung oder Fistel vorhanden, zeigt sich auf einem Kontrollröntgenbild, dass sich die periapikale Läsion vergrößert hat oder unverändert ist, so muss die vorangegangene Wurzelkanalbehandlung als misslungen angesehen werden (ESE, 2006; Hülsmann, 2008). Mögliche Ursache ist hierbei eine noch bestehende Infektion im Wurzelkanalsystem, hervorgerufen durch Fehlen eines Kofferdams, unzureichendes Spülen oder Vorhandensein resistenter Keime. Weiterhin führt eine insuffiziente postendodontische Versorgung zur Reinfektion des Wurzelkanalsystems. Frakturierte Instrumente, die im Kanal verbleiben, Perforationen oder Wurzelfrakturen lösen ebenso einen endodontischen Misserfolg aus (ESE, 2006; Ng et al., 2011).

1.9 Postendodontische Restauration

Die postendodontische Restauration des Zahnes nach abgeschlossener Wurzelkanalbehandlung sorgt für die Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des Zahnes und verhindert die Rekontamination des Wurzelkanalsystems (Hülsmann, 2008).

1.9.1 Füllungsmaterialien für das Milchgebiss

Für das Milchgebiss stehen verschiedene Werkstoffe zur Verfügung. Wichtig ist, dass es zu einem bakteriendichten Abschluss kommt. Dies kann mit adhäsiven Füllmaterialien oder konfektionierten Kronen erreicht werden (AAPD, 2016; DGKiZ, 2012).

Die zu den adhäsiven Füllmaterialien gehörenden Kompomere sind polyalkensäuremodifizierte Komposite, die eine Hybridstufe zwischen Glasionomern und Kompositen einnehmen, jedoch in Wirklichkeit den Kompositen näher stehen (Krämer und Frankenberger, 2009). Zunächst erfolgt eine Photopolymerisation mit anschließender Wasseraufnahme bei einer Säure-Base-Reaktion. Dabei tritt eine ähnliche Druck-, Zug- und Biegefestigkeit auf wie bei Kompositen. Allerdings expandieren Kompomere und zeigen ein schlechtes Abrasionsverhalten (Hickel und Manhart, 2001). Sie sind deshalb hauptsächlich für Klasse I-Kavitäten geeignet und nicht als postendodontischer Aufbau einsetzbar (AAPD, 2016).

Komposite müssen unter trockenem Arbeitsfeld gelegt werden, was eine ausreichende Kooperation des Kindes voraussetzt. Unter Beachtung der Polymerisationsschrumpfung und des konsequenten Einhaltens der Herstellerangaben sind gute Ergebnisse zu erzielen (Attin et al., 2001).

Kann der Substanzverlust der Milchzahnkrone nur unzureichend mit einem Füllungs-material versorgt werden, was bei einer endodontischen Behandlung meist aufgrund der großen kariösen Defekte der Fall ist, so finden konfektionierte Kronen Anwendung (Krämer und Frankenberger, 2011).

Pedo-Form-Stripkronen sind vorgefertigte Kunststoffkronen für das Frontzahnggebiet, die als Matrize für Kompositfüllungen dienen. Lediglich die Approximalfäche und die Inzisalkante sollten dabei um etwa einen Millimeter beschliffen werden. Bei endodon-tisch behandelten Zähnen kann zusätzlich Retention durch Präparation von Unter-schnitten im ehemaligen Pulpenkavum geschaffen werden (Einwag et al., 2002; We-ber, 2017).

Im Seitenzahnggebiet werden Stahlkronen aus einer Nickel-Chrom-Legierung einge-setzt. Sie besitzen einen elastischen Federrand und stehen in je 6 Größen für die 8 Milchmolaren zur Verfügung. Die Präparation erfolgt stufenlos unter Belassen der ba-salen Schmelzwulst, so dass ein Einschnappen der Krone möglich ist. Die Approxi-malfächen werden separiert und okklusal wird um etwa 1 bis 1,5 mm eingekürzt. Das Einsetzen der Krone erfolgt mittels Zement (Salomon, 2009; Lauenstein und Sieper, 2015).

Seit 2012 finden auch Vollzirkonkronen in der Kinderzahnheilkunde Anwendung. Diese verfügen zwar über eine exzellente Ästhetik, können allerdings durch die hohe Materi-alhärte nicht individualisiert werden (Lauenstein und Sieper, 2015). Abdulhadi et. al. erzielten in ihrer klinischen Studie für Zirkonoxidkronen ebenso gute Ergebnisse wie für Stahlkronen (Abdulhadi et al., 2017). Bislang existieren jedoch nur wenige Untersu-chungen über den Einsatz von Vollzirkonkronen, so dass deren Nutzen noch in weite-ren Studien ermittelt werden muss (Ashima et al., 2014).

1.10 Untersuchung der Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung

Eine der wichtigsten und am häufigsten angewandten Methoden zur Überprüfung der Dichtigkeit einer Wurzelfüllung stellt bis heute die Penetrationstestung dar. Bei diesem Verfahren wird die Passage von verschiedenen Indikatoren entlang der Wurzelkanalfül-lung als Maß für deren Dichtigkeit beurteilt. Als Penetrationsindikatoren können Farb-stoffe, Radioisotope, Bakterien aber auch Flüssigkeiten verwendet werden.

1.10.1 Farbstoffpenetrationstest

Methylenblau ist bei den Farbstoffpenetrationsversuchen das Mittel der Wahl, da es durch sein geringes Molekulargewicht sehr gut penetrieren kann, gut sichtbar ist und

nicht mit der Wurzelfüllung reagiert (Ahlberg et al., 1995; Tamse et al., 1998). Die Eindringtiefe wird dabei als Indikator für die Dichtigkeit der Wurzelfüllung bestimmt (Barthel et al., 1994). Um die Farbstoffpenetration auswerten zu können, muss die Wurzelfüllung mittels verschiedener Methoden sichtbar gemacht werden. Bei den non-invasiven Methoden ermöglichen spezielle Entkalkungsverfahren die direkte Sicht auf die Wurzelkanalfüllung (Gilhooly et al., 2000). Serielle Schnitte längs und quer des Zahnes gehören zu den invasiven Methoden. Hierbei kann bei mikroskopischer Betrachtung der Längs- oder Querschnitte der Penetrationsgrad sowie die Penetrationstiefe der Farbstoffe beurteilt werden (Wu und Wesselink, 1993). Jedoch eignen sich Tests mit Farbstoffen lediglich für die Penetration von sehr kleinen Molekülen in den Kanal. Es können keine Aussagen über ein mögliches Microleakage von Bakterien vom Wurzelkanal in die periapikale Region getroffen werden (Susini et al., 2006)

1.10.2. Bakterienpenetrationstest

Während des Bakterienpenetrationstests wird der zu untersuchende Zahn in zwei Kammern platziert. Die Wurzelspitze taucht in der unteren Kammer in ein Nährmedium, der obere Teil des Zahnes ragt in die obere Kammer. Eine Bakterienlösung, oftmals bestehend aus *Streptococcus mutans* und *Klebsiella pneumoniae*, wird in die obere Kammer gegeben (Jakobson et al., 2002; Shipper et al., 2004). Bakterien, die entlang der Wurzelfüllung wandern, verursachen die Eintrübung des Nährmediums in der unteren Kammer. Die Zeitspanne vor der Eintrübung des Nährmediums steht somit im direkten Zusammenhang mit der Dichtigkeit der jeweils zugehörigen Wurzelkanalfüllung (Wu und Wesselink, 1993).

Penetrationsuntersuchungen mit Bakterien sind weniger verlässlich, da Bakterien größer als Farbstoffpartikel sind, deshalb schlechter penetrieren und entstehende Bakterientoxine bei endodontischen Untersuchungen zu Misserfolgsquoten führen (Wu et al., 1994).

1.10.3 Penetrationstest durch Flüssigkeitsfiltration

Bei Anwendung eines Penetrationstests durch Flüssigkeitsinfiltration wirkt auf die Öffnung des wurzelkanalgefüllten Zahnes eine Flüssigkeit (meist steriles Wasser) mit zusätzlichem Druck von koronal nach apikal. Die Lageveränderung einer im Flüssigkeitssystem befindlichen Luftblase wird abgelesen, wobei die Größe der Bewegung mit der Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung korreliert (Wu et al., 1993).

Die Vorteile der Flüssigkeitsfiltration liegen in der quantitativen Analyse, der Messung der gesamten Wurzelkanalfüllung, der Sensitivität der Methode und des Strukturerhalts der Zähne. Damit wird die Reproduzierbarkeit der Untersuchungen gewährleistet (Orucoglu et al., 2005). Allerdings sind Langzeitbeobachtungen nicht möglich und die Genauigkeit der quantitativen Beobachtung der Luftblase durch das bloße Auge muss hinterfragt werden (Shemesh et al., 2007).

1.10.4 Glukosepenetrationstest

Der Glukosepenetrationstest gilt als Weiterentwicklung der Flüssigkeitsfiltrationsmethode. Der zu untersuchende Zahn wird in ein aus zwei Kammern bestehendes Röhrchen verbracht, wobei der koronale Anteil in konzentrierte Glukoselösung ragt (Xu et al., 2005). Die Wurzelspitze des Zahnes befindet sich in der unteren, mit Flüssigkeit gefüllten Kammer. Glukose, die entlang der Wurzelfüllung penetriert, wird in dem unteren Gefäß aufgefangen und mit Hilfe eines enzymatischen Tests volumetrisch gemessen. Über das Konzentrationsniveau und die Konzentrationsänderung der aufgefangenen Glukose in einem bestimmten Zeitraum lassen sich nun Rückschlüsse auf das Abdichtungsverhalten der Wurzelfüllung ziehen (Xu et al., 2005). Dabei können kontinuierlich quantitative Messungen durchgeführt werden (Shemesh et al., 2006).

2. Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit sollte untersucht werden, ob die Dichtigkeit einer Wurzelkanalfüllung abhängig ist von dem eingesetzten Wurzelkanalfüllmaterial und der Krümmung der einzelnen Milchzahnwurzeln. Gleichzeitig sollte die Dichtigkeit über vier verschiedene Schnittebenen der jeweiligen Kanäle betrachtet werden. Verwendung als Wurzelkanalfüllmaterial fanden Vitapex (Neo Dental International, USA) und Zinkoxid-Eugenol (Speiko, Deutschland).

Folgende Hypothesen sollten dabei geprüft werden:

1. Es gibt keinen signifikanten Unterschied der Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung von mit Vitapex oder Zinkoxid-Eugenol gefüllten Zähnen.
2. Es bestehen keine signifikanten Unterschiede in der Wurzelkanaldichte zwischen den einzelnen Schnittebenen.
3. Es bestehen keine signifikanten Unterschiede der Qualität der Wurzelfüllung in den verschieden stark gekrümmten Wurzeln.

3. Material und Methode

3.1 Material

Im Folgenden werden die zur Versuchsdurchführung verwendeten Einsatzmaterialien beschrieben.

3.1.1 Milchzähne

Zur Untersuchung wurden ein- und mehrwurzlige extrahierte menschliche Milchzähne verwendet. Alle Zähne waren im koronalen Teil mit Karies unterschiedlicher Stadien infiziert, die jedoch in keinem Fall die Furkation erreicht hatte.

Die Zähne wurden nach der Extraktion und während der Untersuchung in 0,9 %iger physiologischer Kochsalzlösung bei Zimmertemperatur gelagert. Sie wiesen keine Resorption im Bereich des Apex auf und waren nicht endodontisch behandelt.

Zunächst erfolgte die Zuordnung jeder Milchzahnwurzel zu einem von drei Krümmungswinkeln (nach Schneider, 1971). Zur Bestimmung des Winkels wurde fiktiv aus der Längsachse des Wurzelkanals eine Gerade gebildet. Eine zweite Gerade verlief vom apikalen Foramen bis zu dem Punkt, an dem der Wurzelkanal die Längsachse des Zahnes verlässt. Der von beiden Geraden gebildete Schnittpunkt entsprach dem Scheitelpunkt des Winkels (Abbildung 2).

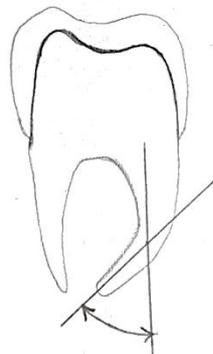


Abbildung 2 modifiziert nach Weber, 2017: Bestimmung des Krümmungswinkels der Milchzahnwurzel

Schneider unterteilte die Krümmungswinkel in 3 Kategorien:

1. Gerade G: 0° bis 5°
2. Mäßig M: 10° bis 20°
3. Stark S: 25° bis 70° (Klimm, 2011).

In der vorliegenden Studie wurden jeweils 30 Wurzeln vor Beginn der Bearbeitung jeder Kategorie zugeordnet.

3.1.2 Spüllösungen

Natriumhypochlorit NaOCl (Lege artis)

Natriumhypochlorit wirkt desinfizierend, gewebssauflösend (Andersen et al., 1992) und neutralisiert Lipopolysaccharide (Buttler und Crawford, 1982). Die Konzentration sollte zwischen 0,5 % und 5 % liegen.

Chlorhexidindigluconat CHX (GlaxoSmithKline)

CHX wirkt ebenfalls desinfizierend, jedoch nicht gewebssauflösend und neutralisiert keine Lipopolysaccharide. Es findet seine Anwendung oft bei Revisionen (*E.faecalis*) und darf nicht in direkten Kontakt mit NaOCl kommen, da hier rötlich-braunes Ausfällen auftreten kann (Emilson, 1977). Die Konzentration sollte zwischen 0,2 % und 2 % liegen.

3.1.3 Wurzelkanalfüllmaterialien

Vitapex (Neo Dental International)

Vitapex ist eine Kalziumhydroxidpaste versetzt mit Jodoform, die als provisorisches oder definitives Wurzelkanalfüllmittel nach einer Pulpektomie indiziert ist. Vitapex kann alleine (für provisorische Füllungen) oder zusammen mit Guttapercha (für definitive Füllungen) verwendet werden und eignet sich auch für die Behandlung von infizierten Wurzelkanälen und für Vitalamputationen an Milchzähnen (Neo Dental International Inc.). Vitapex wird gebrauchsfertig in einer Spritze mit auswechselbaren Applikationsspitzen geliefert und wirkt laut Herstellerangaben antibakteriell und bakteriostatisch. Die Pastenresorptionsgeschwindigkeit entspricht etwa der Milchzahnwurzelresorption (Neo Dental International Inc.).

Zinkoxid- Eugenol (Speiko)

Zinkoxid-Eugenol setzt sich zusammen aus einem Gemisch von Zinkoxidpulver und Eugenol. Zinkoxid ist eine chemische Verbindung aus Zink und Sauerstoff. Es liegt als lockeres, weißes Pulver vor. Eugenol ist ein flüssiges Phenylpropanoid und wirkt im direkten Zellkontakt zytotoxisch (DGZMK, 1999). Beide Komponenten werden zu einer festen Paste verrührt und liegen dann als Zinkoxid-Eugenol-Zement vor. Dieser wird sowohl als provisorisches Füllungsmaterial als auch für Wurzelfüllungen bei Milchzähnen verwendet, da er preiswert und international weit verbreitet ist. Im periradikulären Gewebe wird Zinkoxid-Eugenol teilweise resorbiert und bindegewebig abgekapselt (DGZMK, 1999).

