

Aus der Universitätspoliklinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie  
des Departments für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
(Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Hans-Günter Schaller)

**Randdichtigkeitsverhalten von Pro Root™ MTA, Biodentine™, Ketac™ fil Plus  
Aplicap™ und  
Super-EBA® an Wurzeldentin  
in verschiedenen retrograden Kavitäten  
(eine in-vitro Studie)**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Zahnmedizin (Dr. med. dent.)

vorgelegt

der Medizinischen Fakultät  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Henk Fichtel geboren am 17.05.1993 in Bad Kreuznach

Betreuer: Prof. Dr. med. dent. Habil. C.R. Gernhardt

Gutachter:

1. Prof. Dr. med. dent. Habil. C.R. Gernhardt
2. Univ.-Prof. Dr. med.dent. Hans-Günter Schaller
3. Prof. Dr. Karl-Thomas Wrbas (Freiburg)

25.09.2018

19.08.2019

*Für Natascha, Nelly*

*Sylvia und Michael*

## Referat

Die Zielstellung dieser Studie war es, die Randständigkeit verschiedener retrograder Füllungsmaterialien in unterschiedlich konfigurierten retrograden Kavitäten auf unterschiedlichen Schnitthöhen lichtmikroskopisch zu untersuchen. Sie wurden untereinander auf ihr Adaptationsverhalten an der Grenzfläche zum Wurzelentin hin sowie bezüglich ihrer Homogenität untersucht. Als Kontrollgruppe dienten Proben mit vor der Wurzelspitzenresektion gelegter orthograder Guttaperchafüllung. Für die vorliegende Studie wurden 135 humane, extrahierte, einwurzelige, einkanalige Zähne benutzt, die ohne vorangegangene endodontische Behandlung waren, keine kariösen Läsionen, Füllungen oder Frakturen aufwiesen und über ein abgeschlossenes Wurzelwachstum verfügten. Die Verarbeitung der Proben erfolgte unter standardisierten Bedingungen und unter Simulation eines praxisnahen Workflows. Aus der Kombination der retrograden Kavitätenkonfiguration, den retrograden Füllungsmaterialien und der Schnitthöhe innerhalb der retrograden Kavität wurden die vorbereiteten Proben randomisiert in 27 Gruppen (Gruppe 1-27) eingeteilt. Nach der Präparation der retrograden Kavität erfolgte die retrograde Füllungslegung nach Herstellerangaben. Anschließend wurden je retrograde Füllung drei histologische Schnitte auf definierten Höhen (1mm, 2mm, 3mm) von der apikalen Resektionsfläche zur lichtmikroskopischen Untersuchung gefertigt. Mit Hilfe einer Auswertungssoftware wurde hiernach der Anteil der Grenzfläche zwischen Dentin und Füllungsmaterial gemessen, der keine Randständigkeit aufwies. Weiterhin wurde der maximale Randspalt gemessen sowie der Anteil an Lufteinschlüssen innerhalb der Füllungsmaterialien. So konnte eine quantitative Aussage über das Adaptationsverhalten sowie die Homogenität retrograder Füllungsmaterialien gemacht werden. Alle verwendeten Materialien zeigten eine Randspaltbildung sowie das Vorhandensein von Lufteinschlüssen. Die retrograde Präparation mit Unterschnitt (U) zeigte im Vergleich zur parallelen Präparation (P) einen signifikant geringeren Anteil an imperfektem Rand sowie Lufteinschlüssen, weiterhin eine nicht signifikant geringere maximale Randspaltbildung. Der geringste Anteil an imperfektem Rand und Lufteinschlüssen war bei der Versuchsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA-Füllung (MT) zu finden, dieses Material zeigte außerdem im Mittel die geringste maximale Randspaltbildung. Bei der Betrachtung des Adaptationsverhaltens in Material- und Präparationsabhängigkeit wies Pro Root™ MTA bei paralleler Präparation (MT-P) den geringsten mittleren Anteil an imperfektem Rand sowie Lufteinschlüssen auf. Den geringsten maximalen Randspalt zeigte die Versuchsgruppe mit retrograder Biodentine™-Füllung bei Präparation mit Unterschnitt (BI-U). Bezüglich der Schnitthöhe wurde der geringste mittlere Anteil imperfekten Randes bei der retrograden Füllung mit Super-EBA® auf koronaler Schnitthöhe (SE-K) ermittelt. Den geringsten mittleren maximalen Randspalt zeigte die Versuchsgruppe Super-EBA® intermediär (SE-I), den geringsten mittleren Anteil an Lufteinschlüssen die Versuchsgruppe Pro Root™ MTA intermediär (MT-I). Zwischen allen erfassten Werten und zwischen den einzelnen Versuchsgruppen ergab die Varianzanalyse der Einfachklassifikation signifikante Unterschiede der gemessenen Werte ( $p \leq 0,05$ ; ANOVA, analysis of variance). Die Auswertung der Ergebnisse führt zu der Schlussfolgerung, dass verschiedene Kombinationen aus retrograder Präparation, Füllungsmaterial und Tiefe der Kavität in-vitro ein verringertes Adaptationsverhalten sowie eine verringerte Homogenität bedingen. Der signifikante Einfluss verschiedener Material- und Präparationskombinationen kann möglicherweise durch Unterschiede in der Verarbeitbarkeit sowie den Materialeigenschaften erklärt werden.

