

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

Vergleichende In-Vitro-Studie zur Applikation von Kalziumhydroxid-Einlagen mit
verschiedenen Techniken und Medikamenten

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
für Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Katharina Pietzarka, geb. Dorra
aus Bochum.

Dortmund, 2014

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. H. K. Kroemer
I. Berichterstatter:	Prof. Dr. Michael Hülsmann
II. Berichterstatter/in:	PD Dr. Nikolaus Gersdorff
III. Berichterstatter/in:	Prof. Dr. Martin Oppermann
Tag der mündlichen Prüfung:	25.03.2014

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Ziele einer Wurzelkanalbehandlung	1
1.2 Medikamentöse Einlagen	2
1.3 Kalziumhydroxid.....	3
1.3.1 Chemie	3
1.3.2 Wirkung	4
1.3.3 Darreichungsformen.....	6
1.4 Ziele der Studie	6
2. Material und Methoden	8
3. Ergebnisse.....	21
3.1 Kriterium A „Vollständigkeit der Füllung“.....	24
3.2 Kriterium B „Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt“	26
3.3 Kriterium C „Überpressung“	28
3.4 Kriterium D „Größe der Luftblasen“.....	30
3.5 Kriterium E „Füllung des apikalen Kanalabschnitts“.....	32
4. Diskussion.....	34
4.1 Diskussion der Methode	34
4.2 Diskussion der Ergebnisse.....	37
4.3 Schlussfolgerungen.....	41
5. Zusammenfassung	42
6. Literaturverzeichnis	44

1. Einleitung

1.1 Ziele einer Wurzelkanalbehandlung

Ziel der Wurzelkanalbehandlung ist die langfristige Erhaltung des Zahnes als funktionsfähige Kaueinheit und Erhaltung oder Wiederherstellung gesunder periradikulärer Strukturen (Stellungnahme der DGZMK und der DGZ 2000, European Society of Endodontology 2006). Als langfristiger Erfolg ist es hierbei anzusehen, wenn der behandelte Zahn nach vier Jahren keine klinischen Symptome oder röntgenologischen periapikalen Veränderungen aufweist (European Society of Endodontology 2006).

Um diesen Behandlungserfolg zu erreichen, müssen im Rahmen der Wurzelkanalbehandlung vitales bzw. nekrotisches Pulpagewebe sowie Debris und Mikroorganismen möglichst vollständig entfernt werden. Bei einer vitalen, irreversibel entzündeten Pulpa sind in den tieferen Schichten des pulpalen Gewebes keine Mikroorganismen vorhanden. Während der Behandlung muss demnach eine iatrogene Infektion des primär sterilen Endodonts unbedingt vermieden werden (Prinzip der Asepsis). Im Fall einer Pulpanekrose ist hingegen von einer mikrobiellen Infektion des nekrotischen Pulpagewebes auszugehen, so dass während der Behandlung eine möglichst umfassende Keimreduktion im Vordergrund steht (Prinzip der Antisepsis).

Das Wurzelkanalsystem muss für die Reinigung und Obturation ausgeformt werden (Löst et al. 1992, Trope und Bergenholtz 2002, Rödiger und Hülsmann 2003). Hierbei ist zu beachten, dass die Präparationsform nicht von der natürlichen Kanalanatomie abweicht und weder eine Über- noch eine Unterinstrumentierung stattfinden. Die apikale Konstruktion sollte erhalten bleiben und eine konische Präparationsform gewählt werden.

Das Ziel der mechanischen Wurzelkanalpräparation ist hierbei neben der Entfernung von Bakterien und infiziertem Kanalinhalt sowie des Pulpagewebes (Hülsmann 2001, 2002) die konische Ausformung des Wurzelkanals. Hiermit wird das Ziel verfolgt, eine dauerhafte und wandständige Wurzelkanalfüllung zu ermöglichen. Durch diesen Verschluss soll den Bakterien der Raum und das Substrat zur Vermehrung entzogen und eine Reinfektion durch neue Bakterien verhindert werden (Löst et al. 1992).

Im dreidimensionalen Wurzelkanalsystem kommen Bakterien jedoch nicht nur in den Haupt- und Seitenkanälen vor. Sie sind außerdem in der Lage, das Wurzelkanalentin

unterschiedlich tief entlang der Dentintubuli zu penetrieren. Da die Penetrationstiefe von der Art des Keims und der Dauer der Dentininfektion abhängt, kann die Keimfreiheit nicht durch eine rein mechanische Präparation und Reinigung erreicht werden. Studien zeigen, dass die Anzahl der Bakterien durch die mechanische Reinigung nur um den Faktor 100 bis 1000 gesenkt werden kann (Byström und Sundqvist 1981). Beispiele für die verschiedenen Penetrationstiefen sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Keim	Penetrationstiefe in μm	Quelle
diverse	50-200	Ando und Hoshino 1990
<i>Prevotella intermedia</i>	26	Berkiten et al. 2000
<i>Streptococcus sanguis</i>	380	Berkiten et al. 2000
<i>Enterococcus faecalis</i>	400	Schäfer 2002
diverse	0-375	Peters et al. 2001

Tabelle 1: Penetrationstiefen verschiedener Keime (*in vitro*)

1.2 Medikamentöse Einlagen

Verschiedene Studien untersuchten die Langzeitprognose endodontisch behandelte Zähne, welche ein- oder mehrzeitig endodontisch behandelt wurden. Übersichtsarbeiten zu diesem Thema kommen einheitlich zu dem Schluss, dass kein Unterschied im Hinblick auf den Erfolg einer ein- oder zweizeitigen endodontischen Behandlung besteht (Figini et al. 2008, Naito 2008, Su et al. 2011).

Allerdings können andere Gründe wie Zeitmangel, akute Beschwerden oder Fisteln dazu führen, dass die Behandlung in mehreren Terminen durchgeführt werden muss. In diesen Fällen muss dafür Sorge getragen werden, dass sich keine Bakterien in den bereits desinfizierten Wurzelkanälen vermehren. Da allerdings weder durch die mechanische Präparation der Wurzelkanäle noch durch eine anschließende desinfizierende Spüllösung eine absolute Keimfreiheit erreicht werden kann (Law und Messer 2004) und die Bakterien ohne einen Verschluss des Wurzelkanals durch Vermehrung schnell wieder ihre ursprüngliche Anzahl erreichen (Byström und Sundqvist 1985), sollten die Wurzelkanäle zwischen den Behandlungsterminen mit einer antimikrobiell wirksamen Einlage versehen werden.

Zielstellung der Behandlung mit einer medikamentösen Einlage ist vorrangig die Abtötung und Verhinderung der Vermehrung von Bakterien, welche die vorangegangene chemische und mechanische Reinigung überlebt haben. Weitere Behandlungsziele sind die Verhinderung entzündlicher Wurzelresorptionen sowie die Reduktion und Hei-

lung periapikaler Entzündungsprozesse. Darüber hinaus kann durch einen physikalischen Verschluss des Wurzelkanals die Reinfektion des endodontischen Systems verhindert werden (Byström et al. 1985).

Die verwendeten Medikamente für intrakanaläre Einlagen können entsprechend ihrer Inhaltsstoffe klassifiziert werden in

- phenolhaltige Biozide,
- nicht-phenolhaltige Biozide,
- Antibiotika und
- Kalziumhydroxid.

1.3 Kalziumhydroxid

Der erste dokumentierte Einsatz von Kalziumhydroxid im Rahmen einer Wurzelkanalbehandlung erfolgte im Jahr 1920 (Herrmann 1920). Im Laufe der folgenden Jahre weiteten sich die Einsatzgebiete von Kalziumhydroxid in der Zahnmedizin immer weiter aus. So wurden in den 1930er Jahren erste Fälle erfolgreicher Vitalerhaltung der Pulpa mit Kalziumhydroxid dokumentiert. Inzwischen wird Kalziumhydroxid auch

- zur Apexifikation der Wurzelspitze nach Trauma (Cvek und Sundström 1974),
- bei der Amputation der exponierten Pulpa (Jensen 1963, Teixeira et al. 2001),
- zur Prävention und Behandlung interner und externer Wurzelresorptionen (Carrotte 2004) und
- zur direkten und indirekten Überkappung (Faraco und Holland 2001, Tziafas et al. 2002, Accorinte et al. 2008) eingesetzt.

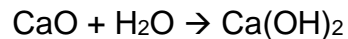
Darüber hinaus ist Kalziumhydroxid inzwischen das am häufigsten verwendete intrakanaläre Medikament (Lee et al. 2009).

1.3.1 Chemie

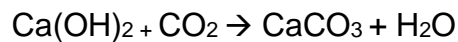
Die Entstehung von Kalziumhydroxid ist ein chemischer Prozess. Wird Kalkstein (CaCO_3) auf eine Temperatur von 900°C bis 1.200°C erhitzt, so entstehen Kalziumoxid (CaO) und Kohlendioxid (CO_2).



Das entstandene Kalziumoxid ist stark ätzend. Wird es mit Wasser (H₂O) gemischt, entsteht Kalziumhydroxid (Ca(OH)₂).



Kalziumhydroxid ist ein weißes und geruchloses Pulver mit einer schlechten Löslichkeit. Es ist stark basisch mit einem pH-Wert zwischen 12,5 und 12,8 (Fava und Saunders 1999) und wirkt somit stark antibakteriell. Die antibakterielle Wirkung wird durch die Freisetzung von Ca²⁺- und OH⁻-Ionen bedingt (Estrela 1995). Die Freisetzung kann jedoch durch andere chemische Reaktionen reduziert oder unterdrückt werden. So kann z. B. durch den Kontakt mit Kohlendioxid (CO₂) oder Kohlenstofftrioxid (CO₃) Kalziumkarbonat (CaCO₃) entstehen.



In dieser Reaktion werden alle freien Ca²⁺-Ionen verbraucht und das entstandene Kalziumkarbonat hat keinerlei biologische oder antimikrobielle Wirkung mehr (Estrela et al. 1995).

Die schlechte Löslichkeit von Kalziumhydroxid (Athanasiadis et al. 2007) wird vor dem Hintergrund der Bedeutung der Freisetzung von Ca²⁺- und OH⁻-Ionen zum Vorteil, da es eine längere Zeit dauert, bis das Kalziumhydroxid bei direktem Kontakt mit Gewebeflüssigkeit aufgelöst wird (Fava und Saunders 1999). Durch die Vermengung des Kalziumhydroxids mit verschiedenen Trägersubstanzen entstehen Kalziumhydroxidpasten, welche je nach Trägersubstanz ihre Ca²⁺- und OH⁻-Ionen freisetzen. Hierfür bieten sich wässrige Trägersubstanzen für eine schnelle Freisetzung, hochviskose Stoffe für eine langsamere und gleichmäßige Freisetzung sowie ölige Stoffe an (Fava und Saunders 1999).

1.3.2 Wirkung

Die Wirkung von Kalziumhydroxidpasten kann in eine physikalische und eine chemische Wirkung unterteilt werden. Die physikalische Wirkung erfolgt, indem die Paste blasenfrei und wandständig in den Wurzelkanal eingebracht wird und so den Bakterien der Raum und das Substrat zur Vermehrung entzogen wird (Siqueira und de Uzeda 1997). Die physikalische Wirkung setzt jedoch eine blasenfreie und vollständige Füllung des Wurzelkanals bis zum Foramen physiologicum voraus. Die Extrusion der Kalziumhydroxidpaste über das Foramen apicale hinaus sollte jedoch vermieden werden,

da ansonsten das Risiko von Knochennekrosen und Entzündungen des Weichgewebes (Shahravan et al. 2012) oder von Nekrosen der Gingiva (De Bryne et al. 2000) besteht.

Die chemische Wirkung bezieht sich hauptsächlich auf die Freisetzung von Ca^{2+} - und OH^- -Ionen. Diese Freisetzung führt zu einem starken Anstieg des pH-Wertes im Wurzelkanal und im umgebenden Dentin, was die meisten Mikroorganismen nicht tolerieren (Gomes et al. 2002). Ein Anstieg des pH-Wertes durch die Diffusion der Hydroxylionen wird durch die Pufferkapazität des Dentins verhindert (Rehman et al. 1996). Erst nach einer Woche konnte ein pH-Wert von 9 im inneren Dentin nachgewiesen werden (Siqueira und Lopes 2002).

Ähnlich wie Natriumhypochlorit ist auch Kalziumhydroxid in der Lage, sowohl vitales als auch nekrotisches Gewebe aufzulösen (Hand et al. 1978, Andersen et al. 1992, Yang et al. 1995, Naenni et al. 2004). Studien haben eine verbesserte Löslichkeit von nekrotischem Gewebe durch Natriumhypochlorit nach einer Vorbehandlung mit Kalziumhydroxid nachgewiesen (Türkün und Cengiz 1997).

Ein weiterer Vorteil von Kalziumhydroxid ist die Hartgewebe induzierende Wirkung, welche man sich besonders bei der Vitalerhaltung der Pulpa und der Behandlung der apikalen Parodontitis zunutze macht (Fava und Saunders 1999, Carrotte 2004, Fernandes et al. 2008).

Jedoch lassen sich durch Kalziumhydroxid nicht alle Bakterien eliminieren. So gilt z. B. *Enterococcus faecalis* als resistent gegenüber Kalziumhydroxid (Byström und Sundqvist 1985). Dieser ist sehr häufig bei der Revision gescheiterter Wurzelkanalbehandlungen nachzuweisen (Molander et al. 1998, Pinheiro et al. 2003, Gomes et al. 2008, Rôças et al. 2008). Verschiedene Studien empfehlen daher das Anmischen der Kalziumhydroxidpaste mit Natriumhypochlorit oder mit Chlorhexidin (Podbielski et al. 2003, Zehnder et al. 2003). Die Wirksamkeit des Kalziumhydroxids wird durch diese Mischung nicht beeinträchtigt (Haenni et al. 2003). Waltimo konnte hingegen nachweisen, dass Kalziumhydroxid die antibakterielle Wirksamkeit von Chlorhexidin zwar verringert, die Kombination aus beiden Medikamenten jedoch in Bezug auf die Keimreduktion immer noch wirksamer ist als Kalziumhydroxid alleine (Waltimo et al. 1999).

1.3.3 Darreichungsformen

Um die Applikation des Kalziumhydroxids für den Anwender zu vereinfachen, wird das Kalziumhydroxid nicht in Pulverform, sondern mittels einer Trägersubstanz als Kalziumhydroxidpaste am Markt angeboten.

Als Trägersubstanzen bieten sich Flüssigkeiten an, die:

- eine langsame Diffusion bei geringer Löslichkeit des Kalziumhydroxids ermöglichen,
- eine gleichmäßige Freisetzung der Ionen über einen längeren Zeitraum ermöglichen und
- die Bildung von Hartgewebe nicht behindern (Fava und Saunders 1999).

Somit wäre die einfachste Form der Kalziumhydroxidpaste die Anreicherung von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit H_2O bis zur Erreichung der gewünschten Viskosität. Diese Kalziumhydroxidpaste ist jedoch nicht wirklich geeignet, da sie weder röntgenopak ist noch die gewünschten physiko-chemischen Eigenschaften aufweist (Leonardo et al. 1993). Daher wurden in einer Übersichtsarbeit die antibakteriellen Eigenschaften des Kalziumhydroxids in Kombination mit unterschiedlichen Trägersubstanzen und weiteren additiven Substanzen untersucht (Fava und Saunders 1999). Hierbei stellte sich heraus, dass die Dissoziation der Ca^{2+} - und OH^- -Ionen entscheidend für den Wirkmechanismus des Kalziumhydroxids sind. Da mit der Trägersubstanz die Geschwindigkeit der Dissoziation und damit die Löslichkeit und Resorption der Kalziumhydroxidpaste beeinflusst werden kann (Fava und Saunders 1999), muss die Trägersubstanz als maßgeblich für die Wirksamkeit der Kalziumhydroxidpaste betrachtet werden.

1.4 Ziele der Studie

Kalziumhydroxid ist in der modernen Zahnheilkunde ein unverzichtbares Hilfsmittel geworden. Dies liegt im Wesentlichen an dem in Kapitel 1.3 dargestellten breiten Anwendungsspektrum. Darüber hinaus sind die antimikrobielle und die physikalische Wirksamkeit (siehe Kapitel 1.3.2) bei gleichzeitiger geringer Toxizität (Itoh et al. 1999) ein Grund für die Rolle des Kalziumhydroxids in der modernen Zahnheilkunde.

Aufgrund dieser positiven Eigenschaften und dem breiten Anwendungsspektrum scheint es nicht verwunderlich, dass bei 636 befragten Endodontologen Kalziumhydroxid mit 39,8% - 65,9 % das am meisten genutzte Medikament bei spezifischen Anwendungsfällen war (Lee et al. 2009).

Das Ziel der vorliegenden Studie war es daher, die Ergebnisqualität verschiedener Applikationsmethoden für Kalziumhydroxid sowie unterschiedliche Kalziumhydroxid-Medikamente in standardisierten künstlichen Wurzelkanälen zu untersuchen.

2. Material und Methoden

Die Versuchsdurchführung lehnt sich an den Versuchsaufbau von Braun und Nolden aus dem Jahr 1999 (Braun und Nolden 1999) an.

Für die Versuche wurden 160 konfektionierte Wurzelkanalmodelle aus Epoxidharz mit einem Krümmungswinkel von 45° (VDW, München) verwendet (Abbildung 1). Die Kunststoffmodelle wurden mit Hilfe eines Reamers der ISO-Größe 10 (Omnident Dentalhandelsgesellschaft, Rodgau) vor ihrer Verwendung auf eine apikale Durchgängigkeit des Kanals überprüft. Modelle, die keinen durchgängigen Wurzelkanal aufwiesen, wurden aussortiert. Vor der Präparation betrug die Kanallänge der Kunststoffmodelle 18 mm.