3.1.4 Farbstofflösung

Methylenblau

Methylenblau ist ein Phenothizian-Derivat. Als reiner Farbstoff erscheint es als dunkelgrünes Pulver (Römpp, 1996). Es wurde als 2 %ige Methylenblaulösung auf Wasserbasis eingesetzt, um die Lufteinschlüsse in den einzelnen Schnittebenen unter dem Mikroskop sichtbar zu machen.

3.1.5 Instrumente und Hilfsmittel

Instrument	Hersteller	Ort
Rotes Winkelstück	Kavo	Deutschland
Grünes Winkelstück	Kavo	Deutschland
Rosenbohrer	Komet	Deutschland
Kugelförmiger Diamantbohrer	Komet	Deutschland
Hero Shaper 642 NiTi	Micro-Mega	Frankreich
Chlorhexidindigluconat	GlaxoSmithKline	Deutschland
Natriumhypochlorit	Lege artis	Deutschland
Natriumchlorid	B. Braun	Deutschland
Spülkanülen	Hager & Werken	Deutschland
Einmalspritzen	B. Braun	Deutschland
sterile Papierspitzen	Roeko	Deutschland
Vitapex	Neo Dental International	USA
Zinkoxid-Eugenol	Speiko	Deutschland
Heidemannspatel	Hu-Friedy	USA
Kugelstopfer	Hu-Friedy	USA
Ätzel	Voco	Deutschland
Bonding Excite	Ivoclar Vivadent	Deutschland
Tetric Ceram	Ivoclar Vivadent	Deutschland
UV-Lampe	Ivoclar Vivadent	Deutschland
Messlehre	B. Braun	Deutschland
diamantierte Scheibe	Komet	Deutschland
Nagellack	Manhattan Only	Luxemburg
Klebeband	Tesa AG	Deutschland
Wattepellet	Roeko	Deutschland

3.2 Methode

Einteilung der Wurzeln nach den 3 Krümmungswinkeln (nach Schneider, 1971)



Aufbereitung der Zähne mit Hero 642, Wechselspülung mit NaOCl und CHX, Wurzelfüllung mit Vitapex oder Zinkoxid-Eugenol, koronaler Verschluss mit dem Etch- and-Rinse Adhäsivsystem (Ivoclar Vivadent) und Tetric Ceram (Ivoclar Vivadent)



Vitapex-Set



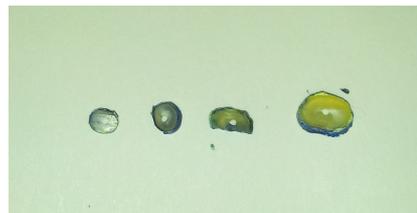
Tetric Ceram B3



Heidemannspatel, Kugelstopfer



Färbung der Zähne



Wurzelquerschnitte



Mikroskop (Zeiss STEMI 2000-C), Kamera (Canon Power Shot G5), Messprogramm (AxioVision AC)



Auswertung mit IBM SPSS Statistics 22.0

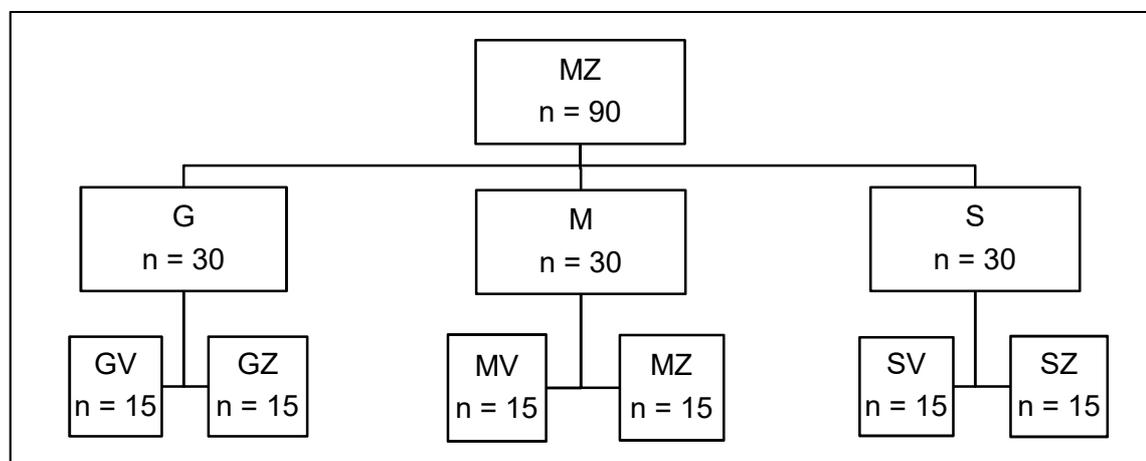
3.2.1 Bearbeitung der Versuchszähne

Die vorangegangene Bestimmung des Krümmungswinkels (KW) nach Schneider bei den die Studie umfassenden n=90 Milchzahnwurzeln (MZ) ordnete den einzelnen Kategorien

G=gerade (0° bis 5°), M=mäßig gekrümmt (10° bis 20°) und S=stark gekrümmt (25° bis 70°)

jeweils n=30 Zähne zu.

Die entstandenen Versuchsgruppen wurden hälftig geteilt, so dass je Krümmungswinkel n=15 Wurzeln mit Vitapex V und n=15 Wurzeln mit Zinkoxid-Eugenol-Zement Z zu füllen waren.



Alle Milchzähne wurden mittels eines roten Winkelstücks und eines kugelförmigen Diamantbohrers trepaniert, die vorhandene Karies mit grünem FG-Winkelstück und Rosenbohrer beseitigt. Nach der kompletten Pulpaentfernung erfolgte die maschinelle Aufbereitung der Zähne durch das Hero Shaper 642 System.

Das Sondieren mit einer Headströmfeile ermittelte die Arbeitslänge. War die Spitze der Feile am Foramen apicale zu sehen, so ergab sich aus der gemessenen Länge auf einer Messlehre minus 1 mm die Arbeitslänge. Zwischen den Arbeitsschritten lagerten die Zähne in isotoner Kochsalzlösung.

3.2.2 Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung mit Hero 642

Zur Anwendung für die maschinelle Aufbereitung kamen das Hero Shaper 642 System und der Endo-IT-Motor. Zunächst wurde jeder Gruppe ein Farbstreifen zugeordnet, wobei blau die gerade bis geringe, rot die mäßige und gelb die starke Krümmung kennzeichnete.

Pro Farbstreifen fanden NiTi-Feilen mit einer Konizität von 6 %, 4 % und 2 % zur Erweiterung des Wurzelkanals mittels Crown-Down Methode Verwendung.

Die Aufbereitung begann mit einer sich bei 300 bis 600 U/min vertikal bewegenden Feile der Konizität von 6 % auf 1/2 bis 2/3 der Arbeitslänge. Die Feile der Konizität 4 % wurde auf Arbeitslänge minus 2 mm angewendet, die der Konizität 2 % auf die volle Arbeitslänge. Zwischen den einzelnen Schritten erfolgte die Wechselspülung mit Natriumhypochlorit und Chlorhexidin, neutralisiert durch 0,9 %ige Kochsalzlösung. Die Aufbereitung beendete eine CHX-Spülung mit anschließender Trocknung der Kanäle durch Papierspitzen.

3.2.3 Wurzelkanalfüllung

Vitapex

Vitapex liegt gebrauchsfertig in einer Spritze vom Hersteller vor. Vom Apex aus gemessen ist diese ca. ein Fünftel der Wurzelkanallänge in den trockenen Kanal einzuführen. Nach und nach erfolgte die Applikation der Kalziumhydroxid-Jodoformpaste durch Betätigung des Kolbens mit gleichzeitigem Zurückziehen der Spritze. Ein Wattepellet entfernte nach Abfüllen des Kanals überschüssige Paste.

Zinkoxid-Eugenol

Zinkoxid-Eugenol wird als Zwei-Komponenten-System, Zinkoxid als weißliches Pulver, Eugenol als Flüssigkeit, geliefert. Beide Bestandteile müssen zu einer festen Paste verrührt werden. Um eine Methodengleichheit bei der Wurzelkanalfüllung sicherzustellen war dieselbe Spritze wie bei der Wurzelfüllung mit Vitapex zu verwenden. Nach gründlicher Reinigung dieser von Vitapex-Resten wurde die Zinkoxid-Eugenol-Paste in die Spritze eingebracht. Wie oben beschrieben erfolgte die Abfüllung der Milchzahnwurzeln und anschließend die Entfernung der Überschüsse.

3.2.4 Abschlussfüllung

Die Milchzähne wurden nun mit 34,9 %iger Phosphorsäure angeätzt (15 sec. Schmelz, 7 sec. Dentin), danach abgespült und das Adhäsiv Excite auf die leicht feuchte Oberfläche aufgetragen. Für die nach Herstellerangaben erforderliche Lichthärtung entfernte die Unispritze durch Verblasen Überschüsse. Die Polymerisation betrug für das mit Hilfe eines Heidemannspatels geschichtete Tetric Ceram (Hybridkomposit) jeweils 60 Sekunden.

3.2.5 Lagerung und Weiterverarbeitung der Milchzähne

Während der kompletten Bearbeitungszeit lagerten die Denten decedui in 0,9 %iger Kochsalzlösung. Zur Vorbereitung des Farbstoffpenetrationstests wurden die Zähne, unter Freilassung des Foramen apicale, komplett in zwei Schichten mit einem handelsüblichen Nagellack bestrichen. Somit war eine Penetration von Methyleneblau nur über das Foramen möglich. Die Proben ruhten anschließend für 3 Tage in einer 2 %igen Methyleneblaulösung bei 37°C im Inkubator.

3.2.6 Horizontalschnitte und Digitalisierung der Präparate

Die Milchzähne wurden horizontal vom Apex im Abstand von jeweils einen Millimeter unter Verwendung einer Messlehre per diamantierter Trennscheibe vier Mal geschnitten. Nach Fixierung der Schnitte auf handelsüblichem Klebeband konnte die einzelne Wurzelfüllung bei 1 mm, 2 mm, 3 mm und 4 mm betrachtet werden.

Die fertigen Präparate wurden über ein Mikroskop (Zeiss STEMI 2000-C) in der entsprechenden Reihenfolge von apikal mit Hilfe der Digitalkamera (Canon Power Shot G5) fotografiert und von der Speicherkarte (CompactFlash Card 8 GB hama) mittels Kartenlesegerät (Compact Universal Card Reader ICR 1000 venalisia) auf einen Laptop (Acer Aspire V5-573G) übertragen.

Die Software AxioVision AC ermöglichte die Vermessung der digitalisierten Präparate auf dem Laptop, um den prozentualen Anteil von Zinkoxid-Eugenol bzw. Vitapex und luftgefülltem Hohlraum in den unterschiedlichen Schnittebenen zu ermitteln.

3.2.7 Statistische Analyse

Das Programm IBM SPSS Statistics 22.0 fand zur statistischen Auswertung Anwendung.

Dabei wurden folgende Tests verwendet:

- Shapiro-Wilk-Test
- Kolmogorow-Smirnow-Test
- Mann-Whitney-Test
- Oneway ANOVA
- Post-hoc-Test nach Bonferroni und Scheffé
- Post-hoc-Test nach Tamhane2

4. Ergebnisse

Die Tabelle 1 stellt den ermittelten Füllungsgrad in Prozent der mit Vitapex V oder Zinkoxid-Eugenol Z behandelten Wurzelkanäle in den einzelnen Schnittebenen, jeweils kategorisiert nach Krümmungswinkel, dar.

Tabelle 1 Messwertetabellen Füllungsgrad

Versuchsgruppe G, Krümmungswinkel G (0° bis 5°)

Messwerte in Prozent

Wurzel	GV				GZ			
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
1	65,93	91,60	87,72	90,03	75,10	58,33	76,10	100,00
2	71,43	91,91	93,75	89,57	100,00	100,00	100,00	100,00
3	57,93	33,02	92,19	94,35	60,72	63,88	90,70	92,31
4	36,86	100,00	95,46	100,00	66,66	86,36	92,39	77,62
5	48,60	75,74	69,10	95,07	100,00	100,00	100,00	100,00
6	69,54	86,39	95,63	100,00	78,95	53,58	77,56	69,82
7	95,94	58,79	100,00	96,60	81,82	93,53	95,89	100,00
8	97,34	92,60	98,69	90,43	54,77	42,86	96,04	100,00
9	87,30	92,46	79,04	83,83	52,18	63,83	93,34	100,00
10	100,00	76,80	69,86	80,78	63,64	53,34	56,25	70,59
11	44,00	62,63	97,86	97,33	30,52	68,19	100,00	100,00
12	89,47	100,00	100,00	100,00	47,83	88,58	91,74	100,00
13	89,07	77,51	80,55	98,19	60,10	65,21	84,24	77,82
14	65,71	92,77	82,72	98,31	76,10	82,73	100,00	100,00
15	90,00	96,66	100,00	100,00	73,34	68,58	100,00	100,00

Versuchsgruppe M, Krümmungswinkel M (10° bis 20°)

Messwerte in Prozent

	MV				MZ			
Wurzel	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
1	93,27	77,95	94,32	97,13	62,73	83,77	94,52	98,16
2	92,09	91,72	93,43	95,22	67,22	84,06	99,79	99,86
3	91,46	93,19	85,15	74,74	97,47	96,91	97,96	98,05
4	86,94	95,34	96,43	98,41	66,67	86,00	91,43	99,43
5	94,26	98,55	87,94	94,09	78,57	50,42	73,06	94,37
6	75,41	97,75	98,33	98,48	60,01	68,75	56,25	65,00
7	43,27	94,12	96,75	99,42	63,64	55,24	76,93	64,71
8	28,57	48,95	94,76	98,13	75,00	76,19	89,48	94,64
9	85,72	97,46	98,02	99,65	94,02	87,50	93,19	94,88
10	61,91	64,29	93,75	84,73	64,29	64,29	70,00	43,48
11	28,57	87,50	81,81	96,46	82,15	75,00	63,98	63,86
12	75,00	97,77	98,43	99,77	64,00	92,67	99,45	99,42
13	85,72	87,77	91,20	84,52	86,29	79,38	75,00	78,95
14	88,24	94,25	99,28	89,48	62,50	96,52	97,45	98,38
15	72,72	66,35	85,44	85,72	62,50	75,76	73,34	94,23

Versuchsgruppe S, Krümmungswinkel S (25° bis 70°)

Messwerte in Prozent

	SV				SZ			
Wurzel	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
1	79,34	53,35	50,33	49,73	83,33	78,58	73,33	83,33
2	86,36	94,90	95,10	76,40	29,42	85,71	63,53	87,76
3	86,18	96,26	97,94	83,33	78,95	85,10	96,77	77,20
4	93,43	88,24	75,02	92,67	70,59	87,50	80,65	98,34
5	89,29	100,00	100,00	100,00	45,24	69,97	90,70	89,36
6	68,24	94,66	100,00	100,00	27,77	64,71	52,17	86,15
7	87,55	100,00	100,00	100,00	97,20	97,66	98,15	98,57
8	76,20	65,22	52,94	96,32	68,42	73,68	85,19	82,50
9	72,22	87,50	80,00	98,33	71,43	71,47	89,09	98,70
10	35,10	80,77	94,90	95,65	90,91	85,71	96,52	97,44
11	91,88	89,48	81,49	95,55	98,72	78,27	88,66	93,18
12	75,10	86,66	77,70	60,80	71,43	73,33	58,82	82,76
13	56,66	80,10	95,38	84,62	47,70	58,77	71,37	85,44
14	74,90	74,90	100,00	100,00	91,66	94,04	96,72	98,58
15	37,50	89,30	91,75	96,51	23,40	37,46	48,70	52,63

4.1 Deskriptive Statistik

Die Tabellen 2, 3 und 4 zeigen die deskriptive Statistik (Mittelwert, Minimum, Maximum, Standardabweichung) in Abhängigkeit vom Krümmungswinkel G, M und S. Anschließend wird das arithmetische Mittel jeder Versuchsgruppe dargestellt.