Fichtel, Henk: Randdichtigkeitsverhalten von Pro Root™ MTA, Biodentine™, Ketac™ fil Plus Aplicap™ und Super-EBA® an Wurzelentin in verschiedenen retrograden Kavitäten (eine in-vitro Studie). Halle (Saale), Univ., Med. Fak., Diss., 80 Seiten, 2019

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis .....	V
1. Einleitung .....	1
1. 1 Pathogenese apikaler Läsionen .....	1
1. 2 Erscheinungsform periapikaler Läsionen .....	2
1. 3 Die Wurzelfüllung .....	3
1. 4 Definition Wurzelspitzenresektion.....	4
1. 5 Indikationen zur Wurzelspitzenresektion.....	4
1. 6 Mögliche Indikationen zur Wurzelspitzenresektion .....	5
1. 7 Die Wurzelspitzenresektion .....	5
1. 8 Präparation der retrograden Kavität.....	6
1. 8. 1 Mikroskop-Technik .....	6
1. 8. 2 Schall-Technik.....	7
1. 9 Die retrograde Füllung.....	8
1. 10 Füllungsmaterialien .....	8
1. 10. 1 Amalgam .....	8
1. 10. 2 Komposite .....	10
1. 10. 3 Mineral-Trioxid-Aggregat .....	11
1. 10. 4 Glasionomere Zemente .....	12
1. 10. 5 Verstärkte Zinkoxid-Eugenol-Zemente.....	14
2. Zielstellung .....	15
3. Material und Methoden.....	16
3. 1 Material .....	16
3. 1. 1 Zahnproben .....	16
3. 1. 2 Materialien zur Vorbereitung der Zahnproben.....	16
3. 1. 3 Spüllösungen.....	16
3. 1. 4 Aufbereitungssystem .....	17
3. 1. 5 Wurzelfüllung.....	17

3. 1. 6 Retrograde Präparation .....	18
3. 1. 7 Materialien zur retrograden Wurzelfüllung .....	18
3. 1. 8 Materialien zur Probeneinbettung .....	21
3. 1. 9 Materialien zur Herstellung der Dünnschliffe.....	22
3. 2 Methoden .....	24
3. 2. 1 Grafische Übersicht der Methoden .....	24
3. 2. 2 Vorbereitung der Proben .....	24
3. 2. 3 Versuchsgruppeneinteilung .....	27
3. 2. 4 Probenherstellung .....	28
3. 3 Analyse .....	31
3. 4 Statistische Auswertung .....	32
4. Ergebnisse .....	33
4. 1 Ergebnisse in Präparationsabhängigkeit.....	33
4. 1. 1 Anteil des imperfekten Randes in Abhängigkeit der Präparation.....	33
4. 1. 2 Maximaler Randspalt in Abhängigkeit der Präparation .....	33
4. 1. 3 Anteil Lufteinschlüsse an der Kavitätenfläche in Präparationsabhängigkeit .....	34
4. 2 Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien .....	35
4. 2. 1 Anteil des imperfekten Randes in Abhängigkeit des retrograden Füllungsmaterials .....	35
4. 2. 2 Maximaler Randspalt in Abhängigkeit des retrograden Füllungsmaterials .....	36
4. 2. 3 Anteil an Lufteinschlüssen an der Kavitätenfläche in Abhängigkeit des retrograden Füllungsmaterials .....	37
4. 3 Ergebnisse in Material- und Präparationsabhängigkeit .....	38
4. 3. 1 Imperfekter Rand in Material- und Präparationsabhängigkeit .....	38
4. 3. 2 Maximaler Randspalt in Material- und Präparationsabhängigkeit.....	39
4. 3. 3 Anteil an Lufteinschlüssen in Material- und Präparationsabhängigkeit.....	41
4. 4 Ergebnisse in Material- und Schnitthöhenabhängigkeit .....	42
4. 4. 1 Imperfekter Rand in Abhängigkeit des retrograden Füllungsmaterials und der Schnitthöhe .....	42
4. 4. 2 Maximaler Randspalt in Material- und Schnittabhängigkeit.....	43