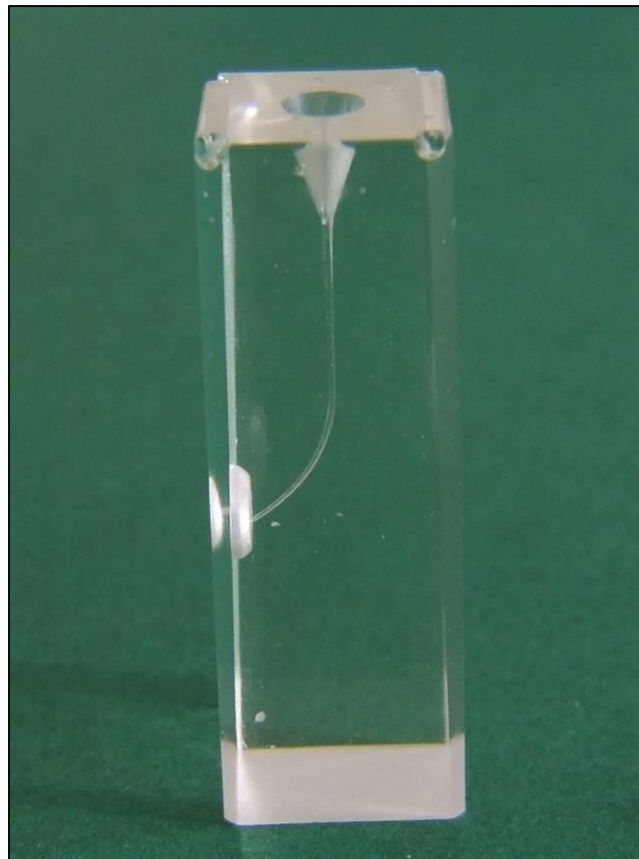


Abbildung 1: Unbearbeitetes Wurzelkanalmodell (VDW)

Von diesen Wurzelkanalmodellen wurden jeweils 80 Stück mit Hilfe von Nickel-Titan-Instrumenten (FlexMaster, VDW) bis zur Größe 35 und 80 Stück bis zur Größe 45 präpariert. Die Präparation mit dem FlexMaster-System (VDW) (Abbildung 2) wurde

anhand der o. g. Aufteilung in Größe 35 und Größe 45 in verschiedenen Teilschritten gemäß Tabelle 2 durchgeführt.

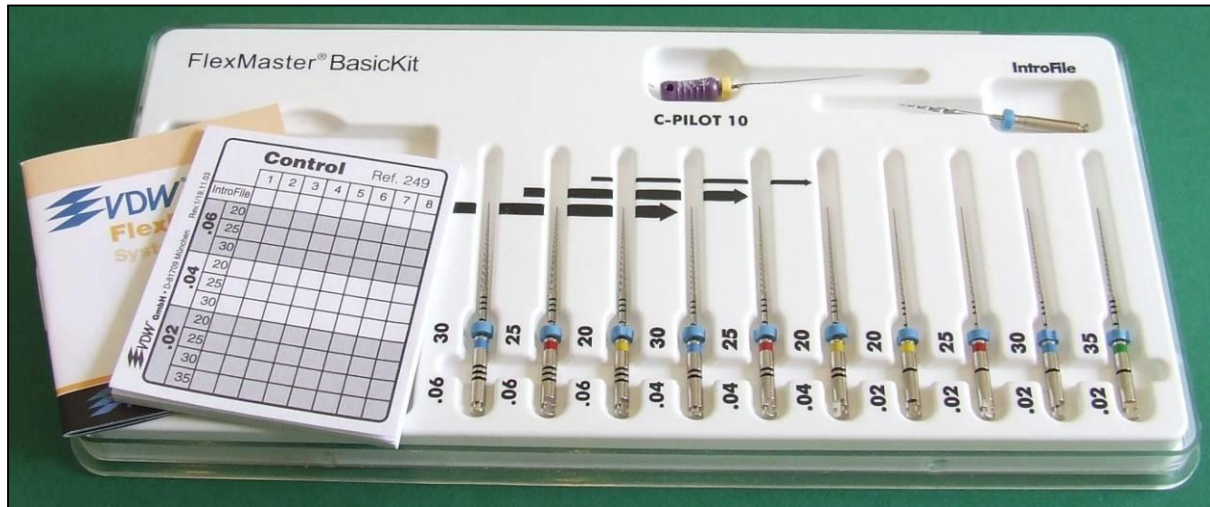


Abbildung 2: FlexMaster BasicKit (VDW)

FlexMaster-Instrument	Eindringtiefe Größe 35	Eindringtiefe Größe 45
Intro Feile	9,0 mm	9,0 mm
06/30	9,0 mm	9,0 mm
06/25	10,0 mm	10,0 mm
06/20	11,0 mm	11,0 mm
04/30	13,0 mm	13,0 mm
04/25	13,5 mm	13,5 mm
04/20	15,5 mm	15,5 mm
02/20	17,0 mm	17,0 mm
02/25	17,5 mm	17,5 mm
02/30	17,5 mm	17,5 mm
02/35	17,5 mm	17,5 mm
02/40	-	17,5 mm
02/45	-	17,5 mm

Tabelle 2: Standardisierte Präparation der künstlichen Wurzelkanäle

Nach jedem Instrumentenwechsel wurde der Kanal des Kunststoffmodells mit jeweils 2 ml 1%iger Natriumhypochlorit-Lösung gespült, um eine Blockade des Kanals zu vermeiden. Zusätzlich wurde der Kanal nach jedem Instrument mit einem Reamer der ISO-Größe 10 (Omnicent Dentalhandelsgesellschaft) bis 1 mm über das Foramen hinaus auf Gängigkeit überprüft.

Anschließend erfolgte die randomisierte Aufteilung der Proben gemäß der Präparationsgrößen 35 und 45 in zwei Hauptgruppen (n = 80), die wiederum in jeweils vier Untergruppen (n = 20) aufgeteilt wurden.

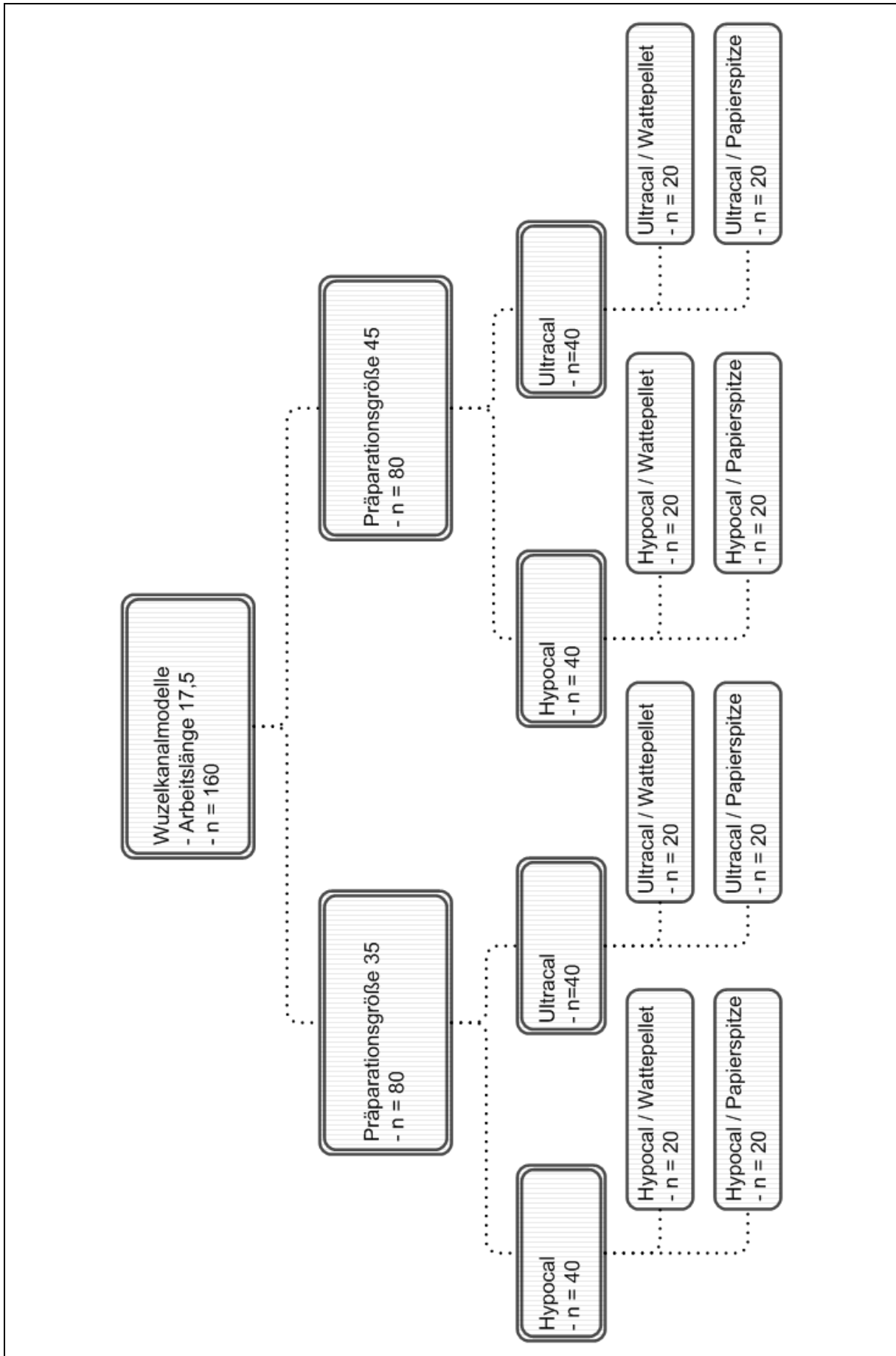


Abbildung 3: Versuchsaufbau der Studie

Die Applikation der Kalziumhydroxid-Paste erfolgte für beide Präparationsgrößen gemäß des in Abb. 3 dargestellten Versuchsaufbaus:

- Die erste Untergruppe wurde mit Hypocal (Merz Dental, Lütjeburg) gefüllt. Die Füllung erfolgte, indem das Hypocal 3mal appliziert und anschließend mit einem Wattepellet (Abbildung 4) verdichtet wurde.

Diese Applikationsart wird im Folgenden als „Hypocal/Wattepellet“ oder „HW“ abgekürzt.

- Die zweite Untergruppe wurde mit Hypocal (Merz Dental) gefüllt. Die Füllung erfolgte, indem das Hypocal 3mal appliziert und anschließend mit einer Papierspitze (Omnicent Dentalhandelsgesellschaft) (Abbildung 4) im Kanal verteilt wurde. Die Papierspitze wurde bei der Präparationsgröße 35 als ISO-Größe 30 und bei der Präparationsgröße 45 als ISO-Größe 40 gewählt. Das Hypocal wurde erneut appliziert und abschließend koronal mit einem Wattepellet verdichtet.

Diese Applikationsart wird im Folgenden als „Hypocal/Papierspitze“ oder „HP“ abgekürzt.

- Die dritte Untergruppe entspricht im Vorgehen der ersten Untergruppe jedoch wurde an Stelle von Hypocal (Merz Dental) Ultracal XS (Ultradent Products Inc., South Jordan, Utah, USA) appliziert.

Diese Applikationsart wird im Folgenden als „Ultracal/Wattepellet“ oder „UW“ abgekürzt.

- Die vierte Untergruppe entspricht im Vorgehen der zweiten Untergruppe jedoch wurde auch hier anstelle von Hypocal (Merz Dental) Ultracal XS (Ultradent Products Inc., South Jordan, Utah, USA) appliziert.

Diese Applikationsart wird im Folgenden als „Ultracal/Papierspitze“ oder „UP“ abgekürzt.



Abbildung 4: Wattlepellets (l.) und Papierspitzen (r.)

Der Unterschied zwischen den Medikamenten besteht nicht in den Wirkstoffen, sondern in der Zusammensetzung (Tabelle 3). Bei Ultracal (Ultradent Products Inc.) handelt es sich um eine 35%ige Kalziumhydroxid-Paste (Ultradent 2006), wohingegen Hypocal (Merz Dental GmbH) ein Anteil von 45% Kalziumhydroxid enthält (Merz Dental 2013). Ultracal (Abbildung 6) weist eine geringe Viskosität auf und kann somit durch eine Injektionskanüle der Größe 30 (Außendurchmesser 0,3 mm) in den Kanal appliziert werden. Hypocal (Abbildung 5) besitzt eine höhere Viskosität und wird mit Hilfe einer Kanüle der Größe 90 (Außendurchmesser 0,9 mm) appliziert. Die jeweiligen Kanülen werden durch den Hersteller beigelegt.

Medikament	Feststoff	Menge in g je 100g Medikament	Quelle
Ultracal XS			
	Kalziumhydroxid	35	Ultradent 2006
	Bariumsulfat	2	Ultradent 2006
	Wasser	unbekannt	Komabayashi et al. 2010
	Additive	unbekannt	Komabayashi et al. 2010
Hypocal			
	Kalziumhydroxid	45	Merz Dental 2013
	Bariumsulfat	5	Merz Dental 2013
	Wasser	48	Bobrowski 2013
	Additive	2	Bobrowski 2013

Tabelle 3: Inhaltsstoffe der Medikamente



Abbildung 5: Hypocal mit Injektionskanüle der Größe 90



Abbildung 6: UltraCal XS mit Injektionskanüle der Größe 30

Um zu gewährleisten, dass sich kein “Trainingseffekt” bzw. kein “Gewöhnungseffekt” des Behandlers in den verschiedenen Füllmethoden einstellt, wurden die verschiedenen Applikationsmethoden in willkürlicher Reihenfolge durchgeführt. Das Füllen geschah mit Hilfe der Applikationsvorrichtung (Abbildung 7), welche bereits in einer ähnlichen Studie (Staemmler 2012) verwendet wurde. Diese Applikationsvorrichtung bestand aus einer Filmdose, welche mit Silikon (Silaplast Dentax GmbH & Co. KG, Ettlingen) gefüllt war. Die Applikationsvorrichtung konnte ein Wurzelkanalmodell aufnehmen, wodurch eine mögliche Sichtkontrolle der Applikation während der Versuchsdurchführung verhindert wurde. Somit herrschten im Versuch die gleichen Sichtbedingungen wie auch in der realen Behandlung.

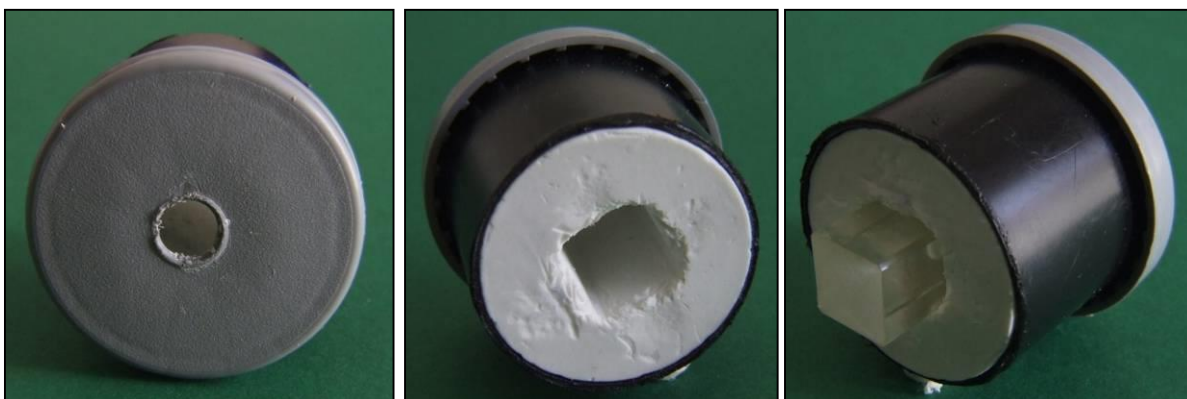


Abbildung 7: Applikationsvorrichtung zur Füllung der Wurzelkanalmodelle

Das Kunststoffmodell wurde im apikalen Bereich noch mit einem Silikonstopfen (Abbildung 8) versehen, welcher locker mit Tesafilm befestigt wurde, um einen apikalen Stopp zu gewährleisten, der sonst bei den Wurzelkanalmodellen nicht vorhanden wäre. Diese apikale Barriere war notwendig, da Vorversuche zeigten, dass ohne einen apikalen Stopp in jedem Fall überpresst wurde. Andere Methoden einer apikalen Barriere erwiesen sich in Vorversuchen als ungeeignet, da das reine Verkleben der Mulde

mit Tesafilm keine ausreichende Barriere war, und ein Verkleben mit Sekundenkleber dazu führte, dass überhaupt nicht mehr überpresst werden konnte (Staemmler 2012).

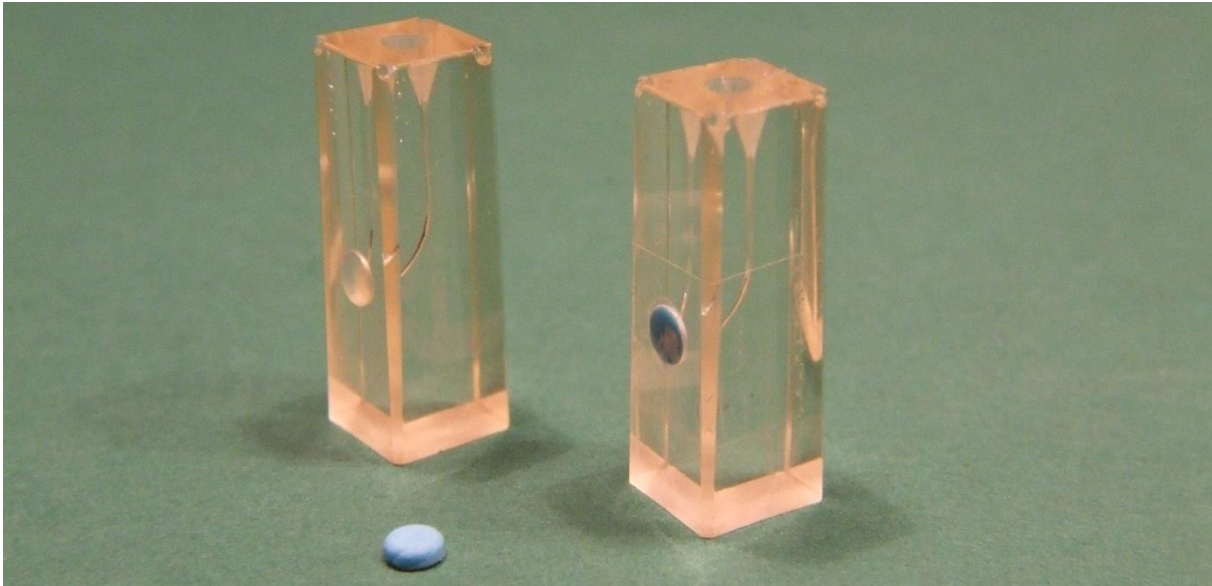


Abbildung 8: Apikaler Stopp für das Wurzelkanalmodell



Abbildung 9: Röntgenkörper (links ohne, rechts mit Wurzelkanalmodell)

Nach dem Befüllen der Kunststoffmodelle mussten diese geröntgt werden. Dies geschah mit Hilfe eines nach DIN 6868-51/-5 (Deutsches Institut für Normung 2001) genormten Röntgenkörpers (Quadrat, Typ dent/digitest, Zorneding), in dem die Wurzelkanalmodelle eingespannt wurden. Für die Aufnahmen wurde das digitale Röntgengerät Elitys Trophy (Trophy Radiologie SA, Marne-la-Vallée, Frankreich) verwendet. Der Röntgentubus lag während der Aufnahmen direkt auf dem Röntgenkörper auf, so dass sich ein Abstand von ca. 0,5 cm zum Kunststoffmodell ergab. Durch seine Position im Röntgenkörper befand sich der CCD-Sensor in ca. 0,2 cm Entfernung zum

Kunststoffmodell. Das Röntgengerät wurde für die Aufnahmen auf 70 KV und 0,05 s eingestellt.