Tabelle 2 Deskriptive Auswertung des Krümmungswinkels G

Krümmungswinkel G (0° bis 5°)

Messwerte in Prozent

	n	Mittelwert	Minimum	Maximum	SD
V 1 mm	15	73,94	36,86	100,00	20,61
V 2 mm	15	81,93	33,02	100,00	18,53
V 3 mm	15	89,50	69,10	100,00	10,77
V 4 mm	15	94,30	80,78	100,00	6,12
	n	Mittelwert	Minimum	Maximum	SD
Z 1 mm	15	68,11	30,52	100,00	18,66
Z 2 mm	15	72,60	42,86	100,00	18,03
Z 3 mm	15	90,28	56,25	100,00	12,28
Z 4 mm	15	92,54	69,82	100,00	11,93

	n	Mittelwert	SD
GV	60	84,92	16,71
GZ	60	80,88	18,58

Bei den Milchzahnwurzeln mit dem Krümmungswinkel G ($\leq 5^\circ$) zeigte sich ein Minimum von 33,02 % bei 2 mm und ein Maximum von 100 % in allen Schnittebenen bei den mit Vitapex gefüllten Wurzeln, sowie ein Minimum von 30,52 % bei 1 mm und ein Maximum von 100 % in allen Schnittebenen bei den mit Zinkoxid-Eugenol gefüllten Wurzeln. Der Mittelwert der Füllung mit Vitapex lag mit 84,92 % über dem von Zinkoxid-Eugenol mit 80,88 %.

Tabelle 3 Deskriptive Auswertung des Krümmungswinkels M

Krümmungswinkel M (10° bis 20°)

Messwerte in Prozent

	n	Mittelwert	Minimum	Maximum	SD
V 1 mm	15	73,54	28,57	94,26	22,80
V 2 mm	15	86,20	48,95	98,55	15,05
V 3 mm	15	93,00	81,81	99,28	5,52
V 4 mm	15	93,06	74,74	99,77	7,52
	n	Mittelwert	Minimum	Maximum	SD
Z 1 mm	15	72,46	60,01	97,47	12,38
Z 2 mm	15	78,16	50,42	96,91	13,92
Z 3 mm	15	83,45	56,25	99,79	14,32
Z 4 mm	15	85,83	43,48	99,86	17,99

	n	Mittelwert	SD
MV	60	86,45	16,19
MZ	60	79,98	15,32

In der Versuchsgruppe Krümmungswinkel M (10° bis 20°) sank das Minimum bei Vitapex im Vergleich zu KW G auf 28,57 % in der Schnittebene 1 mm und das Maximum auf 99,77 % bei 4 mm. Dagegen verbesserte sich der Minimumwert von Zinkoxid-Eugenol auf 43,48 % bei 4 mm, das Maximum fiel nur etwas auf 99,86 % bei 4 mm. Im Mittelwert schnitt Vitapex mit 86,45 % jedoch besser ab als Zinkoxid-Eugenol mit 79,98 %.

Tabelle 4 Deskriptive Auswertung des Krümmungswinkels S

Krümmungswinkel S (25° bis 70°)

Messwerte in Prozent

	n	Mittelwert	Minimum	Maximum	SD
V 1 mm	15	74,00	35,10	93,43	18,19
V 2 mm	15	85,42	53,35	100,00	12,98
V 3 mm	15	86,17	50,33	100,00	16,52
V 4 mm	15	88,66	49,73	100,00	15,42
	n	Mittelwert	Minimum	Maximum	SD
Z 1 mm	15	66,41	23,40	98,72	25,71
Z 2 mm	15	76,13	37,46	97,66	15,09
Z 3 mm	15	79,35	48,70	98,15	17,01
Z 4 mm	15	87,46	52,63	98,70	11,99

	n	Mittelwert	SD
SV	60	83,56	16,66
SZ	60	77,33	19,27

Wurzeln, die dem Krümmungswinkel S (25° bis 70°) zugeordnet wurden, zeigten mit Vitapex ein Minimum von 35,10 % bei 1 mm und ein Maximum von 100 % bei 2 mm, 3 mm und 4 mm. Mit Zinkoxid-Eugenol wurden ein Minimum von 23,40 % und ein Maximum von 98,72 % jeweils bei einer Schnittebene von 1 mm gemessen. Die Behandlung mit Vitapex erreichte im Mittel einen Füllungsgrad von 83,56 % gegenüber Zinkoxid-Eugenol mit 77,33 %.

Vergleicht man alle Zähne unabhängig vom Krümmungswinkel stellte sich das Ergebnis wie folgt dar:

Zusammenfassung aller Untersuchungsergebnisse

	n	Mittelwert
V	180	84,97
Z	180	79,39

Folglich zeigte Vitapex also bei Wurzelkanälen unterschiedlicher Krümmungswinkel eine höhere Dichtigkeit der Wurzelfüllung als Zinkoxid-Eugenol.

4.1.1 Zusammenfassung deskriptive Statistik

Tabelle 5 stellt die Mittelwerte der Messreihen je Krümmungswinkel und Schnittebene vergleichend dar. Im Mittel wurde sowohl bei jedem Krümmungswinkel als auch in jeder Schnittebene mit Vitapex das bessere Ergebnis erzielt.

Tabelle 5 Mittelwertdarstellung der Ergebnisse je Krümmungswinkel und Schnittebene

Vitapex				
	KW G	KW M	KW S	Mittelwert
1 mm	73,94	73,54	74,00	73,82
2 mm	81,93	86,20	85,42	84,51
3 mm	89,50	93,00	86,17	89,55
4 mm	94,30	93,06	88,66	92,00
Mittelwerte	84,92	86,45	83,56	

Zinkoxid-Eugenol				
	KW G	KW M	KW S	Mittelwert
1 mm	68,11	72,46	66,41	68,99
2 mm	72,60	78,16	76,13	75,63
3 mm	90,28	83,45	79,35	84,36
4 mm	92,54	85,83	87,46	88,61
Mittelwerte	80,88	79,98	77,33	

4.1.2 Das getrimmte Mittel

Das getrimmte Mittel dient bei der Auswertung experimenteller Versuchsreihen der Abschwächung des Einflusses von Extremwerten, eine bestimmte Anzahl dieser Werte wird eliminiert. Grundlage der vorliegenden Arbeit bildet eine experimentelle Untersuchung, demzufolge wurde vergleichend auch das getrimmte Mittel herangezogen und 10 % der kleinsten und größten Messwerte je Messreihe als Extremwerte definiert.

Je Messreihe lagen 15 Werte vor.

$$15 \times 0,1 = 1,5$$

Da nur ganze Werte betrachtet werden konnten, war auf beiden Seiten der Datenreihe ein Wert in der Berechnung zu vernachlässigen, somit der größte und der kleinste Messwert je Krümmungsgrad und Füllmaterial zu streichen (Tabelle 6).

Tabelle 6 Ergebnisse für das getrimmte Mittel nach Krümmungswinkel

	n	Getrimmter Mittelwert	Ursprünglicher Mittelwert
GV	52	86,06	84,92
GZ	52	81,79	80,88
MV	52	87,71	86,45
MZ	52	80,66	79,98
SV	52	85,23	83,56
SZ	52	78,54	77,33

Der Vergleich des getrimmten Mittels ergab bei allen Krümmungsgraden einen höheren Mittelwertanstieg bei Vitapex, was sich insgesamt wie folgt darstellte:

Zusammenfassung des getrimmten Mittels

	Getrimmter Mittelwert n 156	Ursprünglicher Mittelwert n 180
V	86,33	84,97
Z	80,33	79,39

Berücksichtigt man also ein gewisses Fehlerspektrum, das jeder experimentellen Versuchsreihe durch verschiedene Faktoren wie handwerkliche Unzulänglichkeiten, Materialfehler und äußere Einflüsse immanent sein kann, stieg die Erfolgsquote beim Einsatz von Vitapex gegenüber Zinkoxid-Eugenol an.

4.2 Statistische Analyse

Grundlage der statistischen Analyse war die Ermittlung der Signifikanz. Sie kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit der These, dass die festgestellten Unterschiede zwischen Messgrößen durch Zufall entstanden sind. Wird das Signifikanzniveau, welches in dieser Studie auf 5 % festgelegt wurde, nicht überschritten, ist dies ein Beleg dafür, dass der gemessene Zusammenhang mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % auch generell gilt und nicht durch Zufall entstanden ist.

4.2.1 Normalverteilung

Zunächst wurden die Daten auf Normalverteilung getestet (Shapiro-Wilk und Kolmogorow-Smirnow) und lediglich nach Vitapex und Zinkoxid-Eugenol unterschieden, die Einteilung nach Krümmungswinkeln blieb unberücksichtigt. Der Kolmogorow-Smirnow-Test und der Shapiro-Wilk-Test zeigten beide eine Signifikanz kleiner 5 %, die Daten sind nicht normalverteilt. Nicht normalverteilte Daten bedingen die Anwendung folgender statistischer Tests

- Mann-Whitney Test
- Oneway ANOVA
- Post-hoc-Test nach Bonferroni und Scheffé
- Post-hoc-Test nach Tamhane2.

Diese wurden zur weiteren Auswertung der Untersuchungsdaten herangezogen.

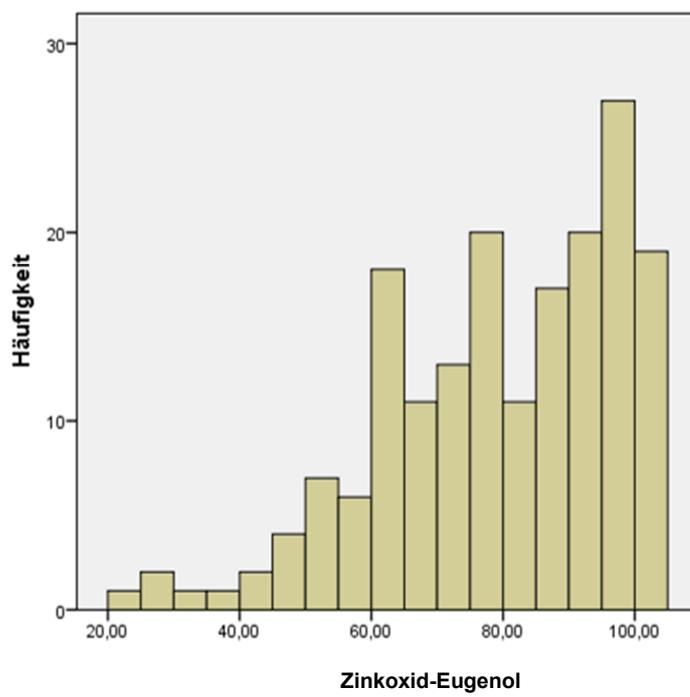
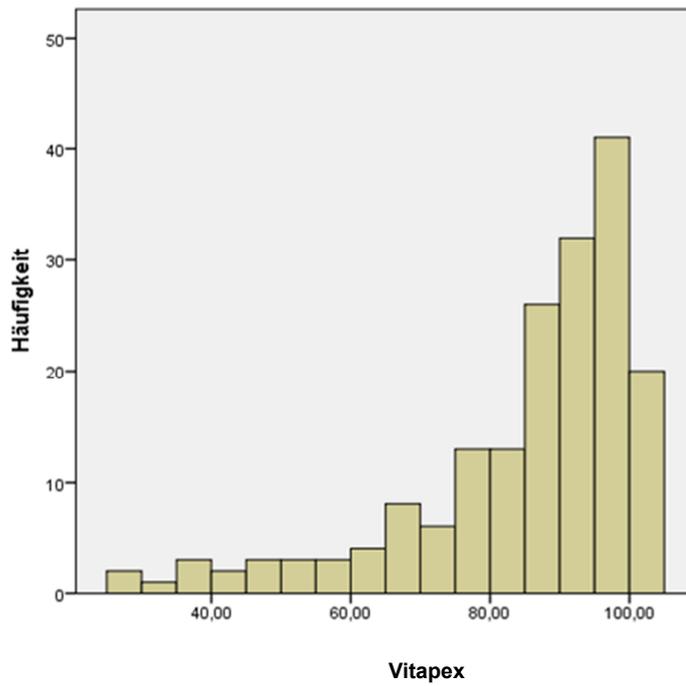
Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung, nachfolgend werden diese als Histogramme und Boxplot graphisch dargestellt.

Tabelle 7 Normalverteilung der Messergebnisse unterteilt nach Materialien

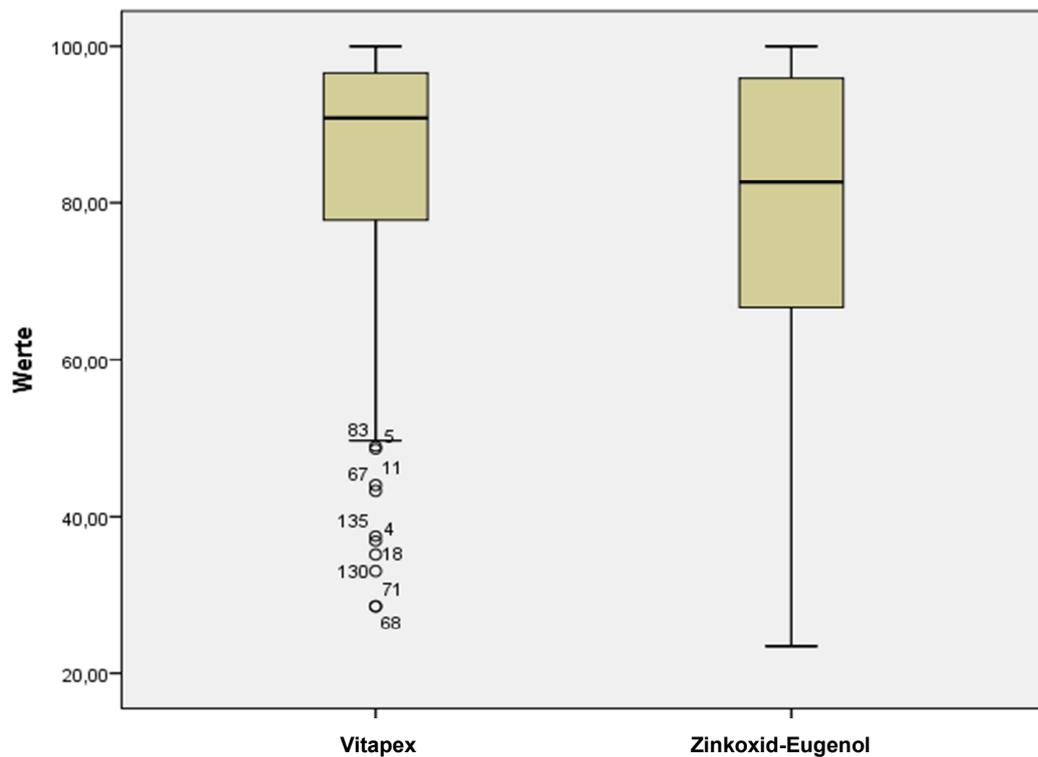
Material	Kolmogorow-Smirnow			Shapiro-Wilk		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
V	0,180	180	0,000	0,815	180	0,000
Z	0,123	180	0,000	0,921	180	0,000

Graphische Darstellung der Normalverteilung als Histogramm und Boxplot für Vitapex und Zinkoxid-Eugenol

Histogramm



Boxplot-Darstellung



In den als Box bezeichneten farbigen Rechtecken liegen die mittleren 50 % der Daten. Das obere Ende und das untere Ende der Antenne spiegeln Maximum und Minimum wider. Die Länge des Boxplots, inklusive aller Extremwerte, zeigt den gesamten Wertebereich des Datensatzes.