4. 4. 3 Anteil an Lufteinschlüssen in Material- und Schnittabhängigkeit .....	44
4. 5 Statistische Auswertung .....	45
4. 5. 1 Statistische Auswertung des Anteils an imperfektem Rand in Präparationsabhängigkeit .....	45
4. 5. 2 Statistische Auswertung des maximalen Randspaltes in Präparationsabhängigkeit .....	45
4. 5. 3 Statistischer Vergleich des Anteils an Lufteinschlüssen in Präparationsabhängigkeit .....	46
4. 5. 4 Statistische Auswertung des Anteils an imperfektem Rand in Materialabhängigkeit.....	46
4. 5. 5 Statistische Auswertung des maximalen Randspaltes in Materialabhängigkeit.	46
4. 5. 6 Statistische Auswertung des Anteils an Lufteinschlüssen in Materialabhängigkeit .....	47
4. 5. 7 Statistische Auswertung des Anteils an imperfektem Rand in Material- und Präparationsabhängigkeit .....	48
4. 5. 8 Statistischer Vergleich des maximalen Randspaltes in Material- und Präparationsabhängigkeit .....	48
4. 5. 9 Statistische Auswertung des Anteils an Lufteinschlüssen in Material und Präparationsabhängigkeit .....	49
4. 5. 10 Statistische Auswertung des Anteils an imperfekten Rand in Material- und Schnitthöhenabhängigkeit .....	50
4. 5. 11 Statistische Auswertung des maximalen Randspaltes in Material- und Schnitthöhenabhängigkeit .....	51
4. 5. 12 Statistische Auswertung des Anteils an Lufteinschlüssen in Material- und Schnitthöhenabhängigkeit .....	53
5. Diskussion.....	54
5. 1 Diskussion der Methodik .....	54
5. 1. 1 Auswahl der Zähne.....	54
5. 1. 2 Vorbereitung der Proben .....	54
5. 1. 3 Anwendung der retrograden Füllungsmaterialien .....	56
5. 1. 4 Probenherstellung .....	57

5. 1. 5 Analyse .....	58
5. 2 Diskussion der Ergebnisse und Statistik .....	59
5. 2. 1 Einfluss des Materials auf die Randständigkeit und Homogenität von retrograden Füllungen .....	60
5. 2. 2 Einfluss der Präparation auf die Randständigkeit und Homogenität retrograder Füllungsmaterialien .....	63
5. 2. 3 Einfluss der Kavitätentiefe auf die Randständigkeit und Homogenität retrograder Füllungsmaterialien .....	66
6. Zusammenfassung.....	69
7. Literaturverzeichnis .....	71
8. Thesen.....	80
9. Selbstständigkeitserklärung.....	VIII
10. Erklärung über frühere Promotionsversuche .....	IX
11. Danksagung .....	X

## Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°	Grad
°C	Grad Celsius
β	Beta
μm	Mikrometer
γ	Gamma
&	und
Abb.	Abbildung
AG	Aktiengesellschaft
Al <sup>3+</sup>	Aluminium (3-fach positive Ladung)
Bis-GMA	Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat
bzw.	Beziehungsweise
ca.	Circa
Ca <sup>2+</sup>	Kalzium (2-fache positive Ladung)
Co.	Compagnie (franz.), Gesellschaft (dt.)
dt.	deutsch
E.	Escherichia
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
et al.	et alii (lat.), und andere (dt.)
FG	Friction grip (engl.), Haftreibung (dt.)
Gebr.	Gebrüder
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
gMTA	grey Mineral-Trioxid-Aggregat
gr.	Griechisch
Hz	Herz
IBM	International Business Machines Corporation
IRM	Intermediate Restorative Material
ISO	Internationale Organisation für Normung (dt.), gleich (gr.)
kHz	Kiloherz
lat.	Lateinisch
LC	light-cured (engl.), lichthärtend (dt.)
LLC	limited liability company
Ltd.	limited user (engl.), begrenzte Nutzer (dt.)
ml	Milliliter
mm	Millimeter