Die Röntgenaufnahmen wurden hinsichtlich der Ergebnisqualität untersucht und anhand eines Score-Systems bewertet (Tab. 4). Das verwendete Score-System geht auf Arbeiten von Staehle et al. (1997) zurück und wurde leicht modifiziert. Es besteht aus den 5 Kriterien „Vollständigkeit der Füllung“, „Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt“, „Überpressung“, „Größe der Luftblasen“ und „Füllung des apikalen Kanalabschnitts“, die überprüft und gemäß den in Tabelle 4 angegebenen Kategorien bewertet wurden. Beispiele der einzelnen Kategorien können den Abbildung 10 bis 21 entnommen werden.

Kriterium	Score	Ausprägung
A Vollständigkeit der Füllung	I	> $\frac{2}{3}$ des Kanals oder vollständig gefüllt
	II	Mehr als $\frac{1}{3}$ aber weniger als $\frac{2}{3}$ gefüllt
	III	< $\frac{1}{3}$ des Kanals gefüllt
B Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt	I	Keine Lufteinschlüsse im apikalen Bereich
	II	Lufteinschlüsse im apikalen Bereich
C Überpressung	I	Nein
	II	Ja
D Größe der Luftblasen	I	< 1 mm
	II	1 mm – 3 mm
	III	3 mm
E Füllung des apikalen Kanalabschnitts	I	Ja
	II	Nein

Tabelle 4: Das in der vorliegenden Studie verwendete Score-System

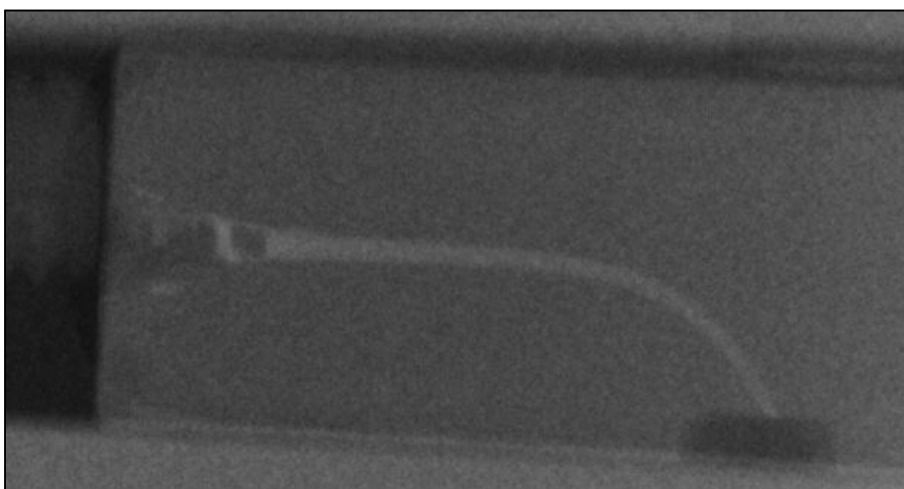


Abbildung 10: Kriterium A (Vollständigkeit der Füllung) Score I: Mehr als $\frac{2}{3}$ des Kanals gefüllt oder vollständig gefüllt

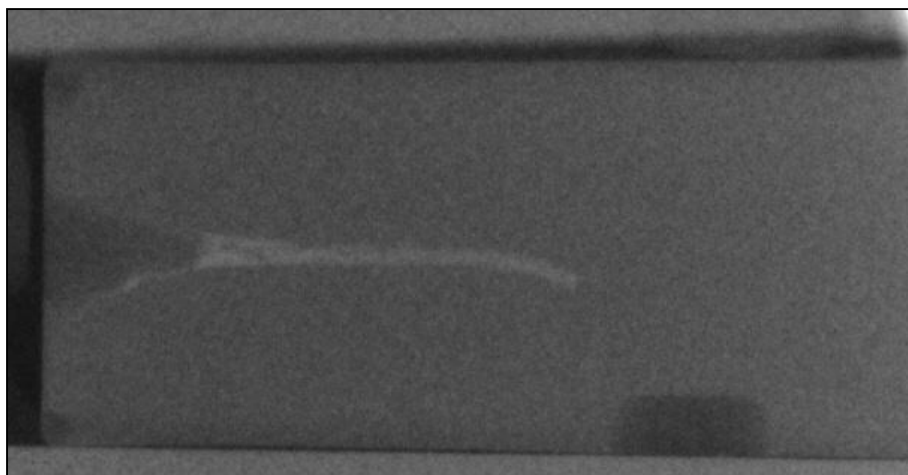


Abbildung 11: Kriterium A (Vollständigkeit der Füllung) Score II: Mehr als $\frac{1}{3}$, aber weniger als $\frac{2}{3}$ des Kanals gefüllt

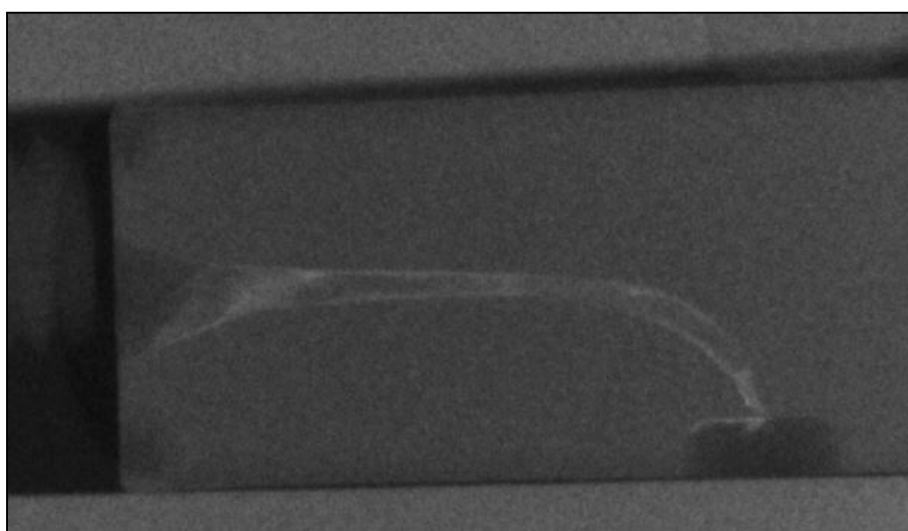


Abbildung 12: Kriterium A (Vollständigkeit der Füllung) Score III: Weniger als $\frac{1}{3}$ des Kanals gefüllt

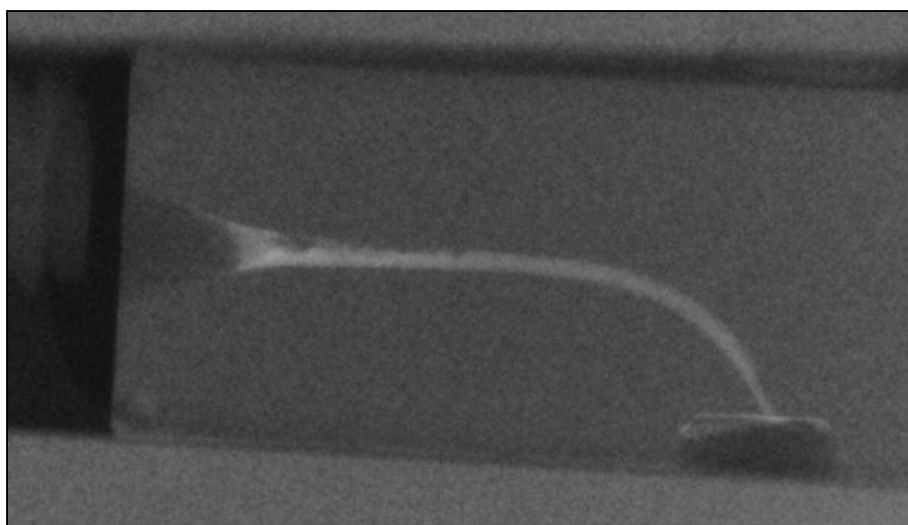


Abbildung 13: Kriterium B (Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt) Score I: Keine Lufteinschlüsse im apikalen Bereich

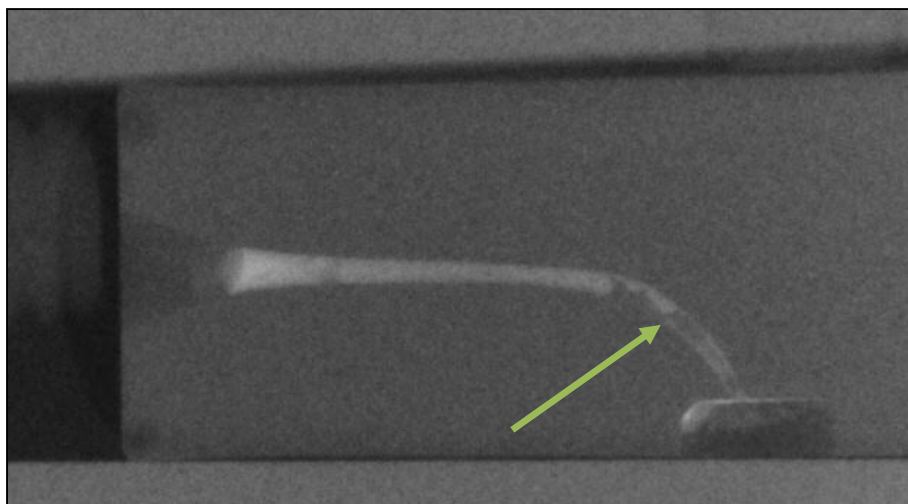


Abbildung 14: Kriterium B (Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt) Score II: Lufteinschlüsse im apikalen Bereich

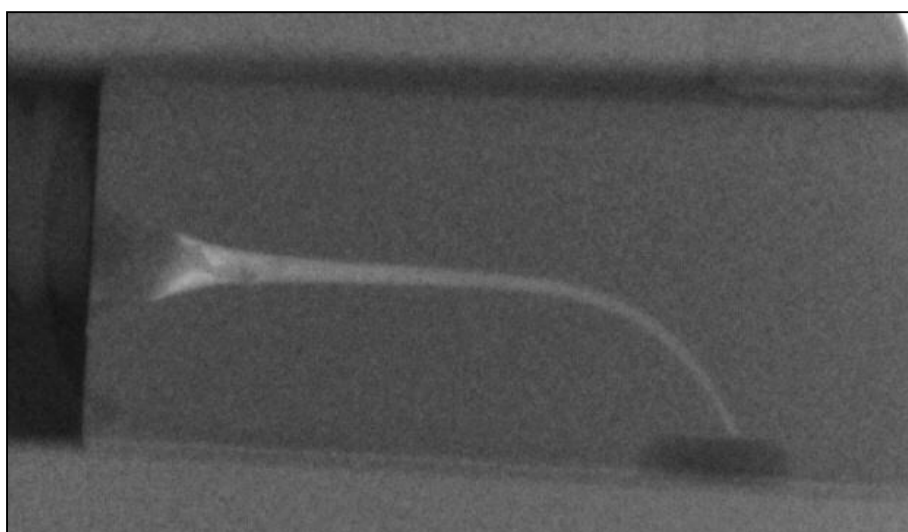


Abbildung 15: Kriterium C (Überpressung) Score I: Medikamentöse Einlage nicht überpresst

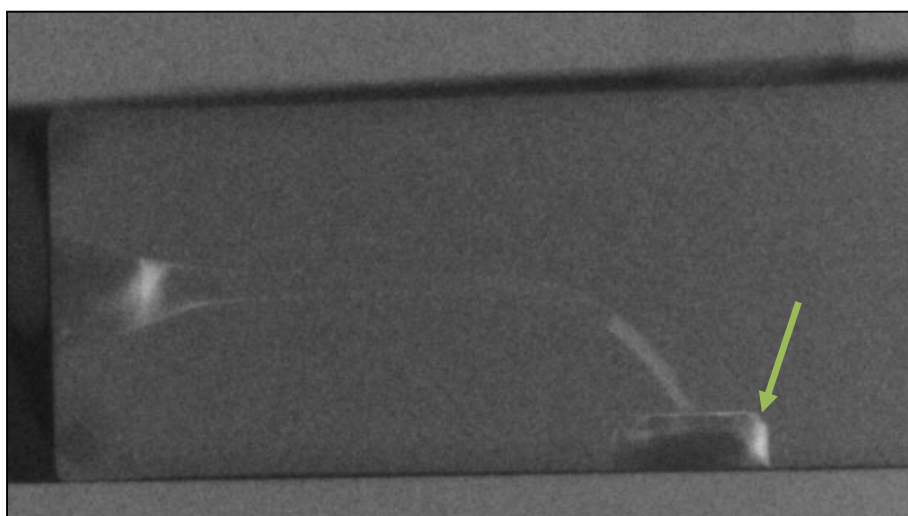


Abbildung 16: Kriterium C (Überpressung) Score II: Medikamentöse Einlage überpresst

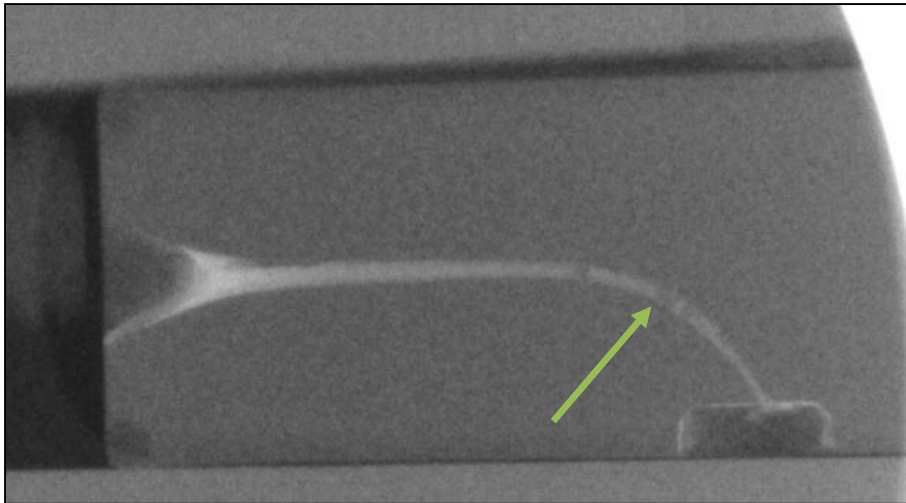


Abbildung 17: Kriterium D (Größe der Luftblasen) Score I: Größe der Luftblase < 1 mm

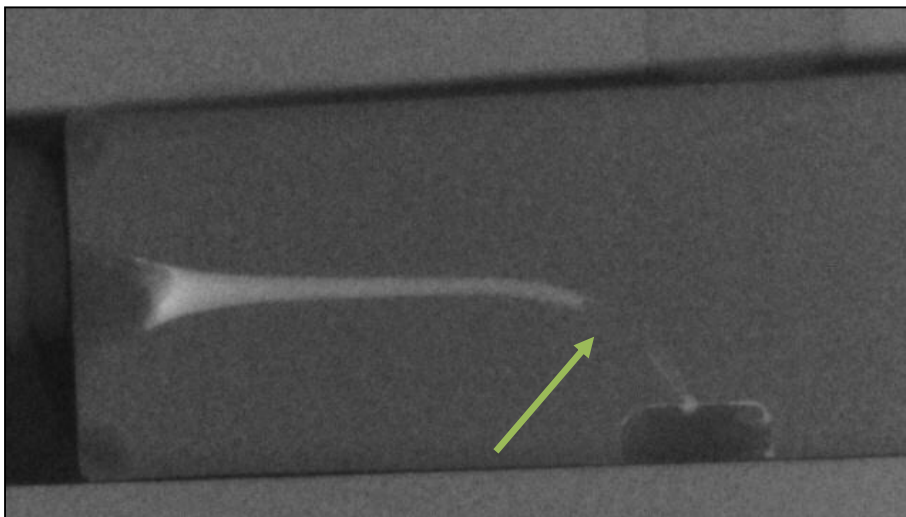


Abbildung 18: Kriterium D (Größe der Luftblasen) Score II: Größe der Luftblase 1 mm - 3 mm

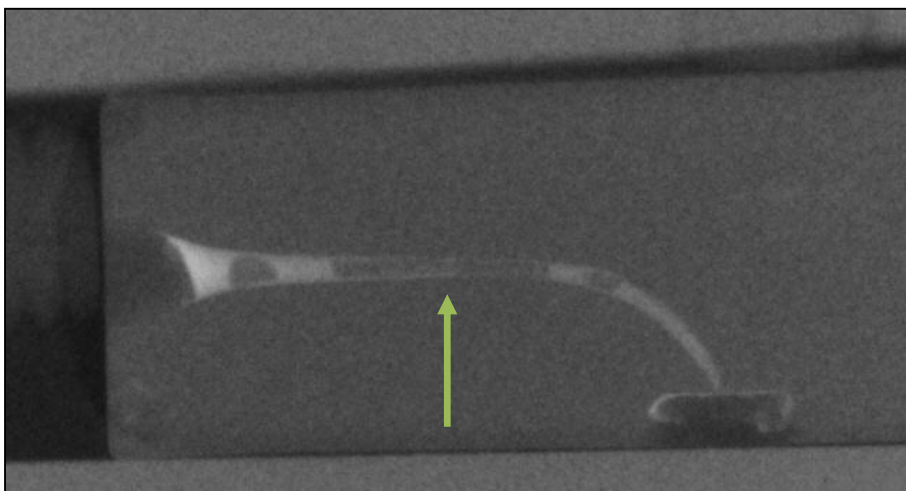


Abbildung 19: Kriterium D (Größe der Luftblasen) Score III: Größe der Luftblase > 3 mm