Das Ergebnis stellt sich wie folgt dar:

- 50 % der Daten umfassen bei Vitapex mehr Werte als bei Zinkoxid-Eugenol
- die ermittelten Werte für Vitapex differieren geringer als bei Zinkoxid-Eugenol, deshalb können die Extremwerte für Vitapex einzeln aufgeführt werden
- die Werte sind jeweils nicht normal verteilt.

4.2.2 Materialabhängigkeit

Der Mann-Whitney-U-Test, auch Wilcoxon-Rangsummen-Test genannt (Tabelle 8), wurde durchgeführt, um eine Abhängigkeit der Wurzelkanaldichte vom Material zu untersuchen. Er testet, ob die zentralen Tendenzen zweier unabhängiger Stichproben verschieden sind.

Tabelle 8 Materialabhängigkeit

Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
Die Verteilung von Werten ist über Kategorien von Material gleich	Mann-Whitney-U-Test unabhängiger Stichproben	0,002	Nullhypothese ablehnen

Die Signifikanz ergab 0,2 %, die Nullhypothese mit der Annahme, dass die Verteilung von Werten über die Kategorien von Material identisch ist, konnte abgelehnt werden. Somit wurde bewiesen, dass die Qualität der Wurzelfüllung abhängig ist von der Wahl des Materials. Mit Vitapex wurde eine bessere Dichtigkeit der gefüllten Wurzelkanäle erreicht als mit Zinkoxid-Eugenol.

4.2.3 Krümmungswinkeleinfluss

Um festzustellen ob der Krümmungswinkel der Wurzeln Einfluss auf die Wurzelfüllung hat, wurde die einfaktorielle Varianzanalyse (Oneway ANOVA, Tabelle 9) durchgeführt. Der Einfluss einer unabhängigen Variablen wird auf die Ausprägung einer Zufallsvariable untersucht.

Bei Vitapex zeigte sich eine Signifikanz von 63,1 % und bei Zinkoxid-Eugenol von 52,8 %, das Signifikanzniveau von 5 % wird deutlich überschritten, ein Zusammenhang zwischen Wurzelfüllungsqualität und Krümmungswinkel kann schlussfolgernd nicht hergestellt werden.

Tabelle 9 Einfluss des Krümmungswinkels

V	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	250,738	2	125,369	0,462	0,631
Innerhalb der Gruppen	48004,765	177	271,213		
Gesamt	48255,504	179			

Z	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	407,032	2	203,516	0,642	0,528
Innerhalb der Gruppen	56139,070	177	317,170		
Gesamt	56546,102	179			

Die einfaktorielle Varianzanalyse stellt ausschließlich fest, dass es in einer Gruppe von Mittelwerten signifikante Unterschiede gibt, erst die Post-hoc-Tests geben darüber Auskunft, welche Mittelwerte exakt sich signifikant voneinander unterscheiden.

Um den geeigneten Test, Bonferroni & Scheffé oder Tamhane2, auswählen zu können war im Voraus die Prüfung der Homogenität der Varianzen erforderlich.

Dieser Varianzhomogenitätstest (Tabelle 10 Anlagen) ermittelte Signifikanzen von jeweils 52 % bzw. 32 %. Die Varianzen sind somit homogen und der Post-hoc-Test nach Bonferroni und Scheffé (Tabelle 11 Anlagen) war anzuwenden.

Da die Signifikanz hier immer größer 5 % auswies, ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Krümmungswinkeln in Bezug auf die Dichtigkeit der Wurzelfüllung.

Es konnte demzufolge nachgewiesen werden, dass der Krümmungswinkel der Milchzahnwurzel keinen Einfluss auf die Qualität der Wurzelfüllung hat.

4.2.4 Schnittebenenunterschied

Zur Beantwortung der Frage, ob zwischen den Schnittebenen signifikante Unterschiede in der Qualität der Wurzelfüllung bestehen, wurden die beiden Materialgruppen getrennt voneinander betrachtet.

Vitapex

Die deskriptive Statistik stellt eine Übersicht (Tabelle 12) der Ergebnisse dar. Hier zeigte sich in der untersten Schnittebene der schlechteste Mittelwert mit 73,82 %. Dieser Mittelwert steigerte sich stetig Richtung koronal auf 92,00 % in der vierten Schnittebene.

Tabelle 12 Schnittebenenunterschied: Mittelwertvergleich Vitapex

n	mm	Mittelwert	Minimum	Maximum
45	1	73,82	28,57	100,00
45	2	84,51	33,02	100,00
45	3	89,55	50,33	100,00
45	4	92,00	49,73	100,00
Σ 180		Ø 84,97		

Grundlage der Betrachtung, ob eine Abhängigkeit der Qualität der Wurzelfüllung von den Schnittebenen besteht, war wiederum die einfaktorielle Varianzanalyse (Oneway ANOVA, Tabelle 13). Diese zeigte eine Signifikanz kleiner 5 % und wies auf eine Abhängigkeit der Wurzelfüllungsdichtigkeit von den Schnittebenen hin.

Tabelle 13 Schnittebenenunterschied: Signifikanzvergleich Vitapex

V	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	8773,242	3	2924,414	13,036	0,000
Innerhalb der Gruppen	39482,261	176			
Gesamt	48255,504	179	224,331		

Der nun erforderliche Varianzhomogenitätstest (Tabelle 14 Anlagen) mit einer Signifikanz kleiner 5 % beweist, dass die Varianzen nicht homogen sind. Um zu ermitteln, in welcher Ebene konkret ein Unterschied vorlag, wurde nachfolgend der Post-hoc-Test nach Tamhane2 durchgeführt (Tabelle 15 Anlagen).

Beim Post-hoc-Test zeigte sich ein signifikanter Unterschied der untersten 1mm Ebene zu allen anderen Ebenen, da dort die Signifikanz kleiner 5 % ist. Hingegen ergab sich zwischen den anderen Millimeter-Ebenen kein statistischer Unterschied.

Die Qualität der Wurzelfüllung ist bei Vitapex also von der untersten Schnittebene abhängig, jedoch nicht von der 2 mm -, 3 mm - oder 4 mm Ebene.

Zinkoxid-Eugenol

Auch hier wurden die Ergebnisse der deskriptiven Statistik herangezogen (Tabelle 16). Der Mittelwert stieg analog zu Vitapex, hier von apikal mit 68,99 % nach koronal mit 88,61 % an.

Tabelle 16 Schnittebenenunterschied: Mittelwertvergleich Zinkoxid-Eugenol

n	mm	Mittelwert	Minimum	Maximum
45	1	68,99	23,40	100,00
45	2	75,63	37,46	100,00
45	3	84,36	48,70	100,00
45	4	88,61	43,48	100,00
Σ 180		\bar{x} 79,39		

Die ebenfalls als Voraussetzung zur Beurteilung durchzuführende einfaktorielle Varianzanalyse (Oneway ANOVA, Tabelle 17) stellte eine Signifikanz von kleiner 5 % dar und weist auf eine grundsätzliche Abhängigkeit der Wurzelfüllungsdichtigkeit von den Schnittebenen hin.

Tabelle 17 Schnittebenenunterschied: Signifikanzvergleich Zinkoxid-Eugenol

Z	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	10435,012	3	3478,337	13,276	0,000
Innerhalb der Gruppen	46111,091	176			
Gesamt	56546,102	179	261,995		

Der Varianzhomogenitätstest (Tabelle 18 Anlagen) mit einer Signifikanz von 37,2 % zeigte auf, dass die Varianzen homogen sind.

So war nachfolgend der Post-hoc-Test nach Bonferroni und Scheffé zu verwenden (Tabelle 19 Anlagen). Die Signifikanz kleiner 5 % verdeutlicht, dass die Dichtigkeit der Wurzelfüllung bei Zinkoxid-Eugenol abhängig ist von der Lage. In den beiden unteren Schnittebenen traten signifikant schlechtere Ergebnisse auf als in der 4 mm Ebene.

Zusätzlich weist die 1 mm Ebene auch zu der 3 mm Schnittebene eine mindere Qualität auf.

4.2.5 Zusammenfassung statistische Analyse

Die statistische Analyse ergab folgende Resultate:

1. Die Qualität der Wurzelfüllung war vom Material abhängig, Vitapex ist dabei Zinkoxid-Eugenol überlegen.
2. Die Qualität der Wurzelfüllung war unabhängig vom Krümmungswinkel der Wurzel.
3. Bei den mit Vitapex gefüllten Wurzeln hatte die erste Schnittebene Einfluss auf die Wurzelfüllung, die anderen Schnittebenen zeigten keine signifikanten Unterschiede.
4. Bei Verwendung von Zinkoxid-Eugenol zeigte sich, dass neben Schnittebene 1, die signifikant schlechtere Ergebnisse aufwies als Ebene 3 und 4, auch Schnittebene 2 deutlich hinter den Werten von Ebene 4 zurücklag.

5. Diskussion

5.1. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Im Rahmen der hier vorliegenden Studie wurden ausgewählte humane ein- und mehrwurzlige Milchzähne hinsichtlich der Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen untersucht. Um eine Vergleichbarkeit untereinander zu ermöglichen, kamen nur Dentales decedui zum Einsatz, die keine Resorptionen im Bereich des Apex aufwiesen, nicht endodontisch behandelt waren und deren Karies die Furkation nicht erreicht hatte. Die Einteilung der Wurzeln erfolgte nach ihrem Krümmungswinkel, um den möglichen Einfluss von anatomischen Unterschieden zu ermitteln. Ziel war es, möglichst viele Parameter zu standardisieren und somit vergleichbare Ergebnisse gewinnen und entsprechend auswerten zu können. Allerdings ist bei der Verwendung von menschlichen Zähnen die große anatomische Variabilität und Komplexität der Wurzelkanal-Morphologie zu berücksichtigen. Eine vollkommene Vereinheitlichung scheidet daher aus. Nichtsdestotrotz hat sich bei in-vitro-Untersuchungen der Einsatz von menschlichen extrahierten Zähnen etabliert (Xu et al., 2005).

Zwar gibt es Untersuchungen, in denen künstliche Wurzelkanäle aus Methacrylat oder ähnlichen Kunststoffen herangezogen werden, allerdings können dadurch in vivo vorkommende Faktoren wie Kanalwandbeschaffenheit und Schmierschicht nicht berücksichtigt werden (Tepel, 2000; Shipper et al., 2004).

Die Länge einer Wurzelkanalaufbereitung hat Einfluss auf den Behandlungserfolg, daher empfiehlt die Europäische Gesellschaft für Endodontie eine Wurzelkanalaufbereitung so nah wie möglich an der apikalen Konstriktion (ESE, 2006). In der vorliegenden Arbeit wurde eine Arbeitslänge von einem Millimeter vor dem anatomischen Apex gewählt, da diese Länge in Studien den größten Erfolg für die Wurzelkanalbehandlung gezeigt hat (Kuttler, 1955; Hellwig et al., 2003). Klinisch sollte die Arbeitslänge bei Milchzähnen einen bis zwei Millimeter vor dem röntgenologischen Apex enden, um eine Überinstrumentierung zu vermeiden (Rodd et al., 2006; Kühnisch et al., 2012).

Die Zähne wurden maschinell mit dem Hero 642 bearbeitet, um eine reproduzierbare Aufbereitung zu gewährleisten. Dieses System ermöglicht es, die natürliche Krümmung der Kanäle zu erhalten (Hülsmann et al., 2003). Eine Alternative zur maschinellen Aufbereitung stellt die konventionelle manuelle Methode dar, wobei die Aufbereitung per Hand eine exaktere taktile Kontrolle erlaubt (DGZMK, 2000). Jedoch wurde in dieser Studie ausschließlich die maschinelle Aufbereitung angewendet, da mit dieser Vorgehensweise eine bessere Standardisierung der Wurzelkanäle unter Erhalt des Wurzelkanalverlaufs möglich ist (Gluskin et al., 2001). Insbesondere bei gekrümmten Kanälen

treten weniger Aufbereitungsfehler im Sinne von Kanaltransportationen sowie Zip- und Elbow-Formationen auf (Sonntag et al., 2003). Zu berücksichtigen ist ferner der erhebliche Zeitvorteil (Gluskin et al., 2001).

Neben der Aufbereitung spielt die Desinfektion des Wurzelkanalsystems eine wichtige Rolle. Sie erfolgte nach einem speziellen Spülprotokoll. Im Wechsel wurde mit Natriumhypochlorit und Chlorhexidin gespült, daneben fand Kochsalzlösung zur Neutralisation Anwendung. Dieses spezielle Spülkonzept wurde, um standardisierte Voraussetzungen für einen Vergleich zu erhalten, in allen Gruppen angewandt. Die hier eingesetzte Spüllösung Natriumhypochlorit ist das zur Wurzelkanal-desinfektion meistgenutzte Präparat (Vianna et al., 2006), da es hinsichtlich seiner Fähigkeit, nekrotisches Gewebe aufzulösen, allen anderen Spüllösungen überlegen ist (Naenni et al., 2004). Zusätzlich erfolgte der Einsatz von Chlorhexidin, welches viele Autoren aufgrund seiner guten antibakteriellen Eigenschaften und Biokompatibilität empfehlen (Vianna et al., 2006).

Die aufbereiteten und desinfizierten Wurzeln wurden, sortiert nach ihrem Krümmungswinkel, mit Vitapex- oder Zinkoxid-Eugenol abgefüllt.

Vitapex besteht aus Kalziumhydroxid und Jodoform. Es findet bevorzugt Anwendung als Wurzelfüllmaterial in Milchzähnen. Im Gegensatz zu Zinkoxid-Eugenol zeigt Vitapex eine gute Resorption, auch beim Überpressen des Materials, was in verschiedenen Studien aufgezeigt werden konnte (Garcia-Godoy, 1987; Nurko und Garcia-Godoy, 1999; Özalp et al., 2005).