MMA	Methylmethacrylat
MTA	Mineral-Trioxid-Aggregat
Na <sup>+</sup>	Natrium (1-fach positive Ladung)
NaCl	Natriumchlorid
NaOCl	Natriumhypochlorid
Nr	Nummer
pH	pondus hydrogenii (lat.), Wasserstoffionenkonzentration (dt.)
PMMA	Polymethylmethacrylat
®	registered sign (engl.), Registrierte Marke (dt.)
RT	Raumtemperatur
™	unregistered trade mark (engl.), unregistrierte Warenmarke (dt.)
U/min	Umdrehung pro Minute
UKH	Universitätsklinikum Halle (Saale)
USA	United States of Amerika (engl.), Vereinigte Staaten von Amerika (dt.)
vs.	versus
wMTA	white Mineral-Trioxid-Aggregat
z.B	zum Beispiel
ZnO	Zinkoxid

## **1. Einleitung**

Die Wurzelspitzenresektion ist eine konservierend-chirurgische Maßnahme, die dem Erhalt von Zähnen mit pathologischen, periapikalen Veränderungen dient. Wurde früher die Indikationsstellung zur Extraktion noch großzügiger gestellt, wird heute unter anderem aufgrund des gesteigerten ästhetischen Anspruchs insbesondere im Frontzahnggebiet, aber auch des gesteigerten Bewusstseins für Kaukomfort, dem Zahnerhalt wachsende Bedeutung beigemessen. Kann ein Zahn nicht durch eine endodontische Therapie oder deren Revision erfolgreich therapiert werden, oder ist eine solche Therapie aufgrund biologischer oder physikalischer Barrieren nicht möglich, bleibt die Wurzelspitzenresektion bei gegebener Indikation oder die Extraktionstherapie als Alternative. Weil die bei einer Extraktion entstehende Zahnücke sowohl eine Beeinträchtigung der Kaustabilität des stomatognathen Systems bedingen kann und damit möglicherweise zu funktionellen Anpassungen wie dem Verlängern des Antagonisten sowie dem Einkippen der Nachbarzähne führt, als auch gerade im Frontzahnggebiet eine enorme Beeinträchtigung der Ästhetik darstellt, ist in der Regel eine Versorgung mit Zahnersatz nötig. Dieser birgt jedoch im Vergleich zum erfolgreichen Zahnerhalt einige Nachteile. So wird herausnehmbarer Zahnersatz für viele Patienten dem Kaukomfort des natürlichen Zahnes nachstehen. Eine Brückenversorgung bei entstehender Schallücke hat enorme Zahnhartsubstanzverluste bei möglicherweise karies- und Füllungsfreien Nachbarzähnen zur Folge. Auch eine Versorgung mit Implantaten ist nicht immer möglich, weiterhin kann auch hier die Ästhetik im Frontzahnggebiete oft nicht an die des natürlichen Zahnes heranreichen. Zuletzt sind noch die durch den Zahnersatz für den Patienten entstehenden Kosten zu nennen. Durch eine erfolgreiche Wurzelspitzenresektion bei richtiger Indikationsstellung kann der Patient auf eine Eingliederung von Zahnersatz mit seinen möglichen Nachteilen verzichten. Somit bleibt festzuhalten, dass sowohl für Behandler als auch Patient eine hohe Erfolgsrate wünschenswert ist, um Kaustabilität und natürliche Ästhetik längerfristig zu gewährleisten.