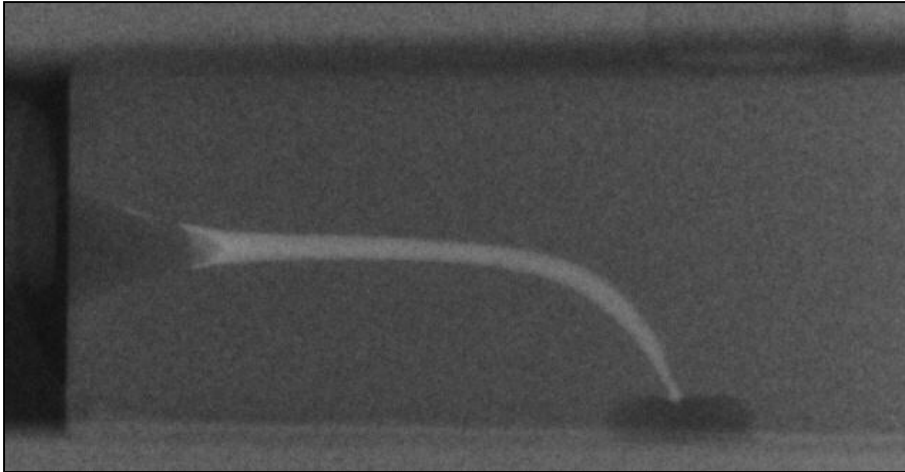


Abbildung 20: Kriterium E (Füllung des apikalen Kanalabschnitts) Score I: Apikaler Kanalabschnitt gefüllt

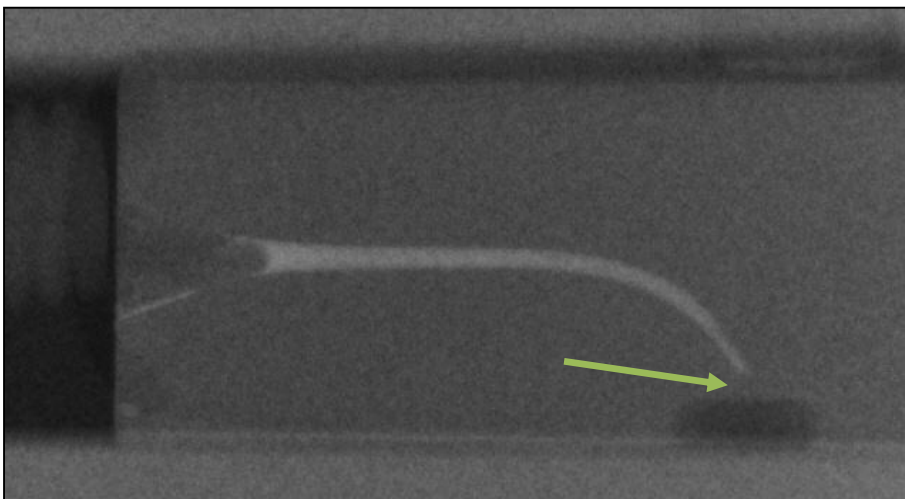


Abbildung 21: Kriterium E (Füllung des apikalen Kanalabschnitts) Score II: Apikaler Kanalabschnitt nicht gefüllt

Die Röntgenbilder wurden von zwei Personen - im weiteren Verlauf der Arbeit auch als Reader bezeichnet - unabhängig voneinander bewertet, wobei die Ergebnisse anschließend verglichen wurden. Hierzu erfolgte in einem ersten Schritt die notwendige Kalibrierung der Reader. Als Reader ist hierbei eine fachlich vorgebildete Person zu verstehen, welche zur Bewertung der Röntgenaufnahmen gemäß des in Tabelle 4 vorgestellten Score-Systems befähigt ist.

Im Rahmen der Reader-Kalibrierung wurden 180 Röntgenbilder unabhängig voneinander bewertet und anschließend die Ergebnisse verglichen und Abweichungen diskutiert. Anschließend wurden weitere 60 Röntgenbilder individuell bewertet und die Ergebnisse erneut verglichen. Nach Ablauf einer Woche wurden erneut 60 Röntgenbilder

von jedem Reader analysiert und die Ergebnisse in einer abschließenden Kalibrierungssitzung besprochen. Die Reader-Kalibrierung erfolgte im Vorfeld zur Studie „Vergleichende Untersuchung zur Applikation von Kalziumhydroxideinlagen“ (Staemmler 2012). Somit konnten gemäß den Vorgaben von Hülsmann et al. (1996) die „interindividuelle Übereinstimmung“ und die „interindividuelle Reproduzierbarkeit“ berechnet werden.

Die „interindividuelle Übereinstimmung“ ist definiert als der Quotient der übereinstimmend bewerteten Röntgenbilder beider Reader und der Gesamtzahl der Röntgenbilder. Die „interindividuelle Übereinstimmung“ wird somit als Prozentzahl interpretiert, welche mit zunehmender Höhe eine steigende Anzahl an Übereinstimmungen von beiden Readern darstellt.

Die „interindividuelle Reproduzierbarkeit“ hingegen ist definiert als Quotient der von einem Reader in einem zweiten Durchgang mit einem äquivalenten Score bewerteten Röntgenbilder und der Gesamtzahl der Röntgenbilder. Die „interindividuelle Reproduzierbarkeit“ wird somit als Prozentzahl interpretiert, welche mit zunehmender Höhe eine steigende Anzahl an identischen Bewertungen im ersten und zweiten Durchgang darstellt.

Beide Kennzahlen treffen somit eine Aussage über den Grad der Standardisierung in der Bewertung der Röntgenbilder. In der Studie von Staemmler lag im ersten Durchgang der Bewertung die interindividuelle Übereinstimmung bereits bei 82%, im endgültigen Durchgang bei 91%. Bei Untersucher 1 betrug die intraindividuelle Reproduzierbarkeit 95%, bei Untersucher 2 97%. (Staemmler 2012).

3. Ergebnisse

Die erhobenen Daten wurden mit freundlicher Unterstützung der Abteilung für Medizinische Statistik der Georg-August-Universität Göttingen mit einem nichtparametrischen Rangverfahren für longitudinale Daten ausgewertet (Brunner et al. 2001). Dies beruht auf der Tatsache, dass es sich bei den erhobenen Daten um rein ordinale Daten bzw. dichotome Daten handelt, welche als longitudinal anzusehen sind, da jede Versuchseinheit wiederholt von 2 Readern beurteilt wurde. Mit einem SAS-Makro (SAS, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA) wurden die Daten auf Unterschiede in den Kriterien des Score-Systems (Tabelle 4) untersucht. Das Signifikanzniveau lag bei 5% ($p < 0,05$). Aus interpretatorischen Gründen wurde auf eine multivariate Vorabanalyse verzichtet, da die Studie einen reinen explorativen Charakter hat.

Zur grafischen Darstellung der Ergebnisse konnte der relative Effekt herangezogen und in Liniendiagrammen visualisiert werden. Relative Effekte lassen sich leicht als normierte Rangmittelwerte interpretieren, wobei die Ränge über alle Daten vergeben werden. Diese beschreiben die Wahrscheinlichkeit, dass die Beobachtungen einer Stichprobe zu kleineren Werten als die Beobachtungen der anderen Stichproben tendieren. Sei $Y_{ijk}^{(l)}$ eine Beobachtung des Kriteriums l ($l = A, B, C, D, E$) vom k -ten Wurzelkanalmodell in der Präparationsgröße i ($i=35, 45$) vom Reader j ($j=1,2$) und $Z^{(l)}$ das Mittel aller Daten je Kriterium. So wird der relative Effekt von Schlitgen (2004) definiert als:

$$p_{ij} = P(Z < Y_{ijk}^{(l)}) + \frac{1}{2} P(Z = Y_{ijk}^{(l)})$$

Ein „Relativer Effekt“ von 0,5 ($P_{ij}=0,5$) bedeutet, dass kein Unterschied in den Messwerten bzw. keine abzusehende Tendenz zu größeren oder kleineren Werten als der Durchschnitt besteht. Ein „Relativer Effekt“ größer 0,5 ($P_{ij}>0,5$) bedeutet, dass die Messwerte im Vergleich zum Durchschnitt zu größeren Messwerten tendieren. Abschließend bedeutet ein „Relativer Effekt“ kleiner 0,5 ($P_{ij}<0,5$), dass die Messwerte im Vergleich zum Durchschnitt zu kleineren Messwerten tendieren. Um vergleichende Schlüsse zwischen den Stichproben ziehen zu können, hilft folgende Eigenschaft: Die Beobachtungen $Y_{ijk}^{(l)}$ tendieren zu größeren Werten als $Y_{i'jk}^{(l)}$, falls $p_{ij} < p_{i'j}$. Für dichotome Daten ist der relative Effekt äquivalent zur Differenz der beiden Erfolgswahrscheinlichkeiten.

Die vorgestellte statistische Analyse des gewählten Versuchsaufbaus (Kapitel 2) ermöglicht die Beantwortung folgender fünf Fragen:

1. Kann mithilfe einer der Applikationsmethoden „Verdichtung mit Wattepellets“ oder „Verdichtung mit Papierspitze“ ein besseres Ergebnis gemäß den Kriterien des Score-Systems (Tabelle 4) erreicht werden?
2. Kann mithilfe von Hypocal oder Ultracal ein besseres Ergebnis gemäß den Kriterien des Score-Systems (Tabelle 4) erreicht werden?
3. Kann mithilfe einer einzelnen Applikationsmethoden-Medikament-Kombination ein besseres Ergebnis gemäß den Kriterien des Score-Systems (Tabelle 4) erreicht werden?
4. Beurteilen beide Reader gleich gut oder gibt es erkennbare Unterschiede in der Bewertungsqualität und somit in der Interpretation der Ausprägungen der Kriterien des Score-Systems (Tabelle 4)?
5. Bewerten beide Reader die Applikationsarten gleich gut oder ist evtl. die Bevorzugung einer Applikationsart oder eines Medikaments zu erkennen?

Diese fünf Fragen wurden getrennt für die Präparationsgrößen 35 und 45 untersucht, wobei die Fragen direkt in den Verteilungsfunktionen getestet wurden.

Für die Präparationsgröße 35 ergaben sich in der statistischen Auswertung (Tabelle 5, signifikante Werte sind **fett** hervorgehoben) bis auf eine Ausnahme signifikante p-Werte für die Applikationen in den Kriterien A, B, C und D gemäß dem Score-System. Einzig das Kriterium E ($p=0,065$) ist als nicht signifikanter p-Wert zu kennzeichnen. Der Vergleich der Reader ergab keine signifikanten p-Werte in den Kriterien A bis E. Der abschließende Vergleich der Interaktion zwischen Reader und Applikation ergab ebenfalls keine signifikanten p-Werte in den Kriterien A bis E.

Hypothese	Kriterium A	Kriterium B	Kriterium C	Kriterium D	Kriterium E
Applikation	< 0,0001	< 0,0001	0,02579	< 0,0001	0,065
Reader	0,165	0,15730	1	0,31731	0,15730
Reader * Applikation	0,47213	0,49824	1	0,31731	0,49824

Tabelle 5: p-Werte für die Hypothesen bei Präparationsgröße 35

Ein ähnliches Bild ergab sich in der statistischen Ergebnisanalyse für die Präparationsgröße 45 (Tabelle 6, signifikante Werte sind **fett** hervorgehoben). Der Vergleich

der Applikation ergab bis auf eine Ausnahme signifikante p-Werte für die Kriterien A, B, D und E gemäß dem Score-System. Einzig das Kriterium C ($p=0,11699$) ist als nicht signifikanter p-Wert zu kennzeichnen. Der Vergleich der Reader ergab keine signifikanten p-Werte in den Kriterien A bis E. Der abschließende Vergleich der Interaktion zwischen Reader und Applikation ergab ebenfalls keine signifikanten p-Werte in den Kriterien A bis E.

Hypothese	Kriterium A	Kriterium B	Kriterium C	Kriterium D	Kriterium E
Applikation	< 0,0001	< 0,0001	0,11699	< 0,0001	< 0,00001
Reader	0,81615	1	1	0.31731	1
Reader * Applikation	0,26609	1	1	0.31731	1

Tabelle 6: p-Werte für die Hypothesen bei Präparationsgröße 45

Somit wurden im weiteren Verlauf der Analyse nur die signifikanten p-Werte in der Applikation weiter untersucht. Dies betraf für die Präparationsgröße 35 die Kriterien A bis D und für die Präparationsgröße 45 die Kriterien A, B, D und E. Hierzu wurden Paarvergleiche adjustiert für multiples Testen nach Tukey angewandt, um die verschiedenen Applikationsarten je Kriterium miteinander zu vergleichen. Das Signifikanzniveau für die Paarvergleiche wurde auf $p=0,05$ festgelegt.

3.1 Kriterium A „Vollständigkeit der Füllung“

Für das Kriterium A „Vollständigkeit der Füllung“ vergaben die Reader folgende Werte:

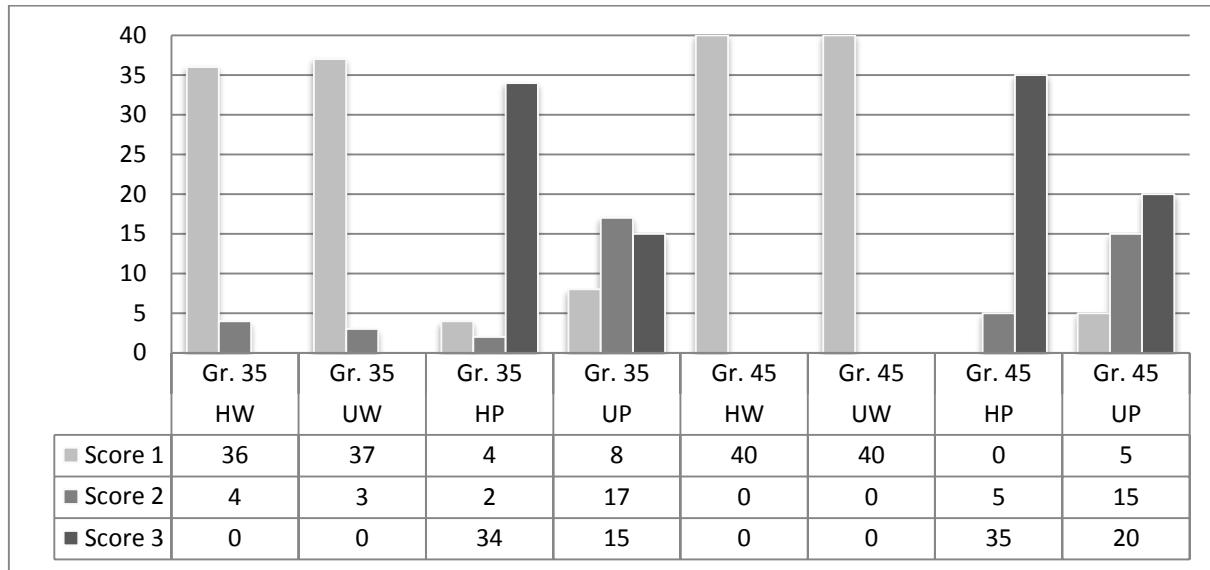


Abbildung 22: Verteilung der Scores hinsichtlich Kriterium A: Vollständigkeit der Füllung

Im Rahmen der Untersuchung des relativen Effektes für das Kriterium A „Vollständigkeit der Füllung“ (Abbildung 23) des Score-Systems (Tabelle 4) konnte festgestellt werden, dass die Applikationsmethode „Ultracal/Wattepellet“ in der Präparationsgröße 35 die besten Ergebnisse lieferte, dicht gefolgt von der Applikationsmethode „Hypocal/Wattepellet“. In der Präparationsgröße 45 hingegen lieferten „Ultracal/Wattepellet“ und „Hypocal/Wattepellet“ gleich gute Ergebnisse. Deutlich schlechter waren die Ergebnisse bei den Applikationsmethoden „Ultracal/Papierspitze“ gefolgt von der Applikationsmethode „Hypocal/Papierspitze“, welche im Kriterium A die schlechtesten Ergebnisse lieferte.

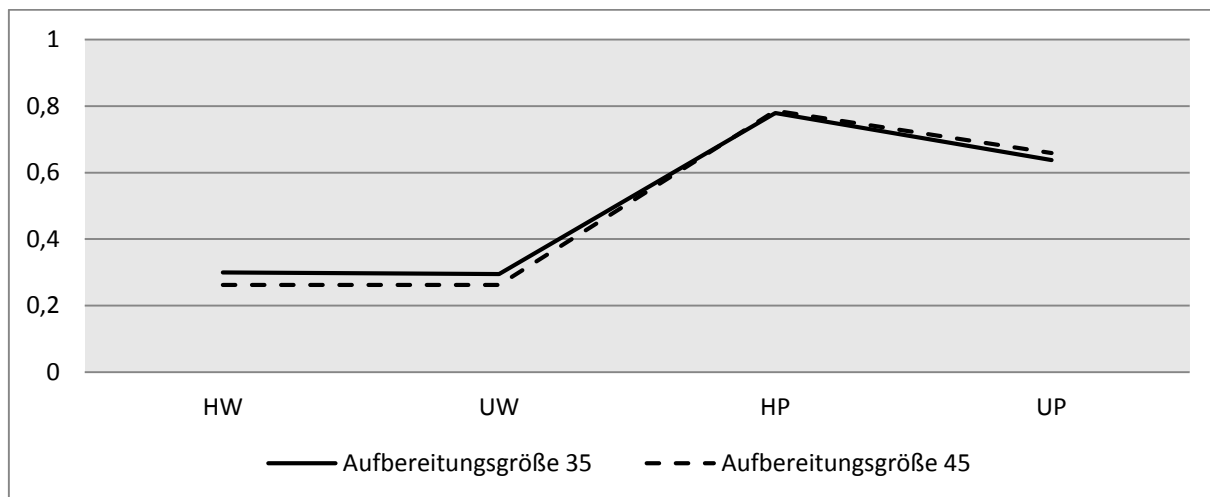


Abbildung 23: Relativer Effekt Kriterium A: Vollständigkeit der Füllung

Im Paarvergleich (Tabelle 7, signifikante Werte sind **fett** hervorgehoben) unterscheidet sich die Vollständigkeit der Füllung durch „Ultracal/Wattepellet“ nicht signifikant von den durch „Hypocal/Wattepellet“ ($p=1$) erreichten Ergebnissen. Die Applikationsmethode „Ultracal/Papierspitze“ erreichte jedoch eine signifikant bessere Vollständigkeit der Füllung als die Methoden „Ultracal/Wattepellet“ ($p<0,00001$) und „Hypocal/Wattepellet“ ($p<0,00001$). Hingegen unterscheidet sich die Vollständigkeit der Füllung mit „Ultracal/Papierspitze“ nicht signifikant von dem mit „Hypocal/Papierspitze“ erreichten Ergebnis ($p=0,02424$ bei Präparationsgröße 35 und $p=0,04422$ bei Präparationsgröße 45).