Zinkoxid-Eugenol ist international weit verbreitet und wird ebenfalls als Wurzelfüllmaterial bei der Milchzahnendodontie eingesetzt. Bei dem Überpressen des Materials kommt es zu einer milden entzündlichen Reaktion, verbunden mit einer sehr langsamen Resorption (Muruzabal et al., 1966). Trotzdem konnte sich Zinkoxid-Eugenol in Studien bewähren (Gold, 1972; Özalp et al., 2005). Nachgewiesen ist, dass überpresstes Zinkoxid-Eugenol den klinischen und röntgenologischen Erfolg der Wurzelkanalbehandlung nicht beeinflusst (Sadrian und Coll, 1993; Mani et al., 2000).

Trairatvorakul und Chunlasikaiwan verglichen in ihrer Studie Vitapex und Zinkoxid-Eugenol und kamen zu dem Ergebnis, dass nach zwölf Monaten kein statistischer Unterschied in den Erfolgsraten bestand (Trairatvorakul und Chunlasikaiwan, 2008).

Da die Qualität der zu untersuchenden Wurzelkanalfüllungen auch von der Erfahrung und dem Geschick des jeweiligen Behandlers abhängt, wurde in der hier vorliegenden Arbeit eine möglichst große Sorgfalt bei der Durchführung der Wurzelkanalfüllungen angestrebt. Beide Materialien wurden für ein einheitliches Vorgehen mit Hilfe der für Vitapex mitgelieferten Applikationsspritze in den Wurzelkanal eingebracht. Ein Überpressen des Materials fand nicht statt.

Um die Qualität einer Wurzelfüllung beurteilen zu können, werden Penetrationsverfahren angewendet. Zu den wichtigsten zählen unter anderem der Farbstoffpenetrationstest, die Flüssigkeitsfiltrationsmethode und das Bakterienpenetrationsmodell. In der vorliegenden Studie wurde ein Farbstoffpenetrationstest mit Methyleneblau durchgeführt. Farbstoffpenetrationstests sind eine der ältesten und verbreitetsten Methoden zur Untersuchung von Dichtigkeiten (Spanber et al., 1989; Tuggle et al., 1989). Hierzu wurden die Zähne mit zwei Schichten Nagellack überzogen, wobei nur das Foramen apicale frei blieb. So konnte sichergestellt werden, dass der Farbstoff nicht durch seitliche Defekte in den Wurzelkanal eindrang und zu falsch negativen Ergebnissen führte. Die Probezähne wurden für drei Tage in 2%ige Methyleneblaulösung bei 37°C im Inkubator gelagert. Dieser passive Penetrationsversuch ist eine gebräuchliche Untersuchungsmethode, die mit wenig Aufwand durchgeführt werden kann (Gilhooly et al., 2000). Das Methyleneblau dringt zwischen Kanalwand und Wurzelfüllung ein und zeigt somit Undichtigkeiten auf. Methyleneblau kann durch sein geringes Molekulargewicht sehr gut penetrieren und reagiert nicht mit der Wurzelfüllung, weshalb es bei vielen Studien zum Einsatz kommt (Goldmann et al., 1989; Ahlberg et al., 1995; Gilhooly et al., 2000; Souza et al., 2009). Jedoch können Luftblasen in der Wurzelkanalfüllung das Penetrieren des Farbstoffes verhindern und zu einem positiv verfälschten Ergebnis führen (Wu et al., 1993).

Neben Farbstoffen werden in der Literatur auch Bakterien als Indikatoren beschrieben (Kos et al., 1982; Brosco et al., 2010). Die Reaktion findet unabhängig von der Bakterienmenge statt, die penetrierten Bakterien sind nicht quantifizierbar. Eine geringe Anzahl von penetrierten Bakterien muss in vivo periapikal jedoch nicht zwingend zu einer Infektion führen, wenn diese vom eigenen Immunsystem eliminiert werden. Daher korrelieren die Ergebnisse des Bakterien-Penetrationstests nicht mit klinischen Misserfolgen der Wurzelkanalfüllungen (Shipper et al., 2004). Weiterhin können Bakterientoxine bei endodontischen Untersuchungen zu Misserfolgsquoten führen (Wu et al., 1994). Aufgrund des Molekulargewichts von Bakterien ist der Farbstoff-Penetrationstest vorzuziehen, da Farbstoffe ein geringeres Molekulargewicht als Bakterien aufweisen und dadurch eine bessere Penetrationsfähigkeit besitzen.

Seit dem Jahr 2005 findet zusätzlich das Glukosepenetrationsverfahren Anwendung (Xu et al., 2005). Es kann als eine Weiterentwicklung der Flüssigkeitsfiltrationsmethode angesehen werden. Beide Techniken bewerten die Penetration von Flüssigkeiten entlang der Wurzelfüllung unter konstantem Druck (Van der Sluis et al., 2007). Penetrationstests mit Glukose wurden bereits in mehreren Studien angewandt und als sensitiv und einfach beurteilt (Zou et al., 2006). Jedoch können verschiedene Stoffe die Glukosepenetration beeinflussen und so das Ergebnis verfälschen (Shemesh et al., 2008).

Ausdrücklich ist darauf hinzuweisen, dass in-vitro Farbstoffpenetrationstests nur bedingt mit bakteriellem Leakage vergleichbar sind, da klinisch auf andere Verfahren zurückgegriffen werden muss (Limkangwalmongkol et al., 1991).

Die eingefärbten Untersuchungszähne wurden von apikal in vier 1 mm dicke Scheiben geschnitten (Limkangwalmongkol et al., 1991). Dies ermöglichte eine vollumfängliche Beurteilung der kompletten Wurzelfüllung in jeder Ebene der einzelnen Objekte. Das Verhältnis von Luft und Wurzelkanalfüllmaterial konnte so vom Apex aus ermittelt werden, um Undichtigkeiten im Bereich der Wurzelfüllung aufzudecken.

Da ein möglicher Einfluss der Stärke der eingesetzten Trennscheiben und der damit verbundene Zahnabrieb auf die Genauigkeit der Messungen nicht gänzlich auszuschließen ist, wurde während der Versuchsdurchführung nur mit einer Trennscheibe gearbeitet (Limkangwalmongkol et al., 1991).

Insgesamt konnte die vorliegende Arbeit unter idealen Bedingungen durchgeführt werden. Weder bestand eine Kontaminierung mit Keimen, noch herrschten eingeschränkte Sicht- und Arbeitsverhältnisse.

5.2 Ergebnisse

In dieser Studie wurden Milchzahnwurzeln einem der drei Krümmungswinkel (KW) nach Schneider zugeordnet und anschließend unter Verwendung gleicher Technik mit Vitapex oder Zinkoxid-Eugenol wurzelkanalbehandelt. Die bearbeiteten Objekte wurden von apikal im Abstand von 1 mm vier Mal horizontal geschnitten. Die Bestimmung des prozentualen Anteils von Vitapex bzw. Zinkoxid-Eugenol und Luft diente der Beurteilung der Qualität der Wurzelfüllung in jeder einzelnen Schnittebene. Diese Untersuchungsmethode wurde bereits mehrfach in der Literatur beschrieben (Jarrett et al., 2004).

Vitapex überzeugte mit seinen Maximalwerten von 100 % in den Gruppen G und S, Zinkoxid-Eugenol konnte diese Maxima nur in der Gruppe G erreichen. Minimalwerte waren für Vitapex (28,57 % in Schnittebene 1) in der Gruppe M und für Zinkoxid-Eugenol (23,40 % in Schnittebene 1) in der Gruppe S festzustellen.

Der Mann-Whitney-Test dokumentierte den signifikanten Unterschied zwischen Vitapex und Zinkoxid-Eugenol. Die mit Vitapex gefüllten Wurzeln zeigten prozentual weniger Luft einschlüsse. Die Dichtigkeit der Wurzelfüllung ergab für Vitapex im Mittel 84,97 % gegenüber einem Mittelwert von 79,39 % für Zinkoxid-Eugenol.

Die einfaktorielle Varianzanalyse, der Varianzhomogenitätstest und der Post-hoc-Test nach Bonferroni und Scheffé sollten den Einfluss des Krümmungswinkels auf die Qualität der Wurzelfüllung untersuchen. Hier war kein erheblicher Unterschied in den einzel-

nen Gruppen erkennbar. Vitapex zeigte sein bestes Ergebnis in mäßig gekrümmten Kanälen mit einem Mittelwert von 86,45 %, Zinkoxid-Eugenol in geraden Wurzeln mit 80,88 %.

Auch die Abhängigkeit der Wurzelkanalfüllungsdichte von den einzelnen Schnittebenen wurde durch einfaktorielle Varianzanalyse, Homogenitätstest und Post-hoc-Test nach Tamhane² für Vitapex bzw. nach Bonferroni und Scheffé für Zinkoxid-Eugenol geprüft. Die Mittelwerte von Vitapex stiegen apikal mit 73,82 % nach koronal mit 92,00 % stetig an. Statistisch bewertet unterschied sich nur die unterste Schnittebene von den drei anderen Ebenen, die übrigen verhielten sich homogen.

Die Mittelwerte von Zinkoxid-Eugenol erhöhten sich von 68,99 % apikal bis zur Ebene 4 auf 88,61 %. Die statistischen Tests belegen, dass Ebene 1 und Ebene 2 signifikant zu Ebene 4 differieren. Zusätzlich weist Ebene 1 auch wesentlich schlechtere Resultate auf als Ebene 3.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung legen dar, dass Vitapex als Füllpaste Zinkoxid-Eugenol vorzuziehen ist.

Dieses Resümee ziehen auch andere Studien. Mortazavi und Mesbahi füllten 52 Milchzähne in vivo mit Zinkoxid-Eugenol oder Vitapex und kamen zu Erfolgsraten von 78,5 % bzw. 100 % (Mortazavi und Mesbahi, 2004).

Die hohe Erfolgsrate von Vitapex im klinischen Umfeld ist ebenfalls belegt. Nurko und Garcia-Godoy behandelten erfolgreich 33 Milchzähne in je einer Sitzung mit einer Pulpotomie unter Verwendung von Vitapex. Klinische und röntgenologische Nachkontrollen fanden zwischen 3 und 22 Monaten statt (Nurko und Garcia-Godoy, 1999). Nakornchai et. al. kamen in ihrer Studie zu hohen Erfolgsraten für Vitapex als Wurzelfüllmaterial, nachdem sie 25 Dentes decedui behandelt und über 12 Monate Nachkontrollen durchgeführt hatten (Nakornchai et al., 2010). Somit bestätigt die vorliegende Arbeit die in anderen klinischen Studien ermittelten Ergebnisse.

Demgegenüber stehen Studien, in denen die Gleichwertigkeit der Ergebnisse beim Einsatz von Vitapex und Zinkoxid-Eugenol festgestellt wurde. Pramila et al. kamen in ihrer Untersuchung zu hohen Erfolgsraten von über 90 % bei der Verwendung von Vitapex und Zinkoxid-Eugenol als Wurzelfüllmaterial in Milchzähnen und konnten keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Materialien feststellen (Pramila et al., 2015). Auch Pinto et al. erzielten mit Zinkoxid-Eugenol Dichtigkeiten von über 90 %. Sie untersuchten den klinischen und radiologischen Nutzen von Zinkoxid-Eugenol im Vergleich zu einer mit Zinkoxid-Eugenol angedickten Kalziumhydroxidpaste (Calen). Dabei wurde reines Calen für dreißig Tage als medikamentöse Einlage genutzt, bevor die Milchzähne mit einem der beiden Materialien abgefüllt wurden. Der Erfolg der Be-

handlung wurde klinisch und röntgenologisch jeweils einen, drei, sechs, zwölf und achtzehn Monate später kontrolliert (Pinto et al., 2011).

Özalp et al. stellten in ihrer Untersuchung fest, dass die klinischen und röntgenologischen Ergebnisse von Zinkoxid-Eugenol und Vitapex gleich gut waren, allerdings zeigte sich, dass von sechs mit Zinkoxid-Eugenol überfüllten Kanälen nur bei zwei Kanälen eine Resorption des überpressten Materials stattgefunden hatte (Özalp et al., 2005).

Grundsätzlich überzeugt Vitapex auch in den vergleichenden Studien, so dass dem Einsatz als Wurzelkanalfüllmaterial nichts entgegensteht.

Alle Untersuchungen im Bereich der Milchzahnendodontie erreichen jedoch nicht die Erfolgsquoten der Wurzelkanalfüllung im permanenten Gebiss, die dem Behandler wesentlich mehr Möglichkeiten einräumt und daher nur sehr eingeschränkt mit der Wurzelkanalbehandlung in der Kinderzahnheilkunde verglichen werden kann. So beschreiben Lares und elDeep Erfolgsquoten von bis zu 96 % bei der Anwendung von Guttapercha, verbunden mit einem Sealer in lateraler Kondensation. Diese als Goldstandard bezeichnete Methode weist besonders im apikalen Bereich eine hohe Dichtigkeit der Wurzelfüllung auf (Lares und elDeeb, 1990).

Zur Therapie steht eine große Anzahl an Fülltechniken zur Wahl, darunter die vertikale Kondensationstechnik. Diese ähnelt der in der vorliegenden Studie angewandten Methode, den Wurzelkanal von apikal nach koronal zu füllen. Mehrere in-vitro-Studien stellen sogar eine Überlegenheit der vertikalen Kondensationstechnik gegenüber der lateralen fest (Smith et al., 2000; Wu et al., 2001; Gencoglu et al., 2002).

Insgesamt zeigt sich folglich, dass Vitapex in Bezug auf Handhabung, Zeitaufwand und Erfolg Zinkoxid-Eugenol als Wurzelfüllmaterial im Milchgebiss vorzuziehen ist. Unbeachtet blieb in dieser Studie die Resorptionsfähigkeit der beiden Materialien, wobei andere Studien auch hier gute Ergebnisse für Vitapex nachwiesen (Nurko und Garcia-Godoy, 1999).

6. Zusammenfassung

Die Wurzelkanalbehandlung stellt die letzte Möglichkeit dar, einen Zahn, dessen Kanalsystem aufgrund von Trauma oder Karies mit Bakterien infiziert ist, zu erhalten. An Milchzähnen kommt dieses Verfahren zum Einsatz, wenn klinische, röntgenologische und soziale Aspekte dafür sprechen. Verschiedene Materialien stehen für die Wurzelkanalfüllung zur Auswahl. Häufige Verwendung finden Vitapex und Zinkoxid-Eugenol, deren Vergleich Inhalt dieser Studie war. Dazu wurden menschliche Milchzahnwurzeln je einem von drei (G: 0° bis 5°, M: 10° bis 20°, S: 25° bis 70°) Krümmungswinkeln (nach Schneider, 1971) zugeordnet. In diesen 3 Gruppen wurden nach maschineller Aufbereitung mittels Hero 642 hälftig je 15 Wurzeln mit Vitapex und 15 Wurzeln mit Zinkoxid-Eugenol gefüllt.

Insgesamt umfasste die Versuchsreihe 45 Proben mit Vitapex und 45 Proben mit Zinkoxid-Eugenol. Alle Zähne wurden mit der gleichen Applikationsspritze gefüllt, um Differenzen in der Anwendung auszuschließen. Vitapex konnte bereits als Paste bezogen, Zinkoxid-Eugenol musste aus Pulver und Flüssigkeit angerührt werden. Nach Verschluss der Zähne mit Tetric Ceram erfolgte die Versiegelung mit Nagellack in 2 Schichten, wobei das Foramen apicale frei blieb. Um den passiven Penetrationstest durchzuführen, fand die Lagerung für 3 Tage in einer 2 %igen Methylenblaulösung bei 37° C im Inkubator statt.