### **1. 1 Pathogenese apikaler Läsionen**

Für die Ätiologie der apikalen Parodontitis werden verschiedene allgemeine Faktoren, wie zum Beispiel chronische Intoxikation, Hypovitaminosen, Infektionserkrankungen, Systemerkrankungen, Störungen des Hormonhaushaltes, Erkrankungen des Blutgefäßsystems etc., die sowohl die allgemeine Abwehr des Organismus als auch die Beschaffenheit des periapikalen parodontalen Ligaments beeinflussen, diskutiert. Außerdem werden lokale Faktoren, wie zum Beispiel Traumata, chemische Noxen und

thermische Schäden angenommen (Croitoru et al., 2016). Es ist jedoch anerkannt, dass Bakterien eine entscheidende Rolle bei der Pathogenese von Pulpa- sowie periapikalen Entzündungen spielen (Takehashi et al., 1965; Sundqvist, 1976). Es wird vermutet, dass dabei jegliches im Wurzelkanal nach Aufbereitung und Wurzelfüllung verbleibende Pulpagewebe als Nährstoff für Bakterien dienen kann (Mohammadi, 2008). Folglich muss der aseptischen Aufbereitung, der Wurzelfüllung und der retrograden Füllung besondere Bedeutung beigemessen werden, um deren Einfluss auf die Entstehung periapikaler Veränderungen zu minimieren. Theoretisch haben alle Bakterien, die regulär die Mundhöhle besiedeln die Möglichkeit, im Rahmen einer Pulpanekrose in das Wurzelkanalsystem einzudringen und somit auch Entzündungen des periapikalen Gewebes hervorzurufen. Sundqvist konnte zeigen, dass mehr als 90% der aus dem Wurzelkanalsystemen isolierten Bakterien von Zähnen mit pathologischen periapikalen Läsionen Anaerobier waren (Sundqvist, 1994). Andere Quellen sprechen von ca. 51% anaeroben Bakterienstämmen bei Zähnen mit therapierefraktärer apikaler Parodontitis (Sunde et al., 2002). Im Gegensatz dazu gehen andere Autoren davon aus, dass die Ätiologie der apikalen Parodontitis von unspezifischer Natur ist, das bedeutet, dass die Persistenz oder das Auftreten einer apikalen Parodontitis mehr von der Anzahl der Bakterienspezies, als von einer spezifischen Bakterientaxa abhängig ist (Siqueira und Rôças, 2008).

## **1. 2 Erscheinungsform periapikaler Läsionen**

Periapikale Läsionen werden in der Regel während der röntgenologischen Screeninguntersuchung entdeckt (Karunakaran et al., 2017). Epidemiologische Studien zeigen, dass für apikale Radioluzenzen an röntgenologisch adäquat wurzelgefüllten Zähnen eine Prävalenz zwischen 3,8% und 31,2% besteht (Kirkevang et al., 2000; Lupi-Pegurier et al. 2002). Sie stellen sich dabei als meist rundliche Aufhellungsbereiche unterschiedlicher Größe dar. Bei unscharfer Begrenzung handelt es sich dabei eher um ein Granulom, bei scharfer Begrenzung eher um eine Zyste, wobei eine definitive Diagnose nur durch eine histologische Untersuchung gegeben werden kann. Periapikale Läsionen resultieren dabei aus einer apikalen Parodontitis, die eine Reaktion des Patienten auf die die Wurzelkanalinfektion bedingenden Mikroorganismen ist (Karunakaran et al., 2017). Sie beinhalten Entzündungszellen in variabler Konzentration sowie Epithelstränge, die bei Stimulation das Reifen einer Zyste bedingen können (Ricucci et al., 2006). Die häufigsten periapikalen Läsionen mit endodontischem Ursprung sind zu 50% Granulome, zu 35% der periapikale Abszesse und zu 15% Zysten, wobei diese sich histologisch in die echte apikale Zyste, die ein abgeschlossenes Zystenlumen besitzt, sowie die Taschenzyste, deren Lumen eine

Verbindung zum Wurzelkanalsystem unterhält, unterteilen (Simon, 1980; Nair et al., 1996; Croitoru et al., 2016). Während Granulome nach endodontischer Therapie in der Regel abheilen (Kim, 2006), zeigen Studien, dass echte apikale Zysten nur operativ therapiert werden können (Nair, 1998). Die Unterform der Taschenzysten kann Studien zufolge möglicherweise auch durch alleinige endodontische Therapie erfolgreich behandelt werden (Simon, 1980; Nair, 1998)