Größe 35		HW	UW	HP	UP
	HW	-	1	< 0,0001	< 0,0001
	UW	1	-	< 0,0001	< 0,0001
	HP	< 0,0001	< 0,0001	-	0,02424
	UP	< 0,0001	< 0,0001	0,02424	-
Größe 45		HW	UW	HP	UP
	HW	-	1	< 0,00001	< 0,00001
	UW	1	-	< 0,00001	< 0,00001
	HP	< 0,00001	< 0,00001	-	0,04422
	UP	< 0,00001	< 0,00001	0,04422	-

Tabelle 7: Adjustierter p-Wert Kriterium A: Vollständigkeit der Füllung

Beide Präparationsgrößen weisen in der Vollständigkeit der Füllung einen ähnlichen Verlauf der Grafen für den relativen Effekt sowie ähnliche Ergebnisse bei der Signifikanz der Paarvergleiche auf. Es kann die Bildung einer Gruppe aus den Applikationsmethoden „Hypocal/Wattepellet“ und „Ultracal/Wattepellet“ erkannt werden, welche sich nicht signifikant unterscheiden. Eine weitere Gruppe wird gebildet aus den Applikationsmethoden „Hypocal/Papierspitze“ und „Ultracal/Papierspitze“, welche sich auch nicht signifikant unterscheiden. Vergleicht man allerdings beide Gruppen, so weisen die Applikationsmethoden, welche mit einem Wattepellet verdichtet wurden, einen signifikanten Unterschied in der Ergebnisqualität zu den Applikationsmethoden, welche mit einer Papierspitze verdichtet wurden, auf. Somit kann geschlussfolgert werden, dass die Verwendung von Papierspitzen zur Verdichtung in Bezug auf die Vollständigkeit der medikamentösen Einlage signifikant schlechtere Ergebnisse liefert als die Verdichtung mit Wattepellets. Diese Schlussfolgerung ist unabhängig vom verwendeten Medikament.

3.2 Kriterium B „Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt“

Für das Kriterium B „Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt“ vergaben die Reader folgende Werte:

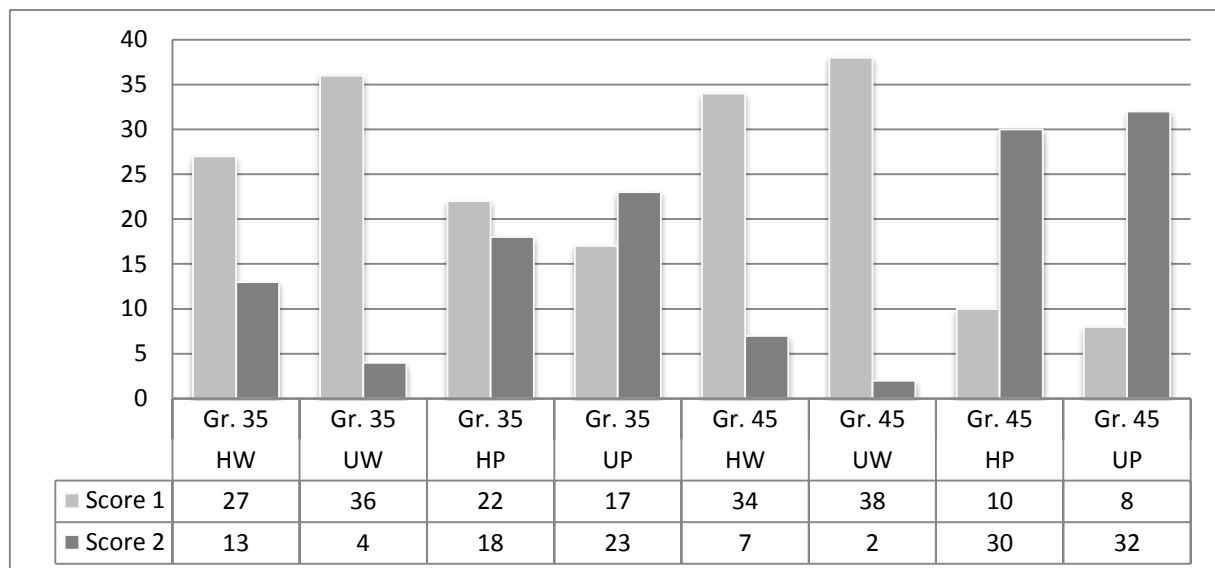


Abbildung 24: Verteilung der Scores hinsichtlich Kriterium B: Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt

Im Rahmen der Untersuchung des relativen Effektes für das Kriterium B „Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt“ (Abbildung 25) des Score-Systems (Tabelle 4) konnte festgestellt werden, dass die Applikationsmethode „Ultracal/Wattepellet“ gefolgt von der Applikationsmethode „Hypocal/Wattepellet“ die besten Ergebnisse lieferte. Geringfügig schlechter waren die Ergebnisse bei der Applikationsmethode „Hypocal/Papierspitze“, gefolgt von der Applikationsmethode „Ultracal/Papierspitze“, welche im Kriterium B die schlechtesten Ergebnisse lieferte.

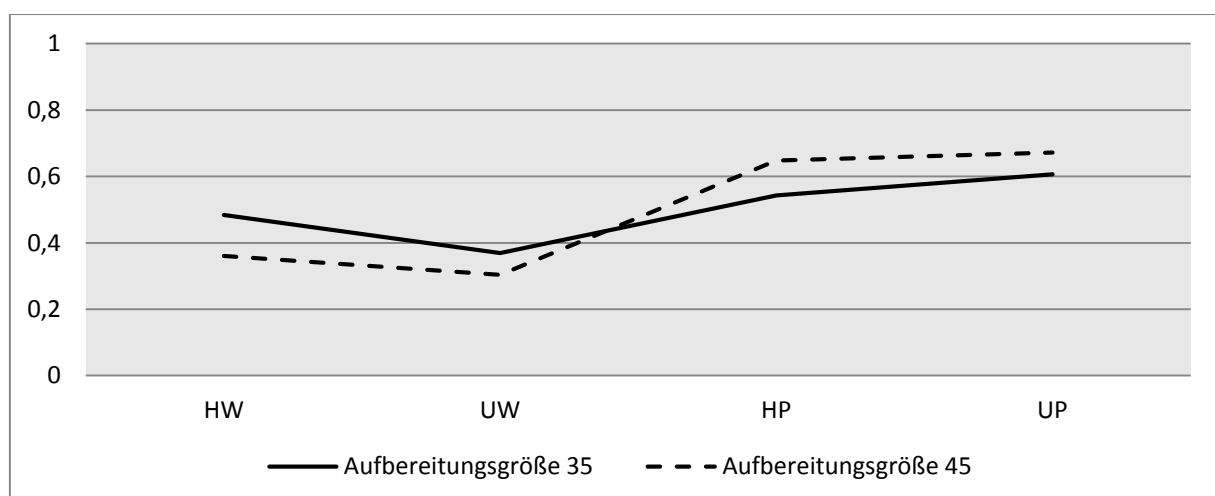


Abbildung 25: Relativer Effekt Kriterium B: Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt

Im Paarvergleich (Tabelle 8, signifikante Werte sind **fett** hervorgehoben) unterscheidet sich die Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt von „Ultracal/Wattepellet“ nicht signifikant von den mit „Hypocal/Wattepellet“ erreichten Ergebnissen ($p=0,48624$ bei Präparationsgröße 35 und $p=1$ bei Präparationsgröße 45). Die Applikationsmethode „Hypocal/Papierspitze“ erreicht in der Präparationsgröße 35 ebenfalls keine signifikant bessere Qualität als „Ultracal/Wattepellet“ ($p=0,07962$) und „Hypocal/Wattepellet“ ($p=1$). In der Präparationsgröße 45 hingegen unterscheidet sich die Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt mit „Hypocal/Papierspitze“ signifikant von den mit „Ultracal/Wattepellet“ ($p<0,00001$) und „Hypocal/Wattepellet“ ($p=0,00024$) erreichten Ergebnissen. Für beide Präparationsgrößen unterscheidet sich die Qualität der Applikationsmethode „Hypocal/Papierspitze“ nicht signifikant von der Applikationsmethode „Ultracal/Papierspitze“ ($p=1$).

Größe 35		HW	UW	HP	UP
	HW	-	0,48624	1	0,64926
UW	0,48624	-	0,07962	0,00558	
HP	1	0,07962	-	1	
UP	0,64926	0,00558	1	-	
Größe 45		HW	UW	HP	UP
	HW	-	1	0,00024	0,00006
	UW	1	-	< 0,00001	< 0,00001
	HP	0,00024	< 0,00001	-	1
	UP	0,00006	< 0,00001	1	-

Tabelle 8: Adjustierter p-Wert Kriterium B: Qualität der Füllung im apikalen Kanalabschnitt

Beide Präparationsgrößen weisen im Kriterium B einen ähnlichen Verlauf der Grafen für den relativen Effekt aus. Allerdings sind die zugehörigen Paarvergleiche in der Präparationsgröße 35 im Gegensatz zur Präparationsgröße 45 leicht unterschiedlich. Es kann, wie bereits im Kriterium A, die Bildung einer Gruppe aus den Applikationsmethoden „Hypocal/Wattepellet“ und „Ultracal/Wattepellet“ erkannt werden, welche sich nicht signifikant unterscheiden. Eine weitere Gruppe wird gebildet aus den Applikationsmethoden „Hypocal mit Verdichtung durch eine Papierspitze“ und „Ultracal mit Verdichtung durch eine Papierspitze“, welche sich auch nicht signifikant unterscheiden. Vergleicht man allerdings beide Gruppen, so weisen die Applikationsmethoden, welche mit einem Wattepellet verdichtet wurden, in der Präparationsgröße 45 einen signifikanten Unterschied in der Ergebnisqualität zu den Applikationsmethoden, welche

mit einer Papierspitze verdichtet wurden, auf. In der Präparationsgröße 35 ist der Unterschied zwischen den Gruppen zwar auch kenntlich, jedoch nach dem vorgegebenen Signifikanzniveau als nicht signifikant zu bewerten. Somit kann geschlussfolgert werden, dass die Verwendung von Papierspitzen zur Verdichtung in Bezug auf die Qualität der medikamentösen Einlage im apikalen Bereich signifikant schlechtere Ergebnisse liefert als die Verdichtung mit Wattepellets. Diese Schlussfolgerung ist unabhängig vom verwendeten Medikament.

3.3 Kriterium C „Überpressung“

Für das Kriterium C „Überpressung“ vergaben die Reader folgende Werte:

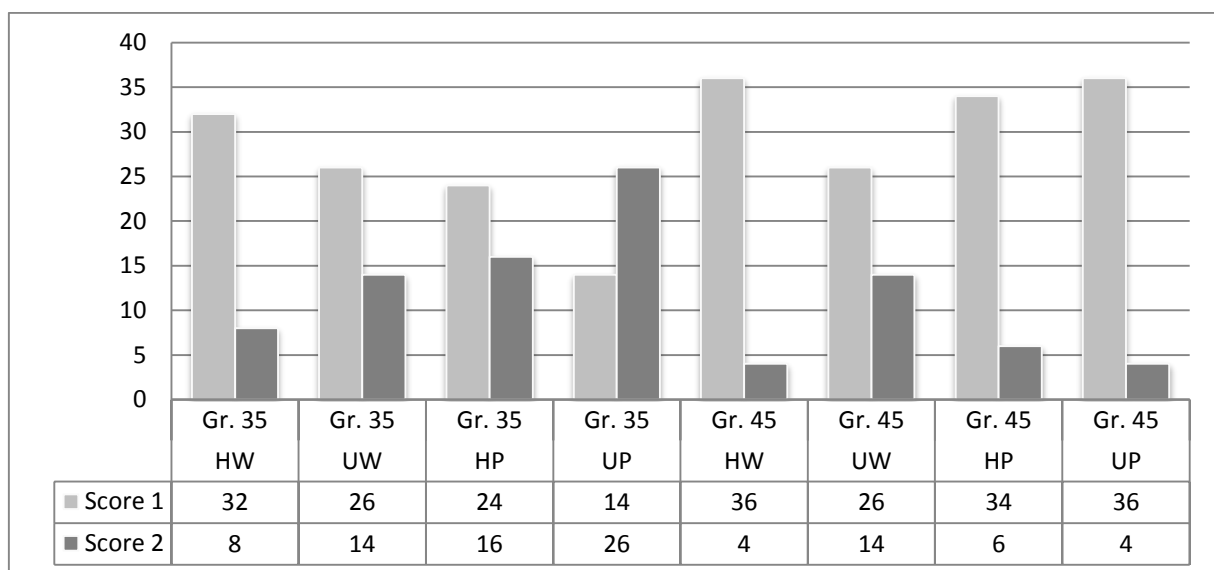


Abbildung 26: Verteilung der Scores hinsichtlich Kriterium C: Überpressung

Im Rahmen der Untersuchung des relativen Effektes für das Kriterium C „Überpressung“ (Abbildung 27) des Score Systems (Tabelle 4) konnte festgestellt werden, dass die Applikationsmethode „Hypocal/Wattepellet“ dicht gefolgt von der Applikationsmethode „Ultracal/Wattepellet“ die besten Ergebnisse lieferte. Geringfügig schlechter waren die Ergebnisse bei der Applikationsmethode „Hypocal/Papierspitze“, gefolgt von der Applikationsmethode „Ultracal/Papierspitze“, welche im Kriterium C die schlechtesten Ergebnisse lieferte.

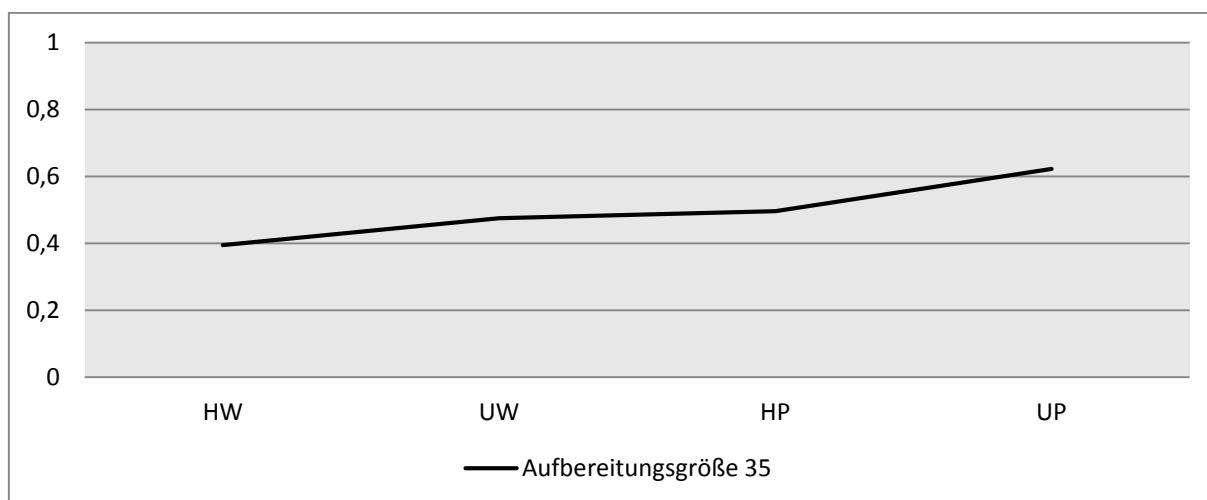


Abbildung 27: Relativer Effekt Kriterium C: Überpressung

Im Paarvergleich (Tabelle 9, signifikante Werte sind **fett** hervorgehoben) unterscheidet sich nur die Applikationsmethode „Hypocal/Wattepellet“ signifikant von der Applikationsmethode „Ultracal/Papierspitze“ ($p=0,01932$). Alle anderen Medikament- Applikationsmethoden Kombinationen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

	HW	UW	HP	UP
HW	-	1	1	0,01932
UW	1	-	1	0,36
HP	1	1	-	0,71568
UP	0,01932	0,36	0,71568	-

Tabelle 9: Adjustierter p-Wert Kriterium C: Überpressung

Das Kriterium C ergab in der Präparationsgröße 45 bereits im Vergleich der Applikationsmethoden keine signifikanten Einzeleffekte. In der Präparationsgröße 35 hingegen wurden signifikante Einzeleffekte festgestellt. Der anschließende Paarvergleich ergab jedoch nur einen signifikanten Unterschied zwischen der Applikationsmethode „Hypocal/Wattepellet“ mit der höchsten Ergebnisqualität und der Applikationsmethode „Ultracal mit Verdichtung durch eine Papierspitze“ mit der schlechtesten Ergebnisqualität. Alle anderen Applikationsmethoden ergaben im Paarvergleich keine signifikanten Unterschiede. Somit kann geschlussfolgert werden, dass eine Überpressung unabhängig vom gewählten Medikament, von der Präparationsgröße des Wurzelkanals und von der Applikationsmethode ist.