Anschließend wurden alle Zähne in 1 mm Schritten von apikal mittels Trennscheibe geschnitten. Die entstandenen Proben wurden auf handelsüblichem Klebeband fixiert und unter dem Auflichtmikroskop fotografiert. Die Software AxioVision AC ermöglichte das Vermessen der Präparate, so dass der prozentuale Anteil von Wurzelfüllmaterial zu Luft ermittelt werden konnte.

Der Vergleich der beiden Materialien zeigte im Ergebnis signifikant weniger Lufteinschlüsse, also qualitativ bessere Wurzelfüllungen bei Vitapex gegenüber Zinkoxid-Eugenol ($p < 0,05$, Post-hoc-Test). Dies ergab sich prozentual sowohl in den 3 Gruppen der Krümmungswinkel als auch im kompletten Vergleich der jeweils 180 geschnittenen Scheiben. Die errechneten Mittelwerte des Füllungsgrades betragen 84,97 % für Vitapex und 79,39 % für Zinkoxid-Eugenol. Beide Stoffe eignen sich durch ihre hohen Erfolgsquoten als Wurzelfüllmaterial. Mehrere Autoren kamen zu den gleichen Schlussfolgerungen, untersuchten jedoch nicht den Einfluss der Wurzelkanalkrümmung auf den Erfolg der Behandlung (Nurko und Garcia-Godoy, 1999; Mortazavi und Mesbahi, 2004; Pramila et al., 2015). Maßgeblich für die Qualität der Wurzelfüllung ist deren Lage. Die Dichtigkeit stieg von apikal nach koronal prozentual an. Die errechneten Mittelwerte in der Schnittebene 1 lagen sowohl für Vitapex (73,82 %) als auch für Zinkoxid-

Eugenol (68,99 %) deutlich unter den Ergebnissen der anderen Ebenen. Zinkoxid-Eugenol erreichte auch in der zweiten Schnittebene mit einem Dichtigkeitsgrad von 75,63 % unterdurchschnittliche Resultate ($p < 0,05$, Oneway ANOVA).

Hingegen hatte keiner der Krümmungswinkel wesentlichen Einfluss auf beide Materialien ($p > 0,05$, Oneway ANOVA). Vitapex erreichte im Mittel Füllungsgrade zwischen 83,56 % und 86,45 %, Zinkoxid-Eugenol lag in den Bereichen von 77,33 % und 80,88 %.

Schlussendlich eignen sich beide Werkstoffe als Wurzelfüllmaterial für Milchzähne, jedoch ist Vitapex aufgrund der wesentlich besseren Ergebnisse, der einfachen Handhabung und der Zeitersparnis Zinkoxid-Eugenol vorzuziehen.

Schlussfolgerungen

Gerade bei Kindern stellt die Endodontie eine besondere Herausforderung dar. Voraussetzung für die aufwendige Behandlung ist eine vertrauensvolle Kooperationsbereitschaft des kleinen Patienten und seiner Eltern. Die spezielle Anatomie der Milchzähne mit oft stark gekrümmten Kanälen erschwert die Reinigung, Desinfektion und das Legen der Wurzelfüllung. Desweiteren dürfen Wurzelfüllmaterialien zwar die natürliche Resorption nicht beeinträchtigen, müssen aber dennoch den Wurzelkanal bis zum Apex dicht verschließen. Vitapex und Zinkoxid-Eugenol zeigten in dieser Studie, dass sie für alle Kanalkrümmungen geeignet sind. Beide Materialien wurden mit der Applikationsspritze, die vom Hersteller für Vitapex zur Verfügung gestellt wird, eingebracht. Üblich ist allerdings, Zinkoxid-Eugenol mit Lentulo in die Kanäle einzurotieren. Somit ist die Übertragung auf die Klinik hier nur eingeschränkt möglich. Nachteilig wirkt sich aus, dass Zinkoxid-Eugenol aus 2 Komponenten, abhängig von den Fertigkeiten des Behandlers, angerührt werden muss. Der Einfluss dieser Variable müsste in weiteren Studien untersucht werden. Schnelleres Arbeiten ist mittels Vitapex möglich, da keine zusätzlichen Vorbereitungen erforderlich sind. Allerdings kann die gemessene Arbeitslänge nicht auf die Applikationsspritze übertragen werden, sondern ist vom Behandler zu schätzen. Hierfür bedarf es eines geübten Kinderzahnarztes, der mit seiner Erfahrung die Vorteile beim Einsatz von Vitapex gegenüber Zinkoxid-Eugenol als Wurzelfüllmaterial im Milchgebiss für den jungen Patienten nutzen kann.

7. Quellen

Abbott PV (1990) Medicaments: aids to success in endodontics. Part 1. A review of the literature. *Aust Dent J.* 35: 438-448.

Abdulahdi BS, Abdullah MM, Alaki SM, Alamoudi NM, Attar MH (2017) Clinical evaluation between zirconia crowns and stainless steel crowns in primary molars teeth. *Pediatr Dent* 5: 21-27.

Ahmad M, Roy RA, Kamarudin AG (1992) Observations of acoustic streaming fields around an oscillating ultrasonic file. *Endod Dent Traumatol* 8: 189-194.

Ahlberg KM, Assavanop P, Tay WM (1995) A comparison of the apical dye penetration patterns shown by methylene blue and india ink in root-filled teeth. *J Endod* 28: 30-34.

American Academy of Pediatric Dentistry (AAPD) (2011) X-ray use and safety: 1-5.

American Academy of Pediatric Dentistry (AAPD) (2014) Guideline on pulp therapy for primary and immature permanent teeth. *Clinical practice guidelines*: 280-285.

American Academy of Pediatric Dentistry (AAPD) (2016) Pediatric restorative dentistry. *Best practice guideline*: 312-319.

Andersen M, Lund A, Adreasen JO et al. (1992) In vitro solubility of human pulp tissue in calcium hydroxide and sodium hypochlorite. *Endod Dent Traumatol* 8: 104-108.

Armas Serret M, Cuadros-Fernández C, Lorente-Rodríguez AI, Saez S, Mercadé-Bellidó M (2015) Clinical and radiographic evaluation of MedCem Portland Cement in pulpotomies of primary molars: a pilot study. *IAPD 25th. Congress Glasgow*

Asgary S, Parirokh M, Egbal MJ, Brink F (2005) Chemical differences between white and gray mineral trioxide aggregate. *J Endod* 31: 101-103.

Ashima G, Sarabjot K, Gauba K, Mittal H (2014) Zirconia crowns for rehabilitation of decayed primary incisors: an esthetic alternative. *J Clin Pediatr Dent* 39: 18-22.

Athanassiadis B, Abbott P V, Walsh L J (2007) The use of calcium hydroxide, antibiotics and biocides as antimicrobial medicaments in endodontics. *Aust Dent J.* 52: 64-82.

Attin T, Opatowski A, Meyer C. et al. (2001) Three-year follow up assessment of class II restorations in primary molars with a polyacid-modified composite resin and a hybrid composite. *Am J Dent.* 14: 148-152.

Banerji S, Mehta SB, Millar J (2010) Cracked tooth syndrome. Part 1: aetiology and diagnosis. *British Dental Journal* 208: 459-463.

Barcelos R, Santos MPA, Primo LG, Luiz RR, Maia LC (2011) ZOE paste pulpectomies outcome in primary teeth: A systematic review. *J Clin Pediatr Dent* 35: 241-247.

Barthel CR, Lösche GM, Zimmer S, Roulet JF (1994) Dye penetration in root canals filled with AH 26 in different consistencies. *J Endod* 20: 436-439.

Baumann M, Beer R: *Endodontologie*. Georg Thieme, Stuttgart, 2007, S. 11, 34-36, 66.

Bedos C, Brodeur JM, Arpin S, Nicolau B (2005) Dental caries experience: A two-generation study. *J Dent Research* 84: 931-936.

Bekes K (2018) Milchzahnendodontie. *Zahnmedizin up2date* 12: 395-411.

Bjørndal L (2008) The caries process and its effect on the pulp: The science is changing and so is our understanding. *Endod J* 34: 2-5.

Bjørndal L, Darnnavan T (1999) A light microscopic study of odontoblastic and nonodontoblastic cells involved in tertiary dentinogenesis in well-defined cavitated carious lesions. *Caries Res* 33: 50-60.

- Bjørndal L, Thylstrup A (1995) A structural analysis of approximal enamel caries lesions and subjacent dentin reactions. *Eur J Oral Sci* 103: 25-31.
- Borutta A, Wagner M, Kneist S (2010) Bedingungsgefüge der frühkindlichen Karies. *Oralpr & Kinderzahnheilkunde* 32: 58-63.
- Brännström M (1960) Dentinal and pulpal response. II. Application of an air stream to exposed dentin. Short observation period. *Acta Odontol Scand* 18: 17.
- Bressani AE, Mariath AA, Haas AN, Garcia-Godoy F, de Araujo FB (2013) Incomplete caries removal and indirect pulp capping in primary molars: A randomized controlled trial. *Am J Dent* 26: 196-200.
- British Society of Paediatric Dentistry (BSPD) and International Association of Paediatric Dentistry (APD) (2006) UK National Clinical Guidelines in Paediatric Dentistry: Pulp therapy for primary molars (Internet). Zitiert am 13.06.2018. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11310120>
- Brosco VH, Bernardineli N, Torres SA et al. (2010) Bacterial leakage in obturated root canals-part 2: A comparative histologic and microbiologic analyses. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 109: 788-794.
- Bürklein S, Benten S, Schäfer E (2014) Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems: Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo. *Int Endod J* 47: 405-409.
- Buttler TK, Crawford JJ (1982) The detoxifying effect of varying concentrations of sodium hypochlorite on endotoxins. *J Endod* 8: 59-62.
- Butz CJ (2004) Die endodontische Behandlung von Milchzähnen bei Kindern in der Praxis. *Endod J* 4: 18-26.
- Büyükgürül B, Cehreli ZC (2008) Effect of different adhesive protocols vs calcium hydroxide on primary tooth pulp with different remaining dentin thicknesses: 24 month results. *Clin Oral Invest* 12: 91-96.
- Camilleri J, Montesin FE, Brady K, Sweeney R, Curtis RV, Pitt Ford TR (2005) The constitution of mineral trioxide aggregate. *Dent Mater* 21: 297-303.
- Canoglu H, Tekcicek MU, Cehreli ZC (2006) Comparison of conventional, rotary, and ultrasonic preparation, different final irrigation regimens, and 2 sealers in primary molar root canal therapy. *Pediatr Dent* 28: 518-523.
- Chong BS, Pitt Ford TR (1992) The role of intracanal medication in root canal treatment. *Int Endod J* 25: 97-106.
- Coll JA (2008) Indirect pulp capping and primary teeth: Is the primary tooth pulpotomy out of date? *Pediatr Dent* 30: 230-236.
- Connert T, Amato M, Weiger R (2016) Wurzelkanalfüllung: Alternativen zur lateralen Kondensation. *Zahnmedizin up2date* 10: 209-227.
- Crespo S, Cortes O, Garcia C, Perez L (2008) Comparison between rotary and manual instrumentation in primary teeth. *J of Clinical Pediatr Dent* 32: 295-298.
- Cuadros-Fernández C, Lorente Rodríguez AI, Sáez-Martínez S, García-Binimelis J, About I, Mercadé M (2016) Short-term treatment outcome of pulpotomies in primary molars using mineral trioxide aggregate and Biodentine: A randomized clinical trial. *Clinical Oral Investigation* 20: 1639-1645.
- Dammaschke T (2008) Medikamentöse Wurzelkanaleinlagen. *Zahnmedizin up2date*: 159-176.
- Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Jugendzahnpflege e.V. (2017) Epidemiologische Begleituntersuchungen zur Gruppenprophylaxe 2016 (Internet). Zitiert am 05.05.2019. URL:

https://www.daj.de/fileadmin/user_upload/PDF_Downloads/Epi_2016/Epi_final_BB1801_final.pdf

Deutsche Gesellschaft für Kinderzahnheilkunde und Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung (03/2011) Wissenschaftliche Mitteilung: Endodontie im Milchgebiss (Internet). Zitiert am 26.03.2016. URL: <https://www.dgzmk.de/zahnaerzte/wissenschaftsforschung/mitteilungen/details/document/endodontie-im-milchgebiss-1.html>

Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (06/1999) Wissenschaftliche Stellungnahme: Wurzelkanalfüllpasten und -füllstifte (Internet). Zitiert am 05.05.2016. URL: www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/Wurzelkanalfuellpasten_und_fuellstifte.pdf

Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (04/2000) Wissenschaftliche Stellungnahme: Wurzelkanalaufbereitung (Internet). Zitiert am 05.04.2017. URL: http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/Wurzelkanalaufbereitungen.pdf

Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (06/2002) Wissenschaftliche Stellungnahme: Endodontie im Milchgebiss (Internet). Zitiert am 15.03.2016. URL: http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/Endodontie_im_Milchgebiss.pdf

Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (10/2006) Wissenschaftliche Stellungnahme: Wurzelkanalspülung (Internet). Zitiert am 06.04.2017. URL: http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/DGZMK_Stellungnahme_Wurzelkanalspuelung_10_2006.pdf

Doran MG, Radtke PK (1998) A review of endodontic medicaments. *Gen Dent*. 46: 484-488.

Einwag J, Pieper K: *Kinderzahnheilkunde*. Urban und Fischer, München, 2002, S. 130-135, 214-220, 242-254.

EIAyouti A, Löst C: *Endometrie - elektrische Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge*. Thieme, Stuttgart, 2012, S. 251-262.

El Karim I, Kennedy J, Hussy (2007) The antimicrobial effects of root canal irrigation and medication. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 103: 560-569.

Emilson CG (1977) Susceptibility of various microorganisms to chlorhexidine. *Scand J Dent Res* 85: 65-255.

European Society of Endodontology (2006) Quality guidelines for endodontic treatment: Consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 39: 921-930.

Fabricius L, Dahlen G, Öhman AE, Möller AJR (1982) Predominant indigenous oral bacteria isolated from infected root canal after varied times of closure. *Scand J Dent Res* 90: 134.

Filippi A, Krastl G (2007) Traumatologie im Milch- und Wechselgebiss. *Quint* 58: 739-752.

Finke CH: *Ernährungsmedizin Pädiatrie*. Springer, Berlin, 2012, S. 378.

Fuks AB (2008) Vital pulp therapy with new materials for primary teeth: New directions and treatment perspectives. *Pediatr Dent* 30: 211-221.

Gängler P, Hoffmann T, Willershausen B, Schwenzer N, Ehrenfeld M: *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie*. Georg Thieme, Stuttgart, 2005, S. 150-152.

Garcia-Godoy F (1987) Evaluation of an iodoform paste in root canal therapy for infected primary teeth. *J Dent Child* 54: 30-34.