### **1. 3 Die Wurzelfüllung**

Das höchste Ziel der Wurzelkanalbehandlung ist die Eradikation aller Bakterien aus dem Wurzelkanalsystem (Siqueira und Rôças, 2008). Grundsätzlich sollte vor jeder Wurzelspitzenresektion und nach erfolgreicher Arbeitslängenbestimmung eine fachgerechte, bis zum anatomischen Apex reichende, orthograde, chemomechanische Aufbereitung des Wurzelkanalsystems erfolgen. Diese umfasst neben der Entfernung des gesamten Pulpagewebes auch die Entfernung infizierten Dentins sowie eine Wechselfspülung bestehend aus Kochsalzlösung und Natriumhypochlorid. Die Spülung verhindert über einen Abtransport von Dentinspäne eine iatrogene Verblockung des Kanals und dient der Desinfektion des Wurzelkanals sowie der Auflösung nekrotischen Pulpagewebes. Studien haben gezeigt, dass dabei verschiedene Konzentrationen der Natriumhypochloridlösung keinen Unterschied in der Wirksamkeit gegen verschiedene Bakterien zeigten (Câmara et al., 2009). Die Aufbereitung und Füllung des Wurzelkanalsystems kann dabei sowohl präoperativ als auch intraoperativ erfolgen. Eine präoperative Wurzelkanalbehandlung mit anschließender Wurzelfüllung bedingt dabei eine kürzere Operationsdauer, was von Vorteil für Behandler und Patienten sein kann. Hier muss die Arbeitslängenbestimmung zunächst röntgenologisch oder elektrometrisch erfolgen. Das intraoperative Vorgehen hingegen ermöglicht das Aufbereiten der Wurzel bis zu deren Apex unter Sicht, die Operationsdauer verlängert sich jedoch, die Strahlenbelastung für den Patienten sinkt hingegen. Bakterien können trotz der Behandlung im Wurzelkanalsystem persistieren und somit Entzündungen des periapikalen Gewebes induzieren bzw. aufrechterhalten (Siqueira und Rôças, 2008). Aus diesem Grund sollte die Wurzelfüllung möglichst randständig, dimensionsstabil und nicht porös sein, um ein Eindringen der Bakterien über den Apex hinaus in das periapikale Gewebe zu verhindern. Zwar wird vermutet, dass nach der Wurzelfüllung verbleibende Bakterien aufgrund der toxischen Wirkung des Füllungsmaterials und dem fehlenden Zugriff auf Nahrung nicht überleben können, trotzdem wird die Anwesenheit von Bakterien zum Zeitpunkt der Wurzelfüllung weiterhin als Risikofaktor für die Entstehung einer apikalen Parodontitis angenommen (Siqueira und Rôças, 2008). Studien konnten zeigen, dass die orthograde Wurzelfüllungen mit Guttapercha

im Verfahren der lateralen Kondensationstechnik signifikant bessere Abdichtung als retrograde Füllungen mit Amalgam erreichen (Szeremeta-Browar et al., 1985). Andererseits ist das Legen einer retrograden Füllung im Vergleich zur alleinigen intraoperativen Glättung einer vorhandenen orthograden Wurzelfüllung nach Wurzelspitzenresektion mit signifikant besseren Ergebnissen assoziiert (Christiansen et al., 2009).

#### **1. 4 Definition Wurzelspitzenresektion**

Laut der Leitlinie der DGZMK (Kunkel et al., 2007) bezeichnet die Wurzelspitzenresektion die operative Kürzung der Wurzelspitze nach Schaffung des operativen Zuganges durch den Knochen mittels Osteotomie. Dies kann mit oder ohne gleichzeitige Wurzelfüllung sowie mit oder ohne anschließenden retrograden Verschluss geschehen. Ziel der Gesamtmaßnahme ist ein bakteriendichter Wurzelkanalabschluss am Resektionsquerschnitt. Die Wurzelspitzenresektion stellt keinen Ersatz für eine exakte Wurzelkanalbehandlung dar. Vorrangiges Therapieziel ist die Ausheilung einer bestehenden pathologischen Veränderung im periapikalen Bereich und damit die Erhaltung des Zahnes in seiner Funktion.