3.4 Kriterium D „Größe der Luftblasen“

Für das Kriterium D „Größe der Luftblasen“ vergaben die Reader folgende Werte:

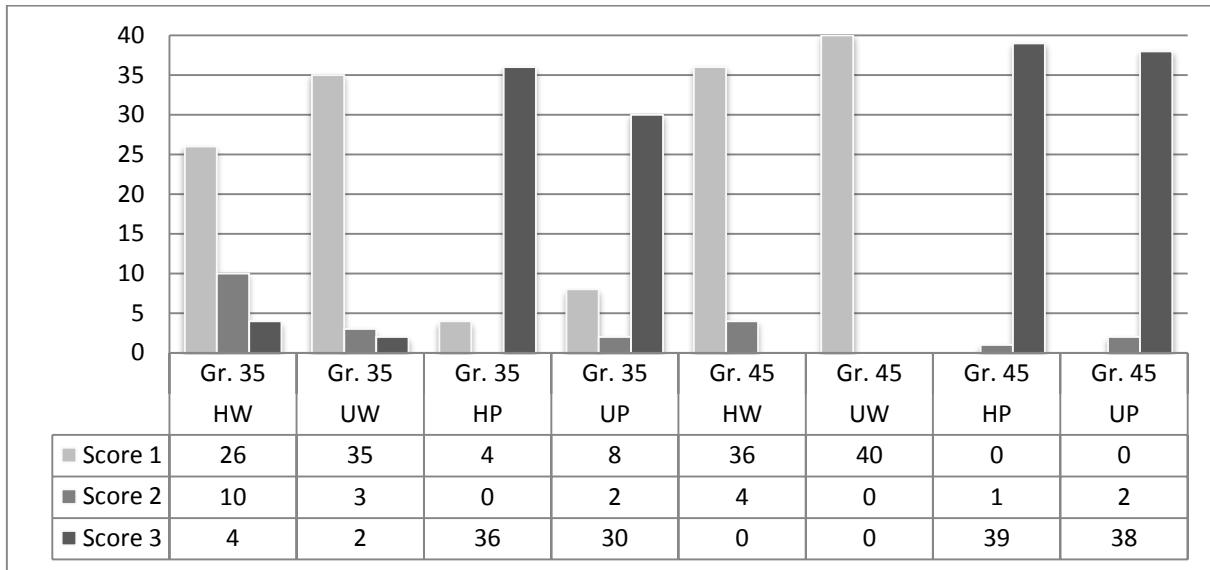


Abbildung 28: Verteilung der Scores hinsichtlich Kriterium D: Größe der Luftblasen

Im Rahmen der Untersuchung des relativen Effektes für das Kriterium D „Größe der Luftblasen“ (Abbildung 29) es Score Systems (Tabelle 4) konnte festgestellt werden, dass die Applikationsmethode „Ultracal/Wattepellet“ dicht gefolgt von der Applikationsmethode „Hypocal/Wattepellet“ die besten Ergebnisse lieferte. Deutlich schlechter waren die Ergebnisse bei der Applikationsmethode „Ultracal/Papierspitze“ gefolgt von der Applikationsmethode „Hypocal/Papierspitze“, welche im Kriterium D die schlechtesten Ergebnisse lieferte.

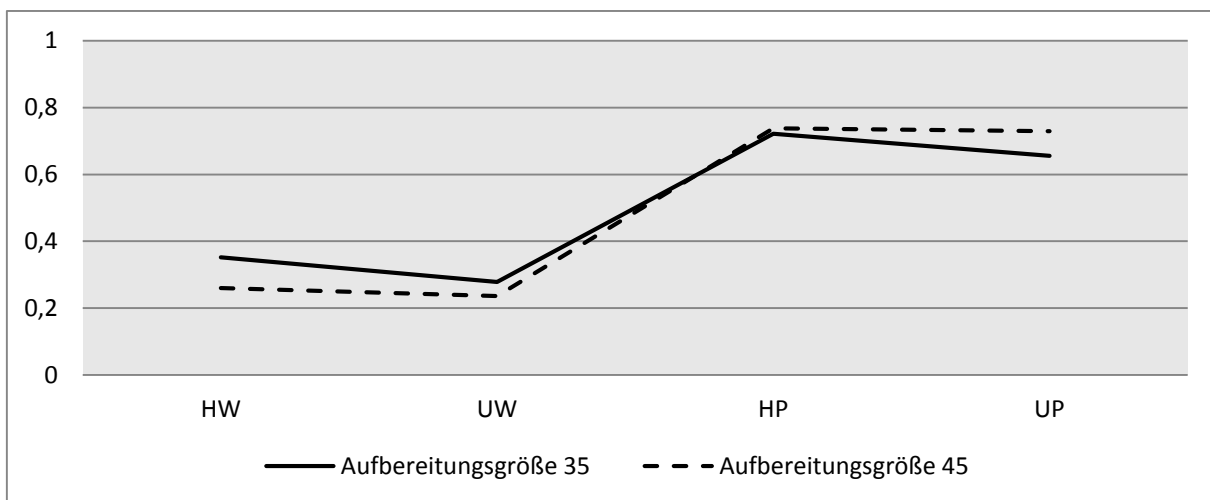


Abbildung 29: Relativer Effekt Kriterium D: Größe der Luftblasen

Im Paarvergleich (Tabelle 10, signifikante Werte sind **fett** hervorgehoben) unterscheidet sich die Größe der Luftblasen bei „Ultracal/Wattepellet“ nicht signifikant von den mit „Hypocal/Wattepellet“ erreichten Ergebnissen ($p=0,6357$ bei Präparationsgröße 35 und $p=0,9753$ bei Präparationsgröße 45). Hingegen unterscheidet sich „Ultracal/Papierspitze“ signifikant von „Ultracal/Wattepellet“ ($p<0,00001$) und „Hypocal/Wattepellet“ in der erreichten Qualität ($p=0,00003$ bei Präparationsgröße 35 und $p<0,00001$ bei Präparationsgröße 45). Die Applikationsmethode „Ultracal/Papierspitze“ liefert wiederum nicht signifikant unterschiedliche Ergebnisse als die Applikationsmethode „Hypocal/Papierspitze“ ($p=1$).

Größe 35		HW	UW	HP	UP
	HW	-	0,6357	< 0,00001	0,00003
UW	0,6357	-	< 0,00001	< 0,00001	
HP	< 0,00001	< 0,00001	-	1	
UP	0,00003	< 0,00001	1	-	
Größe 45		HW	UW	HP	UP
	HW	-	0,9753	< 0,00001	< 0,00001
UW	0,9753	-	< 0,00001	< 0,00001	
HP	< 0,00001	< 0,00001	-	1	
UP	< 0,00001	< 0,00001	1	-	

Tabelle 10: Adjustierter p-Wert Kriterium D: Größe der Luftblasen

Beide Präparationsgrößen weisen im Kriterium D einen ähnlichen Verlauf der Grafen für den relativen Effekt sowie ähnliche Ergebnisse bei der Signifikanz der Paarvergleiche auf. Es kann, wie bereits im Kriterium A und B, die Bildung einer Gruppe aus den Applikationsmethoden „Hypocal/Wattepellet“ und „Ultracal/Wattepellet“ erkannt werden, welche sich nicht signifikant unterscheiden. Eine weitere Gruppe wird gebildet aus den Applikationsmethoden „Hypocal mit Verdichtung durch eine Papierspitze“ und „Ultracal mit Verdichtung durch eine Papierspitze“, welche sich auch nicht signifikant unterscheiden. Vergleicht man allerdings beide Gruppen, so weisen die Applikationsmethoden, welche mit einem Wattepellet verdichtet wurden, einen signifikanten Unterschied in der Ergebnisqualität zu den Applikationsmethoden auf, welche mit einer Papierspitze verdichtet wurden. Somit kann geschlussfolgert werden, dass die Verwendung von Papierspitzen zur Verdichtung in Bezug auf die zu erwartende Blasengröße in der medikamentösen Einlage signifikant schlechtere Ergebnisse liefert als die Verdichtung mit Wattepellets. Diese Schlussfolgerung ist unabhängig vom verwendeten Medikament.

3.5 Kriterium E „Füllung des apikalen Kanalabschnitts“

Für das Kriterium E „Füllung des Apex“ vergaben die Reader folgende Werte:

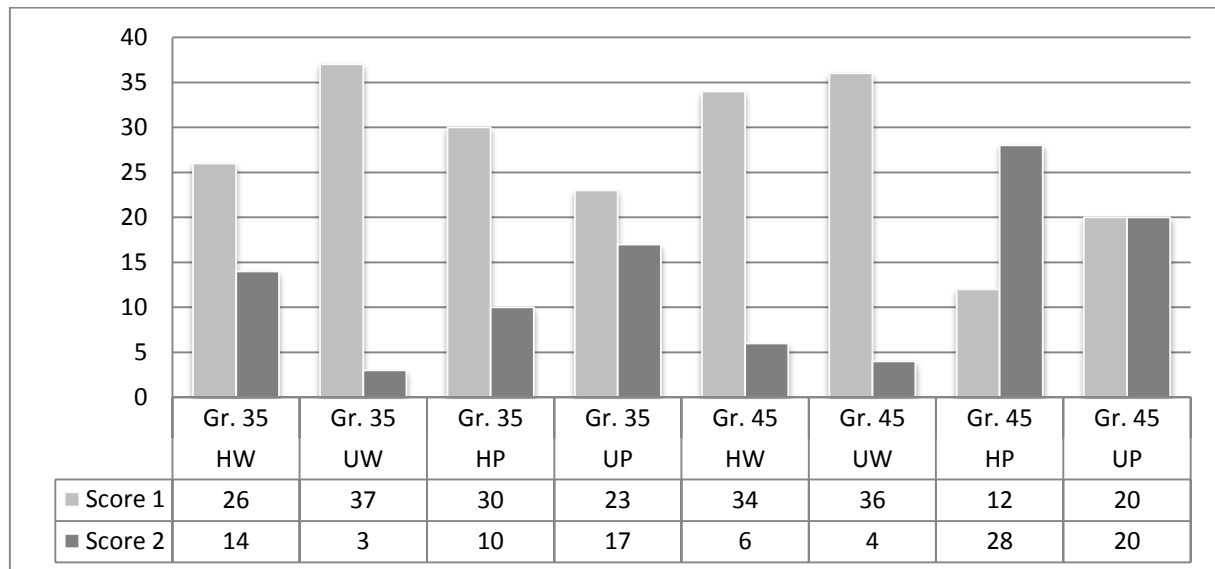


Abbildung 30: Verteilung der Scores hinsichtlich Kriterium E: Füllung des Apex

Im Rahmen der Untersuchung des relativen Effektes für das Kriterium E „Füllung des Apex“ (Abbildung 29) des Score Systems (Tabelle 4) konnte festgestellt werden, dass die Applikationsmethode „Ultracal/Wattepellet“ dicht gefolgt von der Applikationsmethode „Hypocal/Wattepellet“ die besten Ergebnisse lieferte. Deutlich schlechter waren die Ergebnisse bei der Applikationsmethode „Ultracal/Papierspitze“ gefolgt von der Applikationsmethode „Hypocal/Papierspitze“, welche im Kriterium E die schlechtesten Ergebnisse lieferte.

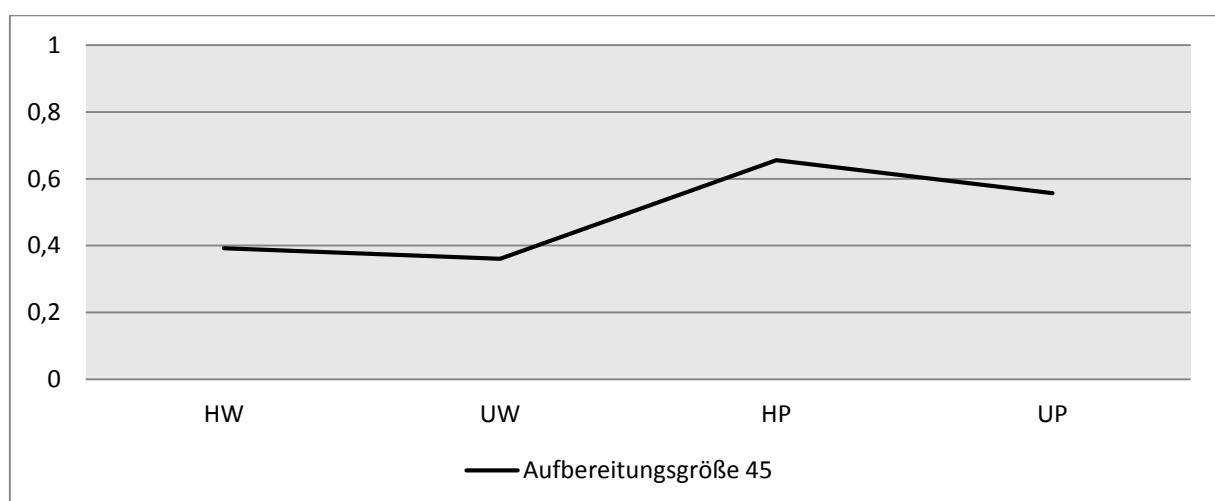


Abbildung 31: Relativer Effekt Kriterium E: Füllung des apikalen Kanalabschnitts

Im Paarvergleich (Tabelle 11, signifikante Werte sind **fett** hervorgehoben) unterscheidet sich die Füllung des apikalen Kanalabschnitts durch „Ultracal/Wattepellet“ nicht signifikant von der durch „Hypocal/Wattepellet“ ($p=1$). Die Applikationsmethode „Ultracal/Papierspitze“ erreichte jedoch signifikant unterschiedliche Ergebnisse als „Ultracal/Wattepellet“ ($p<0,03246$), jedoch kein signifikanten Unterschied im Vergleich zu „Hypocal/Wattepellet“ ($p=0,10836$). Hingegen unterscheidet sich die Qualität von „Ultracal/Papierspitze“ nicht signifikant von der mit „Hypocal/Papierspitze“ erreichten Qualität.

Größe 45		HW	UW	HP	UP
	HW	-	1	0,00126	0,10836
	UW	1	-	0,00024	0,03246
	HP	0,00126	0,00024	-	1
	UP	0,10836	0,03246	1	-

Tabelle 11: Adjustierter p-Wert Kriterium E: Füllung des Apex

Das Kriterium E ergab in der Präparationsgröße 35 bereits im Vergleich der Applikationsmethoden keine signifikanten Einzeleffekte, so dass die Präparationsgröße 35 nicht weiter untersucht wurde. In der Präparationsgröße 45 weist das Kriterium E die bereits aus den Kriterien A, B und D bekannte Gruppenbildung aus den Applikationsmethoden „Hypocal/Wattepellet“ und „Ultracal/Wattepellet“ sowie „Hypocal mit Verdichtung durch eine Papierspitze“ und „Ultracal mit Verdichtung durch eine Papierspitze“ auf. Vergleicht man beide Gruppen, so weisen die Applikationsmethoden, welche mit einem Wattepellet verdichtet wurden, einen signifikanten Unterschied in der Ergebnisqualität zu den Applikationsmethoden auf, welche mit einer Papierspitze verdichtet wurden. Somit kann geschlossen werden, dass die Verwendung von Papierspitzen zur Verdichtung in Bezug auf die Füllung des Apex signifikant schlechtere Ergebnisse liefert als die Verdichtung mit Wattepellets. Diese Schlussfolgerung ist unabhängig vom verwendeten Medikament.

4. Diskussion

4.1 Diskussion der Methode

Das Design der Studie wurde grundlegend an der Versuchsanordnung von Braun und Nolden (1999) ausgerichtet, da verschiedene andere Studien zur Applikation von Kalziumhydroxidpasten in Wurzelkanäle auf Basis dieses Versuchsaufbaus erstellt wurden oder einen ähnlichen Versuchsaufbau aufweisen (siehe unter anderem Sigurdsson et al. 1992, Rivera und Williams 1994, Staehle et al. 1997, Deveaux et al. 2000, Torres et al. 2004, Staemmler 2012).

Durch die Wahl eines ähnlichen Versuchsaufbaus kann eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erreicht werden. Diese Vergleichbarkeit wird jedoch dadurch geschwächt, dass teilweise extrahierte Zähne (Estrela et al. 2002, Simcock und Hicks 2006, Doro et al. 2011) und teilweise Wurzelkanalmodelle (Peters et al. 2005) für die Studien genutzt wurden. Die Ergebnisse der Studien mit extrahierten Zähnen wurden zwar auch *in vitro* erzielt, weisen jedoch durch das reale Untersuchungsobjekt möglichst praxisnahe Bedingungen auf.

Der wesentliche Nachteil der natürlichen Zähne besteht in ihrer sehr individuellen Wurzelkanalanatomie und der daraus folgenden schlechten bis unmöglichen Standardisierung der Wurzelkanäle (Schäfer et al. 2002, Torres et al. 2004). So weisen Estrela et al. (2002) ausdrücklich darauf hin, dass die Tiefe und Biegung des Wurzelkanals die Vollständigkeit der Füllung beeinflussen können. Künstliche Wurzelkanäle weisen daher den Vorteil einer hohen Standardisierung auf (Tronstad und Niemczyk 1986, Thompson und Dummer 1997, Schäfer et al. 2002), der jedoch die direkte Übertragung der Ergebnisse in die klinische Situation erschwert. Dies wird vor allem bedingt durch das verwendete Material und die gewählte Form.

Im Hinblick auf das Material der Wurzelkanalmodelle sind keine vergleichenden Studien bekannt, welche die physikalischen Eigenschaften des Polymethylmethacrylat mit den physikalischen Eigenschaften des Wurzelkandentins natürlicher Zähne vergleichen. Somit kann zum jetzigen Zeitpunkt keine Aussage über ein mögliches unterschiedliches Fließverhalten der Kalziumhydroxidpasten im künstlichen Wurzelkanal durch unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit beider Stoffe gemacht werden. Auch können mögliche Unterschiede im Haftverhalten der Kalziumhydroxidpasten am Polymethylmethacrylat und am Wurzelkanalentin nicht beurteilt werden. Abschließend kann

jedoch festgestellt werden, dass das Polymethylmethacrylat im Gegensatz zum Wurzelzementin hydrophobe Eigenschaften aufweist. Dies kann sich ebenfalls auf das Verhalten der Trägersubstanz der Kalziumhydroxidpaste auswirken.

Im Hinblick auf die Form der Wurzelkanalmodelle muss festgestellt werden, dass diese natürlich nicht die komplexe Anatomie des endodontischen Systems, sondern lediglich eine idealisierte Präparationsform widerspiegeln. Natürliche Wurzelkanäle weisen im Gegensatz zum Wurzelkanalmodell in den seltensten Fällen einen runden Querschnitt, sondern eher nierenförmige oder ovale Querschnitte auf (Wu et al. 2000). Letztere sind besonders in den apikalen 5 mm des Wurzelkanals vorzufinden und mechanisch nur mit der Gefahr einer Perforation zu präparieren (Lee et al. 2004).