- Garip Y, Gençoğlu N (2006) Comparison of curved canals preparations using profile, GT and Hero 642 rotary files. *J Oral Rehabil* 33: 131-136.
- Gavini G, Caldeira CL, Akisue E, Candeiro GT, Kawakami DA (2012) Resistance to flexural fatigue of Reciproc R25 files under continuous rotation and reciprocating movement. *J Endod* 38: 684-687.
- Gencoglu N, Garip Y, Bas M, Samani S (2002) Comparison of different gutta-percha root filling techniques: Thermafil, Quick-fill, System B and lateral condensation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 93: 333-336.
- Ghajari MF, Jeddi TA, Iri S, Asgary S (2013) Treatment outcomes of primary molars direct pulp capping after 20 months: A randomized controlled trial. *Iranian Endod J* 8: 149-152.
- Gilhooly RM, Hayes SJ, Bryant ST, Dummer PM (2000) Comparison of cold lateral condensation and a warm multiphase guttapercha technique for obturating curved root canals. *Int Endod J* 33: 415-420.
- Gluskin AH, Brown DC, Buchanan LS (2001) A reconstructed computerized tomographic comparison of Ni-Ti rotary GT files versus traditional instruments in canals shaped by novice operators. *Int Endod J* 34: 476-484.
- Gold JM (1972) Root canal therapy for infected primary molar teeth-preliminary report. *J Dent Child* 39: 269-273.
- Goldman M, Simmonds S, Rush R (1989) The usefulness of dye-penetration studies reexamined. *Oral Surg* 67: 327-332.
- Gordon MPJ, Chandler NP (2004) Electronic apex locators. *Int Endod J* 37: 425-437.
- Grawehr M, Sener B, Waltimo T, Zehnder M (2003) Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions. *Int Endod J* 36: 411-417.
- Gruythuysen R, Van Strijp G, Wu MK (2010) Long term survival of indirect pulp treatment performed in primary and permanent teeth with clinically diagnosed deep carious lesion. *J Endod* 36: 1490-1493.
- Gühring W, Barth J: Anatomie: Spezielle Biologie des Kausystems. Neuer Merkur, München, 1992, S. 15-23.
- Harris R, Nicoll AD, Adair PM, Pine CM (2004) Risk factors for dental caries in young children: A systematic review of the literature. *Community Dent Health* 21: 71-85.
- Harrison JW, Svec TA, Baumgartner JC (1978) Analysis of clinical toxicity of endodontic irrigants. *J Endod* 4: 6-11.
- Hauman CH, Love RM (2003) Biocompatibility of dental materials used in contemporary endodontic therapy: a review. Part 2. Root-canal-filling materials. *Int Endod J* 36: 75-85, 147-160.
- Hecker H, Amato M, Weiger R (2007) Die Wurzelkanalspülung. *Zahnmedizin up2date* 2: 89-108.
- Heinrich-Weltzien R, Kühnisch J (2007) Milchzahnendodontie. *Zahnmedizin up2date* 2: 145-168.
- Hellwig E, Klimek J, Attin T: Einführung in die Zahnerhaltung. Urban & Fischer, München, Jena, 2003, S. 39, 323-364, 388-435.
- Hickel R, Manhart J (2001) Longevity of restorations in posterior teeth and reasons for failure. *J Adhes Dent* 3: 45-64.
- Hilton TJ, Ferracane JL, Mancl L (2013) Comparison of CaOH with MTA for direct pulp capping. A PBRN randomized clinical trial. *J Dent Res* 92: 16-22.

- Holland R, de Souza V, Murata SS, Nery MJ, Bernabe PF, Otoboni Filho JA, Dezan Jun E (2001) Healing process of dog dental pulp after pulpotomy and pulp covering with mineral trioxide aggregate or portland cement. *Brazilian Dental Journal* 12: 109-113.
- Howley B, Seale NS, Mc Worther AG, Kerins C, Boozer KB, Lindsey D (2012) Pulpotomy versus pulpectomy for carious vital primary incisors: Randomized controlled trial. *Pediatr Dent* 34: 112-119.
- Hülsmann M: Endodontie. Thieme, Stuttgart, 2008, S. 2, 5, 19-28, 43-47, 63-68, 84-86, 126-139, 147-155, 165, 182, 225.
- Hülsmann M, Gressmann G, Schäfers F (2003) A comparative study of root canal preparation using FlexMaster and Hero 642 rotary Ni-Ti instruments. *Int Endod J* 36: 358-366.
- Huth KC, Paschos E, Hajek-Al-Khatar N, Hollweck R, Crispin A, Hickel R, Folwaczny M (2005) Effectiveness of 4 pulpotomy techniques-randomized controlled trial. *J Dent Res* 84: 1144-1148.
- Innes NPT, Stirrups DR, Evans DJP, Hall N (2006) A novel technique using preformed metal crowns for managing carious primary molars in general practice - a retrospective analysis. *Brit Dent J* 200: 451-454.
- International agency for research on cancer (IARC) (2006) Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol. Monographs on the evaluation of arcinogenic risks to humans, Volume 88: 434-436.
- Jakobson J, Xia T, Baumgartner C, Marshall JG, Beeler WJ (2002) Microbial leakage of the continuous wave of condensation. *J Endod* 28: 269-271.
- Jarrett IS, Marx D, Covey D, Karmazin M, Lavin M, Gound T (2004) Percentage of canals filled in apical cross sections - an in vitro study of seven obturation techniques. *Int Endod J* 37: 392-398.
- Joffe E (2002) Use of mineral trioxide aggregate (MTA) in root repairs. Clinical cases. *The New York State Dental Journal* 68: 34-36.
- Kagihara LE, Niederhauser VP, Stark M (2009) Assessment, management, and prevention of early childhood caries. *Journal of the American Academy of Nurse Practitioners* 21: 1-10.
- Takehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ (1965) The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*: 20, 340.
- Kawashita Y, Kitamura M, Saito T (2011) Early Childhood Caries. *Int J Dent*. ID 725320, 7 pages.
- Kim HC, Kwak SW, Cheung GS, Ko DH, Chung SM, Lee W (2012) Cyclic fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne. *J Endod* 38: 541-544.
- Klimm W: Endodontologie-Lehrbuch für Studium und Beruf. Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln, 2011, S. 3, 9-11, 15-18, 61, 74-76, 77-78, 134-142, 178-187, 189-202, 295-303.
- Kos WL, Aulozzi DP, Gerstein H (1982) A comparative bacterial microleakage study of retrofilling materials. *J Endod* 8: 355-358.
- Krämer N, Frankenberger R (2007) Endodontie im Milchgebiss. *Quint* 58: 1077-1083.
- Krämer N, Frankenberger R (2009) Füllungstherapie im Milchgebiss. *Zahnmedizin up2date* 3: 339-358.
- Krämer N, Frankenberger R (2011) Regeln zur Herstellung von konfektionierten Stahlkronen für das Milchgebiss. *Quintessenz* 62: 223-229.

- Kubota K, Golden BE, Penugonda B (1992) Root canal filling materials for primary teeth: A review of the literature. *J Dent Child* 59: 225.
- Kühnisch J, Heinrich-Weltzien R, Schäfer E (2012) Endodontie im Milchgebiss. Wissenschaftliche Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Kinderzahnheilkunde (DGKiZ) und der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ). *Oralprophylaxe & Kinderzahnheilkunde* 34: 7-10.
- Kuo C-I, Wang Y-L, Chang H-H, Huang G-F, Lin C-P, Li U-M, Guo M-K (2006) Application of Ni-Ti rotary files for pulpectomy in primary molars. *J Dent Sci* 1: 10-15.
- Kuttler Y (1955) Microscopic investigation of root apexes. *J Am Dent Assoc* 50: 544-552.
- Lares C, elDeeb M E (1990) The sealing ability of the Thermafil obturation technique. *J Endod* 16: 474-479.
- Lauenstein AS, Sieper A (2015) Kronentherapie in der Kinderzahnheilkunde. *Quintessenz* 66: 1309-1315.
- Laurent P, Camps J, About I (2012) Biodentine™ induces TGF- β 1 release from human pulp cells and early dental pulp mineralization. *Int Endod J* 45: 439-448.
- Leche W (1896) Zur Dentitionsfrage. *Anat. Anz. Jena* 11: 270.
- Limkangwalmongkol S, Burtscher P, Abbott PV, Sandier AB, Bishop BM (1991) A comparative study of the apical leakage of four root canal sealers and laterally condensed Guttapercha. *J Endod* 17: 495-499.
- Liu H, Zhou Q, Qin M (2011) Mineral trioxide aggregate versus calcium hydroxide for pulpotomy in primary molars. *Chin J Dent Res* 22: 121-125.
- Lula ECO, Monteiro-Neto V, Alves CMC, Ribeiro CCC (2009) Microbiological analysis after complete or partial removal of carious dentin in primary teeth: A randomized clinical trial. *Caries Res* 43: 354-358.
- Mani SA, Chawla HS, Tewari A, Goyal A (2000) Evaluation of calcium hydroxide and zinc oxide eugenol as root canal filling materials in primary teeth. *J Dent Child* 67: 142-147.
- Menezes R, Bramante CM, Letra A, Carvalho VGG, Garcia RB (2004) Histologic evaluation of pulpotomies in dog using two types of mineral trioxide aggregate and regular and white Portland cements as wound dressings. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 98: 376-379.
- Mortazavi M, Mesbahi M (2004) Comparison of zinc oxide and eugenol and Vitapex for root canal treatment of necrotic primary teeth. *Int J Pediatr Dent* 14: 417-424.
- Murray PE, Smith AJ, Windsor LJ, Mjör IA (2003) Remaining dentine thickness and human pulp responses. *Int Endod J* 36: 33-43.
- Muselmani B, Glockmann E, Sigusch W (2008) Die instrumentelle Aufbereitung der Wurzelkanäle – manuell oder maschinell? *ZWR* 117: 560-568.
- Muruzabal, J. Erasquin, F.C.H. Devoto (1966) A study of periapical overfilling in root canal treatment in the molar of rat. *Archives of Oral Biology* 11: 373-381.
- Naenni N, Thoma K, Zehnder M (2004) Soft tissue dissolution capacity of currently used and potential endodontic irrigants. *J Endod* 30: 785-787.
- Naik G, Hedge AM (2005) Mineral Trioxide aggregate as a pulpotomy agent in primary molars: An in vivo study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 23: 13-16.
- Nakornchai S, Banditsing P, Visetratana N (2010) Clinical evaluation of 3Mix and Vitapex as treatment options for pulpally involved primary molars. *Int J of Paed Dent* 20: 214-221.

- Nanci A: Ten Cate's Oral Histology - Pageburst on VitalSource: Development, structure and function. Elsevier, Missouri, 2007, pp. 79-85, 141-145, 191-195.
- Neo Dental International Inc: Vitapex Zusammensetzung (Internet). Zitiert am 18.08.2015. URL: http://www.neodental-intl.com/pdf/german/vitapex_manual.pdf
- Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K (2007) Outcome of primary root canal treatment: Systematic review of the literature - Part 1. Effects of study characteristics on probability of success. *Int Endod J* 40: 921-939.
- Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K (2008) Outcome of primary root canal treatment: Systematic review of the literature - Part 2. Influence of clinical factors. *Int Endod J* 41: 6-31.
- NG YL, Mann V, Gulabivala K (2011) A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: Part 1: Periapical health. *Int Endod J* 44: 583-609.
- NG YL, Mann V, Gulabivala K (2011) A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: Part 2: Tooth survival. *Int Endod J* 44: 610-625.
- Niranjani K, Prasad MG, Vasa AAK, Divya G, Thakur MS, Saujanya K (2015) Clinical Evaluation of Success of Primary Teeth Pulpotomy Using Mineral Trioxide Aggregate, Laser and Biodentine- an In Vivo Study. *J Clin Diagn Res.* 9: 35-37.
- 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.
- Opitz H, Schmid F: *Handbuch der Kinderheilkunde*. Springer, Heidelberg, 1968, S. 331-342.
- Orucoglu H, Sengun A, Yilmaz N (2005) Apical Leakage of Resin Based Root Canal Sealers with a New Computerized Fluid Filtration Meter. *J Endod* 31: 886-889.
- Özalp N, Şaroğlu 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.
- Pelka AK (2013) Das Frontzahntrauma im Milch- und Wechselgebiss. *BZB Jan/Feb*: 55-57.
- Pinky C, Shashibhushan KK, Subbareddy VV (2011) Endodontic treatment of necrosed primary teeth using two different combinations of antibacterial drugs: An in vivo study. *J Indian Soc Pedod Dent* 29: 121-127.
- Pinto AS, De Araujo FB, Franzon R, Figueiredo MC, Henz S, Garcia-Godoy F, Maltz M (2006) Clinical and microbiological effect of calcium hydroxide protection in indirect pulp capping in primary teeth. *Am J Dent* 19: 382-387.
- Pinto DN, De Sousa DL, Araujo RBR, Moreira-Neto JJS (2011) Eighteen-month clinical and radiographic evaluation of two root canal-filling materials in primary teeth with pulp necrosis secondary to trauma. *Dent Traum* 27: 221-224.
- Prabhakar AR, Sridevi E, Raju OS, Satish V (2008) Endodontic treatment of primary teeth using in combination of antibacterial drugs: An in vivo study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 26: 5-10.
- Pramila R, Muthu MS, Deepa G, Farzan JM, Rodrigues SJL (2015) Pulpectomies in primary mandibular molars: A comparison of outcomes using three root filling materials. *Int Endod J* 49: 413-421.
- Ranly DM, Garcia-Godoy F (2000) Current and potential pulp therapies for primary and young permanent teeth. *J Dent* 28: 153-161.
- Roane JB, Sabala CL, Duncanson MG (1985) The "balanced force" concept for instrumentation of curved canals. *J Endod* 11: 203-211.

- Roberts HW, Toth JM, Berzins DW, Charlton DG (2008) Mineral trioxide aggregate material use in endodontic treatment: a review of the literature. *Dent Mater* 24: 149-164.
- Rodd HD, Waterhouse PJ, Fuks AB, Fayle SA, Moffat MA (2006) Pulp therapy for primary molars. *Int J Paediatr Dent* 16: 15-23.
- Römpf H: *Römpf-Lexikon Chemie*. Thieme, Stuttgart, 1996, S. 1-10.
- Sadrian R, Coll JA (1993) A long term follow up on the retention rate of zinc oxide eugenol filler after primary tooth pulpectomy. *Pediatr Dent* 15: 249-253.
- Salomon U (2009) Konfektionierte Kronen im Milchgebiss - immer noch aktuell! *Quintessenz* 60: 829-836.
- Savani GM, Sabbah W, Sedgley CM et al. (2014) Current trends in endodontic treatment by general dental practitioners: Report of a United States national survey. *J Endod* 40: 618-624.
- Schäfer E, Zapke K (2000) Effizienz maschineller Wurzelkanalaufbereitungssysteme im Vergleich zur manuellen Instrumentierung. *Quint* 51: 115-124.
- Schatz JO, Joho JP (1994) A retrospective study of dento-alveolar injuries. *Endod Dent Traumatol* 10: 11-14.
- Schiffner U (2007) Fluorid in der Kariesprophylaxe - Grundlagen und Konzept. *ZWR* 116: 165-174.
- Schröder HE: *Orale Strukturbiologie. Entwicklungsgeschichte, Struktur und Funktion normaler Hart- und Weichgewebe der Mundhöhle und des Kiefergelenks*. Thieme, Stuttgart, 2000, S. 27-34, 293-312.
- Schwendicke F (2018) *Management of deep carious lesions*. Springer International Publishing AG, pp. 11, 12, 84, 114, 117, 118.
- Shade M (2000) Maschinelle WK-Aufbereitung mit dem HERO 642-System. *ZMK* 4: 193-197.
- Shemesh H, Wu MK, Wesselink PR (2006) Leakage along apical root fillings with and without smear layer using two different leakage models: A two-month longitudinal ex vivo study. *Int Endod J* 39: 968-976.
- Shemesh H, van den Bos M, Wu MK, Wesselink PR (2007) Glucose penetration and fluid transport through coronal root structure and filled root canals. *Int Endod J* 4: 866-872.
- Shemesh H, Souza EM, Wu MK, Wesselink PR (2008) Glucose reactivity with filling materials as a limitation for using the glucose leakage model. *Int Endod J* 41: 869-872.
- Shenkin JD (2012) Pulpectomy of necrotic primary teeth may be an effective tool in managing the primary dentition. *J Evid Based Dent Pract* 12: 39-40.
- Shipper G, Ørstavik D, Teixeira FB, Trope M (2004) An evaluation of microbial leakage in roots filled with a thermoplastic synthetic polymer-based root canal filling material (Resilon). *J Endod* 30: 342-347.
- Smith RS, Weller RN, Loushine RJ, Kimbrough WF (2000) Effect of varying the depth of heat application on the adaptability of guttapercha during warm vertical compaction. *J Endod* 26: 668-672.
- Sonntag D, Delschen S, Stachniss V (2003) Root-canal shaping with manual and rotary Ni-Ti files performed by students. *Int Endod J* 36: 715-723.
- Sönmez D, Durutürk D (2008) Ca(OH)₂ pulpotomy in primary teeth, Part 1: internal resorption as a complication following pulpotomy. *Oral Surg Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 106: 94-98.