Abschließend kann jedoch festgestellt werden, dass die genannten Vorteile der künstlichen Wurzelkanalmodelle die teilweise vermuteten Nachteile bei weitem überwiegen. Daher wurden für die vorliegende Studie künstliche Wurzelkanalmodelle aus Polymethylmethacrylat verwendet.

Eine weitere, wenn auch sehr geringe Fehlerquelle, stellt das Röntgen als bildgebendes Verfahren der Wurzelkanalmodelle dar. Da Kalziumhydroxid selbst nicht opak ist (Doro et al. 2011), wurden sowohl im Ultracal als auch im Hypocal vom Hersteller opake Stoffe beigemischt. Hierbei handelt es sich bei Ultracal um 2% Bariumsulfat (Ultradent 2006) und bei Hypocal um 5 % Bariumsulfat (Merz Dental 2013). Durch die Verwendung dieser praxisgebräuchlichen Medikamente wurde sichergestellt, dass eine ausreichende Röntgendichte für die Auswertung der Aufnahmen vorhanden war. Um gut vergleichbare Aufnahmen zu erhalten, müssen weiterhin bei allen Aufnahmen die Entfernung zwischen Wurzelkanalmodell und Röntgentubus und die KV-Einstellung des Röntgengeräts übereinstimmen. Dies wurde im Rahmen der Versuche durch Benutzung des nach DIN 6868-51/-5 (Deutsches Institut für Normung 2001) genormten Prüfkörpers und die Verwendung der gleichen KV-Einstellung (70 KV für 0,05 s) sichergestellt. Abschließend wurden alle Aufnahmen innerhalb des gemäß § 16 Abs. 3 Röntgenverordnung (RÖV 2003) vorgegebenen einmonatigen Prüfintervalls zur Konstanzprüfung von digitalen Röntgengeräten durchgeführt. Somit wurden alle Fehlerquellen beim Röntgen systematisch ausgeschlossen.

Die Reader stellen in ihrer Rolle als Auswerter der Röntgenaufnahmen einen entscheidenden Faktor in dieser Studie dar. Somit können voneinander abweichende Ergebnisinterpretationen der Röntgenbilder durch die Reader das Ergebnis der Studie stark beeinflussen.

Viele vorangegangene Studien, die sich mit der Effektivität endodontischer Maßnahmen beschäftigten, geben dem Reader nur die Möglichkeit, die Ergebnisse mit Erfolg/Misserfolg oder ja/nein zu bewerten (Vogel 2008). Bereits Goldman et al. (Goldman et al. 1972) bemängelten dieses Vorgehen, da die Ergebnisinterpretation durch den Reader als subjektiver Vorgang von verschiedensten Kriterien abhängt. Daher bewertet das für diese Studie entwickelte Score-System die Qualität der Kalziumhydroxidfüllung anhand von 5 Kriterien mit jeweils bis zu 3 Ausprägungen. Es lässt somit eine genauere und objektivere Bewertung der Qualität zu als eine reine ja/nein-Entscheidung.

Um den Einfluss der subjektiven Ergebnisinterpretation des Readers auf das Studienergebnis noch weiter zu senken, wurde im Vorfeld der Studie eine Kalibrierung der Reader vorgenommen. Im Rahmen der Kalibrierung erreichten die Reader eine „interindividuelle Übereinstimmung“ von 82% sowie eine „intraindividuelle Reproduzierbarkeit“ von 91% bei Reader 1 und 95% bei Reader 2. Diese gründliche Vorbereitung der Studie schlägt sich in der Auswertung deutlich nieder.

Der Vergleich der Reader ergab sowohl bei der Größe 35 als auch in der Größe 45 in allen Kriterien keine signifikanten Einzeleffekte. Somit kann geschlussfolgert werden, dass die Reader keine signifikant unterschiedliche Bewertung der vorgelegten Röntgenbilder vorgenommen haben. Der Vergleich der Interaktion zwischen Reader und Applikation ergab ebenfalls in allen Kriterien keine signifikanten Interaktionen. Somit kann geschlussfolgert werden, dass keine Methode und kein Medikament von den Readern bewusst bevorzugt wurde. Somit kann auch die Bewertung der Röntgenbilder durch die Reader als valide und vorurteilsfrei in Bezug auf die Medikamente und die Methoden bezeichnet werden, und die Ergebnisse der Studie können als belastbar angesehen werden.

Eine mögliche weitere Objektivierung der Ergebnisse wäre durch den Einsatz von Computersoftware zur Auswertung der Röntgenaufnahmen möglich. Teilweise werden solche Programme in der Auswertung endodontischer Röntgenaufnahmen auch be-

reits eingesetzt (Carvalho et al. 2007). Diese können bisher jedoch nur durch subtraktiven Pixelvergleich selbst kleinste Unterschiede in 2 Röntgenbildern exakt darstellen. Programme zur vollautomatischen Auswertung der „Vollständigkeit der Füllung“, „Qualität im apikalen Bereich“, „Überpressung“, „Blasengröße“ und „Füllung des Apex“ sind bisher nicht bekannt. Hinzu kommt, dass im Rahmen dieser Arbeit statistisch nachgewiesen wurde, dass die Reader keine signifikant unterschiedliche Bewertung der vorgelegten Röntgenbilder vorgenommen haben und dass keine Methode und kein Medikament von den Readern bewusst bevorzugt wurden. Somit erscheint eine weitere Objektivierung unnötig.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung zeigt deutlich, dass keine Kombination der verschiedenen Medikamente und Applikationsmethoden in allen Kriterien generell eine vollständige, nicht-überpresste und blasenfreie Füllung gewährleistet. Dies wird in anderen Studien (Sigurdsson et al. 1992, Staehle et al. 1997, Deveaux et al. 2000, Estrela et al. 2002, Torres et al. 2004, Peters et al. 2005, Doro et al. 2011, Staemmler 2012) bestätigt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte festgestellt werden, dass die Kombination Ultracal/Wattepellet die signifikant besten Ergebnisse der Studie lieferte. Nur im Kriterium Überpressung bei der Größe 35 war die Qualität von Hypocal, verdichtet mit einem Wattepellet, besser. Dieser Unterschied war allerdings nicht signifikant.

Der Einsatz von Hypocal unter Verwendung von Wattepellets brachte die signifikant zweitbesten Ergebnisse mit der genannten Ausnahme des Kriteriums Überpressung bei der Präparationsgröße 35.

Die signifikant schlechtesten Ergebnisse erzielte die Applikation mit einer Papierspitze, wobei das Ergebnis von der Art des Medikamentes sowie von der Präparationsgröße unabhängig war.

Die isolierte Betrachtung der Applikationsmethode zeigt, dass die Verdichtung mit einem Wattepellet signifikant bessere Ergebnisse liefert als der Einsatz von Papierspitzen.

Dieses Ergebnis stützt die Untersuchungen von Braun und Nolden (1999), welche 860 künstliche Wurzelkanalmodelle mit Präparationsgrößen zwischen 15 und 40 mit Kalziumhydroxidpasten mit 7 verschiedenen Applikationsmethoden befüllten. Bei zwei Methoden wurde eine zusätzliche Verdichtung mit einem Wattepellet durchgeführt. Braun

und Nolden (1999) kamen dabei zu dem Ergebnis, dass die Verdichtung mit einem Wattepellet unabhängig von der Präparationsgröße zur vollständigen Auffüllung des apikalen Kanalbereichs und zur zusätzlichen Verdichtung der Kalziumhydroxideinlage führt.

Estrela et al. (2002) untersuchten verschiedene Applikationsmethoden wie den McSpadden-Kompaktor, einen Lentulo und den Einsatz der zuletzt für die Kanalpräparation genutzten Feilengröße in Kombination mit Papierspitzen zum Verdichten der medikamentösen Einlage. Als Bewertungskriterium wurde die Anzahl der vorhandenen Blasen genutzt. Die Feile mit anschließender Verdichtung führte zu den signifikant besten Ergebnissen, gefolgt von der Applikation mit einem Lentulo. Die signifikant schlechtesten Ergebnisse lieferte der McSpadden-Kompaktor. Kombiniert man diese Ergebnisse mit denen der vorliegenden Studie, kann geschlussfolgert werden, dass die Verdichtung mit Wattepellets ebenfalls dem Lentulo und dem McSpadden-Kompaktor überlegen seien müsste. Zulässig ist dieser Schluss, da die Verdichtung mit Wattepellets in der vorliegenden Studie signifikant bessere Ergebnisse als die Verdichtung mit der Papierspitze erzeugte, welche wiederum bei Estrela et al. (2002) dem Lentulo überlegen war.

Peters et al. (2005) untersuchten die Applikation von Kalziumhydroxid mittels Spritze und Lentulo in künstliche Wurzelkanäle. Die Autoren füllten die Kanäle bis zur Öffnung mit Kalziumhydroxyd und verschlossen sie mit Cavit. Anschließend wurden die Modelle gewogen und mit einem idealgefüllten Kanal verglichen. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass kein Unterschied im Gewicht in Abhängigkeit zur Applikationsmethode nachweisbar war. Auf diesem ersten Vergleich aufbauend simulierten Peters et al. (2005) den apikalen Gewebedruck mit einer Flüssigkeit über einen bestimmten Zeitraum und werteten die anschließend erstellten Röntgenbilder aus. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die Applikation mit dem Lentulo in der Röntgenauswertung der Injektion mit einem Spritzensystem signifikant überlegen.

Ähnliche Ergebnisse erreichten Staehle et al. (1997) in ihrer Untersuchung der Applikation von Kalziumhydroxid in 60 menschliche einwurzelige Zähnen mit einer Spritze, einem Lentulo und einem Reamer. Die Autoren wiesen dabei nach, dass Lentulo und Spritzensystem signifikant bessere Ergebnisse erreichten als die Verwendung eines Reamers.

Es kann also auf Basis der Ergebnisse der genannten Untersuchungen geschlossen werden, dass die Verdichtung mit Wattepellets auch der Applikation mit einer Injektionskanüle bzw. der Verwendung eines Reamers überlegen sein müsste, da der Lentulo signifikant schlechter war als der Einsatz von Papierspitzen, diese jedoch wiederum der Verdichtung mit Wattepellets in der vorliegenden Studie signifikant unterlegen waren.

Sigurdsson et al. (1992) verglichen die Applikation von Kalziumhydroxid in gekrümmte Wurzelkanäle von Molaren mit Hilfe eines Lentulos, dem Calasept-Injektionssystem in Kombination mit einem Finger-Plugger der Größe 25 und einer gegen den Uhrzeigersinn rotierenden K-Feile der Größe 25. Die Wurzelkanallänge wurde gemessen und die Wurzelkanäle wurden 1 mm kürzer als die absolute Kanallänge aufbereitet. Dabei erzielte der Lentulo signifikant bessere Ergebnisse als das Calasept-Injektionssystem. Die signifikant schlechtesten Ergebnisse wurden mit der K-Feile erreicht. Somit führte die Verdichtung mit einem Wattepellet vermutlich auch zu besseren Ergebnissen als der Einsatz des Calasept-Injektionssystems und der K-Feile.

Torres et al. (1994) verglichen die Applikation von Kalziumhydroxid in Wurzelkanalmodelle mit Hilfe einer Ultradent-Spritze, der Benutzung der Spritze mit anschließender Verdichtung mit einem Lentulo und dem alleinigen Einsatz des Lentulos. Dabei war die alleinige Verwendung des Lentulos beiden anderen Applikationsformen signifikant überlegen. In den apikalen Kanalabschnitten schnitten der Lentulo und der kombinierte Einsatz qualitativ gleichwertig ab, waren jedoch der Spritzenapplikation signifikant überlegen. Es kann also geschlossen werden, dass die Verdichtung mit Wattepellets auch der Applikation mit einer Herstellerspritze überlegen ist. Dieser Schluss ist zulässig, da die Herstellerspritze bei Torres et al. (1994) dem Lentulo signifikant unterlegen war. Der Lentulo war wiederum dem Einsatz von Papierspitzen bei Estrela et al. (2002) signifikant unterlegen. Abschließend wurde in der vorliegenden Studie nachgewiesen, dass der Einsatz von Papierspitzen der Verdichtung mit Wattepellets signifikant unterlegen ist. Diese Schlussfolgerung deckt sich wiederum mit den bereits vorgestellten Ergebnissen von Braun und Nolden (1999).

Die Ergebnisse einer Studie von Simcock und Hicks (2006) stimmen hingegen nicht mit den vorgestellten Schlussfolgerungen überein. Sie untersuchten das Gewicht und die Röntgenbilder von Prämolaren, welche bis zu einer apikalen Größe von #25 und #40 präpariert wurden. Hierbei sollte durch die Aufbereitung mit #25 die Präparation

als Notfall und mit der Aufbereitung mit #40 eine vollständige Präparation simuliert werden. Anschließend wurde Kalziumhydroxid mittels Injektionssystem, Flex-O-System, Lentulo und mit einer rotierenden NiTi-Feile der Konizität 4% appliziert. Es wurden in beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf die Applikationsmethode festgestellt. Dies ist die einzige Studie, in der zwischen verschiedenen Applikationsmethoden keine signifikanten Unterschiede ermittelt wurden.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Studien kann geschlussfolgert werden, dass die Verdichtung mit Wattepellets allen anderen Applikationsmethoden überlegen ist. In zukünftigen Untersuchungen sollte überprüft werden, ob sich mit Lentulos, verschiedenen Spritzensystemen oder anderen Applikationsmethoden in Kombination mit einer zusätzlichen Verdichtung mit einem Wattepellet bessere Ergebnisse erzielen lassen.

Die isolierte Betrachtung der eingesetzten Medikamente zeigt bis auf eine Ausnahme keine signifikanten Unterschiede zwischen Ultracal und Hypocal. Diese Ausnahme besteht in der Vollständigkeit der Füllung und bezieht sich nur auf den Vergleich von Hypocal/Papierspitze und Ultracal/Papierspitze. In beiden Präparationsgrößen liefert Ultracal signifikant bessere Ergebnisse als Hypocal. Dies kann jedoch an der bereits erwähnten niedrigeren Viskosität von Ultracal liegen. Da in den Applikationsmethoden mit Wattepellet zwischen beiden Medikamenten jedoch kein signifikanter Unterschied auftritt, kann auch hieraus geschlussfolgert werden, dass die anschließende Verdichtung mit Wattepellets die Qualität deutlich verbessert.

Da in vorangegangenen Studien jeweils nur ein Medikament und zudem von Studie zu Studie unterschiedliche Medikamente eingesetzt wurden, ist die Vergleichbarkeit der Studien nur bedingt gegeben. Es wurden folgende Medikamente verwendet:

- selbstgemischte Kalziumhydroxidpaste (Sigurdson et al. 1992, Doro et al. 2011),
- CALXYL blau (Staehele et al. 1997),
- Quimis (Estrela et al. 2002),
- Ultracal XS (Torres et al. 2004, Simcock und Hicks 2006),
- Pulpdent (Peters et al. 2005),

Die Resultate der vorliegenden Arbeit konnten keinen signifikanten Unterschied zwischen den verwendeten Medikamenten belegen.

Studien, die sich mit unterschiedlichen Trägersubstanzen für Kalziumhydroxidpasten beschäftigen, weisen signifikante Unterschiede zwischen den verwendeten Trägersubstanzen aus. Rivera und Williams (1994) füllten je 28 Wurzelkanalmodelle mit verschiedenen Kalziumhydroxidpasten, die zuvor mit Wasser oder mit Glycerin angemischt wurden. Bei der anschließenden Röntgenauswertung war die Mischung mit Glycerin der Mischung mit Wasser sowohl hinsichtlich der Fülltiefe und als auch hinsichtlich der Füllichte in allen Abschnitten des Wurzelkanals signifikant überlegen. Da diese Ergebnisse in der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden konnten, liegt die Vermutung nahe, dass die verwendeten Medikamente unter Umständen trotz unterschiedlicher Viskosität eine ähnliche Trägersubstanz nutzen. Auf Anfrage teilte C. Bobrowski von der Merz Dental GmbH in einer Email vom 7. Mai 2013 mit, dass die Trägersubstanz von Hypocal gereinigtes Wasser ist. Leider war zur Trägersubstanz von Ultracal XS weder von der UP Dental GmbH noch von der Ultradent Products Inc. eine Stellungnahme zu erhalten. Komabayashi et al. stellte jedoch fest, dass Ultracal XS neben den bereits beschriebenen Mengen von Kalziumhydroxid und Bariumsulfat (siehe Tabelle 3) Wasser und Additive enthält (Komabayashi et al. 2010). Somit wird die Vermutung bestätigt, dass Hypocal und Ultracal die gleiche Trägersubstanz beinhalten und sich nur in der Viskosität und den nicht näher spezifizierten Additiven unterscheiden.

4.3 Schlussfolgerungen

Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Studie ist festzustellen, dass:

- keine Kombination aus Medikament und Applikationstechnik in allen Kriterien generell eine vollständige, nicht-überpresste und blasenfreie Füllung gewährleistet.
- die signifikant beste Qualität durch eine 3-malige Applikation der Kalziumhydroxid-Paste mit anschließender Verdichtung mit einem Wattepellet erreicht wurde.
- keine signifikanten Unterschiede in der Qualität der Kalziumhydroxideinlage bei der Verwendung von Ultracal und Hypocal nachgewiesen werden konnten.

5. Zusammenfassung

Ziel der Studie: Das Ziel der Studie war es, verschiedene Applikationsmethoden und Medikamente auf die erzielbare Homogenität der Füllung bei der Einbringung einer Kalziumhydroxid-Paste in den Wurzelkanal zu untersuchen. Weiterhin sollte die Untersuchung für zwei verschiedene Präparationsgrößen des Wurzelkanals erfolgen.

Material und Methode: Für die Versuche wurden 160 konfektionierte Wurzelkanalmodelle verwendet, die vor ihrer Verwendung auf die apikale Gängigkeit überprüft wurden. Anschließend erfolgte die randomisierte Aufteilung der Proben gemäß den Präparationsgrößen 35 und 45 in zwei Hauptgruppen ($n = 80$), die wiederum in jeweils vier Untergruppen ($n = 20$) aufgeteilt wurden. Die jeweils 80 künstlichen Wurzelkanäle der beiden Hauptgruppen wurden standardisiert bis zur Größe 35 und bis zur Größe 45 präpariert.

Die so präparierten Wurzelkanalmodelle wurden mit verschiedenen Medikamenten und Methoden jeweils für die Größe 35 und 45 gefüllt. Die erste Untergruppe wurde mit Hypocal gefüllt und anschließend mit einem Wattepellet verdichtet. Die zweite Untergruppe wurde mit Hypocal gefüllt, das anschließend mit einer Papierspitze im Kanal verteilt wurde, mit Hypocal nachappliziert und abschließend mit einem Wattepellet verdichtet. Die Applikationsmethode der dritten Untergruppe entspricht der Methode der ersten Gruppe, jedoch wurde Ultracal als Medikament genutzt. Die vierte Untergruppe wurde äquivalent zur zweiten Untergruppe mit Ultracal gefüllt.

Die Wurzelkanalmodelle wurden geröntgt und mit Hilfe eines Score-Systems von zwei kalibrierten Untersuchern ausgewertet. Die Ergebnisse wurden nach einem nichtparametrischen Rangverfahren für longitudinale Daten für die Kriterien „Vollständigkeit der Füllung“, „Qualität im apikalen Bereich“, „Überpressung“, „Blasengröße“ und „Füllung des Apex“ ausgewertet. Weiterhin wurden Paarvergleiche der Applikationsmethoden „Hypocal/Wattepellet“, „Ultracal/Wattepellet“, „Hypocal mit Verdichtung durch eine Papierspitze“ und „Ultracal mit Verdichtung durch eine Papierspitze“ für multiples Testen adjustiert nach Tukey angestellt. Die Untersuchungen wurden getrennt für die Größen 35 und 45 durchgeführt.

Ergebnis: Es konnte nachgewiesen werden, dass keine Medikament-Applikations-Kombination in allen Kriterien generell eine vollständige, nicht-überpresste und blasenfreie Füllung gewährleistet. Weiterhin wurde aufgezeigt, dass die signifikant beste Füllqualität durch eine 3-malige Applikation der Kalziumhydroxid-Paste mit anschließender Verdichtung mit einem Wattepellet erreicht wurde. Es lag kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Kalziumhydroxid-Medikamenten hinsichtlich der Füllqualität vor.

Schlussfolgerung: Die beste Füllqualität wurde unabhängig vom Medikament nach 3-maliger Applikation des Kalziumhydroxids und anschließender Verdichtung mit einem Wattepellet erzielt.

6. Literaturverzeichnis

- Accorinte Mde L, Holland R, Reis A, Bortoluzzi MC, Murata SS, Dezan E Jr, Souza V, Alessandro LD (2008): Evaluation of mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide cement as pulp-capping agents in human teeth. *J Endod* 34, 1-6
- Andersen M, Lund A, Andreasen JO, Andreasen FM (1992): In vitro solubility of human pulp tissue in calcium hydroxide and sodium hypochlorite. *Endod Dent Traumatol* 8, 104-108
- Ando N, Hoshino E (1990): Predominant obligate anaerobes invading the deep layers of root canal dentin. *Int Endod J* 23, 20-27
- Athanassiadis B, Abbott PV, Walsh LJ (2007): The use of calcium hydroxide, antibiotics and biocides as antimicrobial medicaments in endodontics. *Aust Dent J* 52, 64-82
- Attin T, Hellwig E (1993): Erfolgsaussichten der direkten Pulpaüberkappung bei Zähnen mit Caries profunda. *Quintessenz* 44, 1613-1622
- Berkiten M, Okar I, Berkiten R (2000): In vitro study of the penetration of *Streptococcus sanguis* and *Prevotella intermedia* strains into human dentinal tubules. *J Endod* 26, 236–239
- Braun A, Nolden R (1999): Applikation eines Kalziumhydroxid-Pastenpräparates in ISO genormte Kanallumina. *Dtsch Zahnärztl Z* 54, 258
- Brunner, E, Domhof S, Langer F: Nonparametric analysis of longitudinal data in factorial experiments. John Wiley & Sons, New York, USA 2001
- Byström A, Sundqvist G (1981): Bacteriologic evaluation of the efficacy of mechanical root canal instrumentation in endodontic therapy. *Scand J Dent Res* 89, 321-328
- Byström A, Sundqvist G (1985): The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. *Int Endod J* 18, 35-40
- Carotte P (2004): Endodontics: Part 9. Calcium hydroxide, root resorption, endo-perio lesions. *Br Dent J* 197, 735-743
- Carvalho FB, Gonçalves M, Tanomaru-Filho M (2007): Evaluation of chronic periapical lesions by digital subtraction radiography by using Adobe Photoshop CS: a technical report. *J Endod* 33, 493-497
- Cvek M, Sundström B (1974): Treatment of non-vital permanent incisors with calcium hydroxide. V. Histologic appearance of roentgenographically demonstrable apical closure of immature roots. *Odontol Revy* 25, 379-391
- De Bruyne MA, De Moor RJ, Raes FM (2000): Necrosis of the gingiva caused by calcium hydroxide: a case report. *Int Endod J* 33, 67-71

- Deutsches Institut für Normung e.V. (2001): DIN 6868-5:2001-01 - Sicherung der Bildqualität in röntgendiagnostischen Betrieben - Teil 5: Konstanzprüfung in der zahnärztlichen Röntgenaufnahmetechnik. Beuth-Verlag, Berlin 2001
- Deveaux E, Dufour D, Boniface B (2000): Five methods of calcium hydroxide intracanal placement: an in vitro evaluation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radio Endod* 89, 349-355
- Doro M, Blitzkow G, Batista A, Estrela C (2011): Root canal filling with calcium hydroxide paste using Lentulo spirale at different speeds. *Dental Press Endod* 1, 5-63
- Estrela C, Sydney GB, Bammann LL, Felipe Jr O (1995): Mechanism of action of calcium and hydroxyl ions of calcium hydroxide on tissue and bacteria. *Braz Dent J* 6, 85-90
- Estrela C, Mamede Neto I, Lopes HP, Estrela CR, Pécora JD (2002): Root canal filling with calcium hydroxide using different techniques. *Braz Dent J* 13, 53-56
- European Society of Endodontology (2006): Quality Guidelines- Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology; *Int Endod J*, 39, 921-930
- Faraco IM Jr, Holland R (2001): Response of the pulp of dogs to capping with mineral trioxide aggregate or a calcium hydroxide cement. *Dent Traumatol* 17, 163-166
- Fava LR, Saunders WP (1999): Calcium hydroxide pastes: classification and clinical indications. *Int Endod J* 32, 257-282
- Fernandes AM, Silva GA, Lopes N Jr, Napimoga MH, Benatti BB, Alves JB, Horizonte B, Gerais UM (2008): Direct capping of human pulps with a dentin bonding system and calcium hydroxide: an immunohistochemical analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 105, 385-390
- Figini L, Lodi G, Gorni F, Gagliani M (2008): Single versus multiple visits for endodontic treatment of permanent teeth: a Cochrane systematic review. *J Endod.* 34, 1041-1047
- Goldman M, Pearson AH, Darzenta N (1972): Endodontic success--who's reading the radiograph? *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 33, 432-437
- Gomes BP, Ferraz CC, Vianna ME, Rosalen PL, Zaia AA, Teixeira FB, Souza-Filho FJ (2002): In vitro antimicrobial activity of calcium hydroxide pastes and their vehicles against selected microorganisms. *Braz Dent J* 13, 155-161
- Gomes BP, Pinheiro ET, Jacinto RC, Zaia AA, Ferraz CC, Souza-Filho FJ (2008): Microbial analysis of canals of root-filled teeth with periapical lesions using polymerase chain reaction. *J Endod* 34, 537-540
- Haenni S, Schmidlin PR, Mueller B, Sener B, Zehnder M (2003): Chemical and antimicrobial properties of calcium hydroxide mixed with irrigating solutions. *Int Endod J* 36, 100-105

- Hand RE, Smith ML, Harrison JW (1978): Analysis of the effect of dilution on the necrotic tissue dissolution property of sodium hypochlorite. *J Endod* 4, 60–64
- Herrmann BW: Kalziumhydroxid als Mittel zum Behandeln und Füllen von Wurzelkanälen. Med. Diss. Würzburg 1920
- Hülsmann M: Die Aufbereitung des Wurzelkanals. in: Endodontie; Hrsg. Heidemann D. Urban & Fischer, München/Jena 2001, 80-116
- Hülsmann M: Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten – eine Bilanz. in: Wurzelkanalaufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten – ein Handbuch. Hrsg. v. Hülsmann M Quintessenz Verlag, Berlin 2002, 11-34
- Hülsmann M (2006): Die Desinfektion des endodontischen Systems. *Endodontie* 15, 147-168
- Hülsmann M, Lorch V, Franz B (1996): Reproduzierbarkeit des Periapical Probability Index (PRI). *Zahnärztliche Welt* 105, 366-372
- Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH (2005): Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics* 10, 30-76
- Itoh A, Higuchi N, Minami G, Yasue T, Yoshida T, Maseki T, Nakamura H (1999): A survey of filling methods, intracanal medications, and instrument breakage. *J Endod* 25, 823-824
- Jensen JR (1963): A simplified technique for pulpotomy and root canal therapy. *Dent Clin North Am*, 361-373
- Komabayashi T, Zhu Q, Ahn C, Spångberg LSW: Morphology of Fine Particles in UltraCal® XS for Endodontics. Zitiert nach der Inhaltsangabe des Vortrages (gehalten 03.03.2010) in: 2010 Annual Session of the American Association of Endodontists, San Diego (Californien), 14. April bis 17. April 2010, Programm und Inhaltsangaben; o. Hrsg., o. Verl.. http://www.aae.org/uploadedFiles/Continuing_Education/Annual_Session/March10JOEAbstracts.pdf; abgerufen 16.05.2013
- Law A, Messer H (2004): An evidence-based analysis of the antibacterial effectiveness of intracanal medicaments. *J Endod* 30, 689-694
- Lee M, Winkler J, Hartwell G, Stewart J, Caine R (2009): Current trends in endodontic practice: emergency treatments and technological armamentarium. *J Endod* 35, 35-39
- Lee SJ, Wu MK, Wesselink PR (2004): The effectiveness of syringe irrigation and ultrasonics to remove debris from simulated irregularities within prepared root canal walls. *Int Endod J* 37, 672-678
- Leonardo MR, Simões Filho AP, Esberard RM, Bonetti Filho I, Leonardo Rde T (1993): Safe and easy way to use calcium hydroxide as a temporary dressing. *J Endod* 19, 319-320

Löst C, Wesselink PR, Winkler R. (1992): Grundlagen und Prinzipien der modernen Endodontie. *Endodontie* 1, 7-18

Merz Dental GmbH: Gebrauchsinformation - Hypocal® Economy-Pack; www.merz-dental.de/lib/download.php?file=2_58_3.pdf&filename=gi_hypocal_eco-pck_2006-06_01.pdf; abgerufen 05.05.2013

Molander A, Reit C, Dahlén G, Kvist T (1998): Microbiological status of root-filled teeth with apical periodontitis. *Int Endod J* 31, 1–7

Naenni N, Thoma K, Zehnder M (2004): Soft tissue dissolution capacity of currently used and potential endodontic irrigants. *J Endod* 30, 785–787

Naito T (2008): Single or multiple visits for endodontic treatment? *Evid Based Dent* 9, 24

Peters CI, Koka RS, Highsmith S, Peters OA (2005): Calcium hydroxide dressings using different preparation and application modes: density and dissolution by simulated tissue pressure. *Int Endod J* 38, 889-895

Peters LB, Wesselink PR, Buijs JF, van Winkelhoff AJ (2001): Viable bacteria in root dentinal tubules of teeth with apical periodontitis. *J Endod* 27, 76-81

Pinheiro ET, Gomes BP, Ferraz CC, Sousa EL, Teixeira FB, Souza-Filho FJ (2003): Microorganisms from canals of root-filled teeth with periapical lesions. *Int Endod J* 36, 1–11

Podbielski A, Spahr A, Haller B (2003): Additive antimicrobial activity of calcium hydroxide and chlorhexidine on common endodontic bacterial pathogens. *J Endod* 29, 340-345

Rehman K, Saunders WP, Foye RH, Sharkey SW (1996): Calcium ion diffusion from calcium hydroxide-containing materials in endodontically-treated teeth: an in vitro study. *Int Endod J* 29, 271-279

Rivera EM, Williams K (1994): Placement of calcium hydroxide in simulated canals: comparison of glycerin versus water. *J Endod* 20, 445-448

Rôças IN, Hülsmann M, Siqueira JF Jr (2008) Microorganisms in root canal-treated teeth from a German population. *J Endod* 34, 926–931

Rödig T, Hülsmann M (2003): Diagnosis and root canal treatment of a mandibular second premolar with three root canals. *Int Endod J* 36, 912-919

Schäfer E, Diez C, Hoppe W, Tepel J (2002): Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth. *J Endod* 28, 211-216

Schlitten R: Statistische Auswertungen: Standardmethoden und Alternativen mit ihrer Durchführung in R; Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2004

- Shahravan A, Jalali S, Mozaffari B, Pourdanghan N (2012): Overextension of nonsetting calcium hydroxide in endodontic treatment: literature review and case report. *Iran Endod J* 7, 102-108
- Sigurdsson A, Stancill R, Madison S (1992): Intracanal placement of Ca(OH)₂: a comparison of techniques. *J Endod* 18, 367-370
- Simcock RM, Hicks ML (2006): Delivery of calcium hydroxide: comparison of four filling techniques. *J Endod* 32, 680-682
- Siqueira FJ, Lopes HP (2002): Kalziumhydroxid als antimikrobielle Einlage in der Endodontie - Wirkungsmechanismen, Vorteile und Grenzen. *Endodontie* 11, 222-347
- Siqueira JF Jr, de Uzeda M (1997): Intracanal medicaments: evaluation of the antibacterial effects of chlorhexidine, metronidazole, and calcium hydroxide associated with three vehicles. *J Endod* 23, 167-169
- Staehele HJ, Thomä C, Müller HP (1997): Comparative in vitro investigation of different methods for temporary root canal filling with aqueous suspensions of calcium hydroxide. *Endod Dent Traumatol* 13, 106-112
- Staemmler K: Vergleichende Untersuchung zur Applikation von Kalziumhydroxideinlagen; Med. Diss. Göttingen 2012
- Stellungnahme der DGZMK und der DGZ (2000): Wurzelkanalaufbereitung. *Dtsch Zahnärztl Z* 55, 719
- Su Y, Wang C, Ye L (2011): Healing rate and post-obturation pain of single- versus multiple-visit endodontic treatment for infected root canals: a systematic review. *J Endod* 37, 125-132
- Teixeira LS, Demarco FF, Coppola MC, Bonow ML (2001): Clinical and radiographic evaluation of pulpotomies performed under intrapulpal injection of anaesthetic solution. *Int Endod J* 34, 440-446
- Thompson SA, Dummer PM (1997): Shaping ability of Lightspeed rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. Part 1. *J Endod* 23, 698-702
- Torres CP, Apicella MJ, Yancich PP, Parker MH (2004): Intracanal placement of calcium hydroxide: a comparison of techniques, revisited. *J Endod* 30, 225-227
- Tronstand L, Niemczyk SP (1986): Efficacy and safety tests of six automated devices for root canal instrumentation. *Endod Dent Traumatol* 2, 270-276
- Trope M, Bergenholtz G (2002): Microbiological basis for endodontic treatment: can a maximal outcome be achieved in one visit? *Endod Topics* 1, 40-53
- Türkün M, Cengiz T (1997): The effects of sodium hypochlorite and calcium hydroxide on tissue dissolution and root canal cleanliness. *Int Endod J* 30, 335-342

Tziafas D, Pantelidou O, Alvanou A, Belibasakis G, Papadimitriou S (2002): The dentinogenic effect of mineral trioxide aggregate (MTA) in short-term capping experiments . *Int Endod J* 35, 245-254

Ultradent Products USA: Sicherheitsdatenblatt Ultracal XS, 20.12.2006; http://www.updental.de/pdf_sbb_sbys_2008/sdb_ultracal_xs_2006_12_20.pdf, abgerufen 01.03.2010

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung - RöV), Neugefasst durch Bek. v. 30. 4.2003; http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/r_v_1987/gesamt.pdf; Abruf 18.01.2013

Vogel S: Vergleichende Studie zur Entfernung von Kalziumhydroxideinlagen mit unterschiedlichen Spüllösungen. Med. Diss. Göttingen 2008

Waltimo TM, Orstavik D, Sirén EK, Haapasalo MP. (1999): In vitro susceptibility of *Candida albicans* to four disinfectants and their combinations. *Int Endod J* 32, 421-429

Wu MK, R'oris A, Barkis D, Wesselink PR (2000): Prevalence and extent of long oval canals in the apical third. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 89, 739-743

Yang SF, Rivera EM, Baumgardner KR, Walton RE, Stanford C (1995): Anaerobic tissue-dissolving abilities of calcium hydroxide and sodium hypochlorite. *J Endod* 21, 613-616

Zehnder M, Lehnert B, Schönenberger K, Waltimo T (2003): Spüllösungen und medikamentöse Einlagen in der Endodontie. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 113, 756-763

Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael Hülsmann für die Übernahme des Hauptreferats und Herrn PD Dr. Nikolaus Gersdorff als Korreferent.

Stellvertretend für die Abteilung für Medizinische Statistik der Georg-August-Universität Göttingen, die die statistische Auswertung der erhobenen Daten durch die Bereitstellung von Programmen und Methoden ermöglichte, danke ich Dr. Frank Konitschke, der mir die Statistik näher brachte und die Auswertungen mehrfach mit mir diskutierte.

Herrn Dr. Kai Staemmler danke ich für die Möglichkeit, die Versuchsergebnisse offen zu diskutieren.

Zuletzt und zuallererst gilt mein Dank Frau PD Dr. Tina Rödiger, die mich in den letzten 5 Jahren betreute. Ständige Ansprechbarkeit und Hilfsbereitschaft sowie der Blick für die Einordnung der Arbeit in den aktuellen wissenschaftlichen Kontext waren für mich eine wichtige Motivationsquelle.