- Souza EM, Pappen FG, Shemesh H, Bonanato-Estrela C, Bonetti-Filho I (2009) Reliability of assessing dye penetration along root canal fillings using methylene blue. *Aust Endod J* 35: 158-163.
- Spanber L, Aciero T, Cha BY (1989) Influence of entrapped air on the accuracy of leakage study using dye penetration method. *J Endod* 15: 548-551.
- Steffen R (2017) Neue Methoden und Materialien in der Kinderzahnmedizin. *Der freie Zahnarzt* 61: 58-64.
- Steffen R, van Waes H (2009) Understanding mineral trioxide aggregate / Portland-cement. A review of literature and background factors. *Eur Arch Pediatr Dent* 10: 93-97.
- Stock C, Walker R, Gulavivala K: *Endodontie*. Urban & Fischer, München, 2005, S. 3-10, 27, 74-75, 136, 141-144.
- Susini G, Pommel L, About I, Camps J (2006) Lack of correlation between ex vivo apical dye penetration and presence of apical radiolucencies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 102: 19-23.
- Takushige T, Cruz EV, Moral A, Hoshino E (2004) Endodontic treatment of primary teeth using a combination of antibacterial drugs. *Int Endod J* 37: 132-138.
- Tamse A, Katz A, Kablan F (1998) Comparison of apical leakage shown by four different dyes with two evaluating methods. *Int Endod J* 31: 333-337.
- Tepel, J (2000) Experimentelle Untersuchungen zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. Habilitationsschrift der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde. Berlin: Quintessenz Verlag
- Theilade E: The microbiology of the necrotic pulp. In: Bergenholtz G, Horsted-Bindslev P, Reit C (ed): *Textbook of Endodontology*. Blackwell Munksgaard, Oxford 2003
- Trairatvorakul C, Chunlasikaiwan S (2008) Success of pulpectomy with zinc oxide-eugenol vs calcium hydroxide/iodoform paste in primary molars: A clinical study. *Pediatric Dent* 30: 303-308.
- Tuggle ST, Anderson RW, Pantera EA et al (1989) A dye penetration study of retrofilling materials. *J Endod* 15: 122-124.
- Van der Sluis LW, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR (2007) Passive ultrasonic irrigation of the root canal: A review of the literature. *Int Endod J* 40: 415-426.
- Van Waes HJM (02/2011) Die Pulpotomie in der Milchzahnendodontie. ZWP online (Internet) Zitiert am 20.10.2017. URL: <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/endodontologie/fruehbehandlung/die-pulpotomie-der-milchzahnendodontie>
- Vianna ME, Horz HP, Gomes BP, Conrads G (2006) In vivo evaluation of microbial reduction after chemo-mechanical preparation of human root canals containing necrotic pulp tissue. *Int Endod J* 39: 484-492.
- Waterhouse PJ, Nunn JH, Whitworth JM, Soames JV (2000) Primary molar pulp therapy - histological evaluation of failure. *Int J Pediatr Dent* 10: 313-321.
- Weber T: *Memorix Zahnmedizin*. Thieme, Stuttgart, 2017, S. 24, 127-162, 404-434.
- Whitten BH, Gardiner DL, Jeansonne BG, Lemon RR (1996) Current trends in endodontic treatment: report of a national survey. *J Am Dent Assoc* 127: 1333-1341.
- Wilson AD, Clinton DJ, Miller RP (1973) Zinc oxide-eugenol cements IV microstructure and hydrolysis. *J Dent Res* 52: 253-260.
- Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR, Moorers WR (1993) Fluid transport and bacterial penetration along root canal fillings. *Int Endod J* 26: 203-208.

- Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR (1994) Fluid transport and dye penetration along root canal fillings. *Int Endod J* 27: 233-238.
- Wu MK, Kastakova A, Wesselink PR (2001) Quality of cold and warm guttapercha fillings in oval canals in mandibular premolars. *Int Endod J* 34: 485-491.
- Wu MK, Wang ME (1989) Antibody formation to dog pulp issue altered by a paste containing paraformaldehyde. *Int Endod J* 22: 133.
- Wu MK, Wesselink PR (1993) Endodontic leakage studies reconsidered. Part 1. Methodology, application and relevance. *Int Endod J* 26: 37-43.
- Xu Q, Fan MW, Fan B, Cheung GSP, Hu HL (2005) A new quantitative method using glucose for analysis of endodontic leakage. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 99: 107-111.
- Zanini M, Sautier JM, Berdal A, Simon S (2012) Biodentine induces immortalized murine pulp cell differentiation into odontoblast-like cells and stimulates biomineralization. *Endod J* 38:1220-1226.
- Zehnder M, Lehnert B, Schönenberger K, Waltimo T (2003) Spüllösungen und medikamentöse Einlagen in der Endodontie. *Schweizer Monatszeitschrift für ZM* 113: 756-763.
- Zou L, Yin SH, Liu J, Tan J, Li HL (2006) Use of calcium sulfate as internal matrix to repair furcal perforations. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Z Zhi* 24: 309-311.

8. Thesen

1. Milchzähne spielen für die Gebissentwicklung, die Phonetik und die Ernährung des Menschen eine wichtige Rolle und sollten bis zu ihrem physiologischen Ausfall erhalten werden.
2. Bei irreversibler Infizierung der Milchzahnpulpa durch Trauma oder Karies ist zur Erhaltung des Milchzahns die Wurzelkanalbehandlung die letzte Therapie der Wahl.
3. Diese Studie untersuchte in vitro den Einfluss des Wurzelkanalfüllmaterials auf die Dichtigkeit der jeweiligen Wurzelkanalfüllung unter Berücksichtigung des Krümmungswinkels der Milchzahnwurzeln.
4. Durch die Verwendung von menschlichen Milchzahnwurzeln anstelle künstlicher Präparate wurde eine größere Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den klinischen Alltag erreicht, die Methodengleichheit bei der Versuchsdurchführung stellte repräsentative Ergebnisse sicher.
5. Anhand der Bestimmung des prozentualen Anteils von Füllmaterial und Lufteinschlüssen im jeweiligen Wurzelkanal konnte nachgewiesen werden, dass sich sowohl Vitapex als auch Zinkoxid-Eugenol als Wurzelfüllmaterial für Milchzähne eignen. Es wurden im Mittel Dichtigkeitsgrade von 84,97 % bzw. 79,39 % erreicht, wobei Vitapex in der statistischen Auswertung die signifikant besseren Ergebnisse lieferte.
6. Der Krümmungswinkel der Milchzahnwurzel hatte keinen Einfluss auf die Qualität der Wurzelfüllung. In den drei untersuchten Krümmungsgraden erzielte Vitapex im Durchschnitt Füllungsgrade zwischen 83,56 % und 86,45 %, Zinkoxid-Eugenol lag im Mittel zwischen 77,33 % bzw. 80,88 %. Der Krümmungswinkel erfordert somit keine Einschränkungen in Bezug auf die Anwendung der eingesetzten Füllstoffe.
7. Die Qualität der Wurzelfüllung war abhängig von ihrer Lage, beide Materialien zeigten im apikalen Bereich signifikant schlechtere Ergebnisse (Vitapex 73,82 %, Zinkoxid-Eugenol 68,99 %) als in den koronalen Ebenen.
8. Zinkoxid-Eugenol erzielte auch in der Schnittebene 2 mit 75,63 % im Vergleich zur Ebene 4 unterdurchschnittliche Ergebnisse.
9. Die Handhabung von Zinkoxid-Eugenol ist durch das erforderliche Anmischen aufwendig.
10. Sowohl Vitapex als auch Zinkoxid-Eugenol können selbst unter idealen Bedingungen in der Regel keine hermetisch abgedichteten Wurzelfüllungen erzielen.

9. Anlagen

Tabelle 10 Varianzhomogenitätstest nach Material

	Levene- Statistik	df1	df2	Signifikanz
V	0,656	2	177	0,52
Z	1,16	2	177	0,32

Tabelle 11 Post-hoc-Test nach Bonferroni und Scheffé

Abhängige Variable	(I) KW	(J) KW	Mittlere Differenz (I)-(J)	Signifikanz
V Scheffé- Proze- dur	KW 1	KW 2	- 1,534	0,878
		KW 3	1,355	0,903
	KW 2	KW 1	1,534	0,878
		KW 3	2,889	0,631
	KW 3	KW 1	- 1,355	0,903
		KW 2	- 2,889	0,631
V Bonferroni	KW 1	KW 2	- 1,534	1,000
		KW 3	1,355	1,000
	KW 2	KW 1	1,534	1,000
		KW 3	2,889	1,000
	KW 3	KW 1	- 1,355	1,000
		KW 2	- 2,889	1,000
Z Scheffé- Proze- dur	KW 1	KW 2	0,906	0,962
		KW 3	3,545	0,553
	KW 2	KW 1	- 0,906	0,962
		KW 3	2,638	0,720
	KW 3	KW 1	- 3,545	0,553
		KW 2	- 2,638	0,720
Z Bonferroni	KW 1	KW 2	0,906	1,000
		KW 3	3,545	0,831
	KW 2	KW 1	- 0,906	1,000
		KW 3	2,638	1,000
	KW 3	KW 1	- 3,545	0,831
		KW 2	- 2,638	1,000

Tabelle 14 Varianzhomogenitätstest für Vitapex

Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
7,609	3	176	0,000

Tabelle 15 Post-hoc-Test nach Tamhane2 für Vitapex

(I) Millimeter	(J) Millimeter	Mittlere Differenz (I)-(J)	Signifikanz
1 mm	2 mm	- 10,688	0,035
	3 mm	- 15,732	0,000
	4 mm	- 18,180	0,000
2 mm	1 mm	10,688	0,035
	3 mm	- 5,044	0,418
	4 mm	- 7,492	0,052
3 mm	1 mm	15,732	0,000
	2 mm	5,044	0,418
	4 mm	- 2,448	0,887
4 mm	1 mm	18,180	0,000
	2 mm	7,492	0,052
	3 mm	2,448	0,887

Tabelle 18 Varianzhomogenitätstest für Zinkoxid-Eugenol

Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
1,049	3	176	0,372

Tabelle 19 Post-hoc-Test nach Bonferroni und Scheffé für Zinkoxid-Eugenol

	(I) Millimeter	(J) Millimeter	Mittlere Differenz (I)-(J)	Signifikanz
Scheffe-Prozedure	1 mm	2 mm	- 6,632	0,290
		3 mm	- 15,366	0,000
		4 mm	- 19,612	0,000
	2 mm	1 mm	6,632	0,290
		3 mm	- 8,734	0,092
		4 mm	- 12,980	0,003
	3 mm	1 mm	15,366	0,000
		2 mm	8,734	0,092
		4 mm	- 4,246	0,672
	4 mm	1 mm	19,612	0,000
		2 mm	12,980	0,003
		3 mm	4,246	0,672
Bonferroni	1 mm	2 mm	- 6,632	0,321
		3 mm	- 15,366	0,000
		4 mm	- 19,612	0,000
	2 mm	1 mm	6,632	0,321
		3 mm	- 8,734	0,068
		4 mm	- 12,980	0,001
	3 mm	1 mm	15,366	0,000
		2 mm	8,734	0,068
		4 mm	- 4,246	1,000
	4 mm	1 mm	19,612	0,000
		2 mm	12,980	0,001
		3 mm	4,246	1,000

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Alle Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis wurden eingehalten; es wurden keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht.

Leipzig, Oktober 2019

Franziska Fichtler

Erklärung über frühere Promotionsversuche

Ich erkläre, dass ich mich an keiner anderen Hochschule einem Promotionsversuch unterzogen bzw. eine Promotion begonnen habe.

Ich erkläre, die Angaben wahrheitsgemäß gemacht und die wissenschaftliche Arbeit an keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht zu haben.

Leipzig, Oktober 2019

Franziska Fichtler

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Franziska Fichtler
Geburtsdatum: 11.08.1988
Geburtsort: Zeitz
Staatsangehörigkeit: deutsch
Anschrift: Inselstraße 28, 04103 Leipzig

Schulische und akademische Ausbildung

1995 - 1999 5. Grundschule, Zeitz
1999 - 2007 Christophorusschule Droyßig
Juli 2007 Allgemeine Hochschulreife
2007 - 2013 Studium der Zahnmedizin an der
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Dezember 2013 Approbation als Zahnärztin

Beruflicher Werdegang

Januar 2014 - Januar 2016 Vorbereitungsassistentin Zahnarztpraxis André Iwan,
Schönebeck
Februar 2016 – April 2017 angestellte Zahnärztin Praxisgemeinschaft Dentale,
Leipzig
seit Mai 2017 klinische Leiterin biodentis GmbH,
Leipzig

Leipzig, Oktober 2019

Franziska Fichtler

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Frau Univ.-Prof. Dr. med. dent. Katrin Bekes für die umfassende Betreuung und die langjährige Unterstützung bei der Anfertigung der Dissertation, insbesondere auch nach ihrem Wechsel an die Universität Wien.

Herrn Univ.-Prof. Dr. med. dent. Hans-Günter Schaller danke ich sehr für die Übernahme der Betreuung und die freundliche Unterstützung.

Großer Dank gilt auch der Universitätspoliklinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie und der die Doktoranden betreuenden Abteilung. Hervorzuheben sind die Mitarbeiter der Sektion Präventive Zahnheilkunde und Kinderzahnheilkunde für ihre Beratung, Hilfsbereitschaft und die Bereitstellung von Materialien und Räumlichkeiten.

Meinen Eltern danke ich für ihre bedingungslose Liebe, tatkräftige Hilfe und moralische Unterstützung. Ihr Einsatz bedeutet mir unendlich viel. Ohne sie wäre ich nicht der Mensch, der ich heute bin, dafür bin ich ihnen ewig dankbar.