#### **1. 5 Indikationen zur Wurzelspitzenresektion**

- Bei persistierender apikaler Parodontitis mit klinischer Symptomatik oder zunehmender radiologischer Osteolyse nach einer vollständigen oder unvollständigen Wurzelkanalfüllung oder Revisionsbehandlung, falls diese nicht oder nur unter unverhältnismäßigen Risiken entfernt oder verbessert werden kann (z. B. bei aufwändiger prothetischer Versorgung und insbesondere der Versorgung mit Wurzelstiften). Die radiologische Rückbildung kann hierbei einen Zeitraum von mehreren Jahren beanspruchen.
  - Nach Wurzelkanalfüllung mit überpresstem Wurzelfüllmaterial und klinischer Symptomatik oder Beteiligung von Nachbarstrukturen (Kieferhöhle, Mandibularkanal).
  - Bei konservativ nicht durchführbarer Wurzelkanalbehandlung bzw. bei erheblichen morphologischen Varianten der Wurzeln, die eine vollständige Wurzelkanalfüllung nicht zulassen
  - Bei Zähnen mit obliteriertem, nicht mehr instrumentierbarem Wurzelkanal bei klinischer und/ oder radiologischer Symptomatik.
- (Kunkel et. al, 2007)

## **1. 6 Mögliche Indikationen zur Wurzelspitzenresektion**

- Bei apikaler Parodontitis als Alternative zur konservativ endodontischen Behandlung, insbesondere bei periapikalem Index >3 bzw. einer Größe der apikalen Läsion ab ca. 4-5 mm.
- Bei persistierender apikaler Parodontitis als Alternative zur konservativ endodontischen Revision.
- Bei einer Fraktur eines Wurzelkanalinstrumentes in Apexnähe, das auf orthogradem Weg nicht entfernbar ist.
- Bei einer Via falsa in Apexnähe, die auf orthogradem Wege nicht verschlossen werden kann.
- Bei Wurzelfrakturen im apikalen Wurzeldrittel, insbesondere wenn es zur Infektion des apikalen Fragmentes bzw. des Frakturspaltes gekommen ist oder das koronale Fragment nur mit Hilfe einer retrograden Füllung versorgt werden kann.
- Wenn eine Behandlung ausschließlich unter Narkose möglich ist.
- Bei persistierender Schmerzsymptomatik auch nach klinisch und radiologisch einwandfreier Wurzelkanalfüllung als Maßnahme zur Ausschaltung einer möglichen Schmerzursache. Grundsätzlich sollte aber in dieser Situation einer endodontischen Revision der Vorzug gegeben werden.
- Bei Freilegung oder Verletzung von Wurzelspitzen im Rahmen chirurgischer Eingriffe (z. B. Zystenentfernung, Probeexzision).
- Bei persistierender apikaler Parodontitis bei bereits resezierten Zähnen.  
(Kunkel et al., 2007)

## **1. 7 Die Wurzelspitzenresektion**

Das Ziel einer chirurgischen Behandlung des Endodonts ist neben der Entfernung des gesamten pathologisch veränderten Gewebes aus dem periapikalen Knochendefekt ebenso die Bewertung der Dichtigkeit des Kanalsystems im apikalen Bereich und Maßnahmen um einen gute apikale Dichtigkeit zu erreichen, falls nicht vorhanden (Bondra et al., 1989). Die Folge der Wurzelspitzenresektion ist eine apikal freiliegende, von Wurzelzement begrenzte Dentinfläche, in deren Mitte sich der Wurzelkanal befindet (Bodrumlu, 2008). Operieren unter Vergrößerung und Licht, vorzugsweise mithilfe eines Operationsmikroskopes und die Anwendung mikrochirurgischer Prinzipien wie die atraumatische Inzision sowie Lappenmobilisierung, möglichst kleinlumige Osteotomie und die Benutzung von Ultraschallspitzen sind wichtige Voraussetzungen für ein erfolgreiches Ergebnis der Wurzelspitzenresektion (von Arx, 2011b). Das Ausmaß der Resektion sollte dabei mindestens 3mm betragen (Torabinejad und Pitt Ford, 1996; Aqrabawi, 2000), denn eine zu geringe Resektion

birgt die Gefahr, eventuell vorhandene akzessorische, laterale Kanäle nicht vollständig zu entfernen (Mjör et al., 2001; Kim, 2006). Die Resektion der Wurzelspitze kann entweder im rechten Winkel zur Zahnachse oder mit einer Abschrägung von 30° - 45° erfolgen. Die Wahl des Instrumentes zum Abtragen der Wurzelspitze scheint dabei keinen Einfluss auf die Dichtigkeit der retrograden Füllung zu haben (Benz et al., 2017). Als Vorteil der Abschrägung wird eine bessere Übersicht angegeben, jedoch zeigten Gilheany et al., dass es mit einer stärkeren Abschrägung auch zu einer Erhöhung des apikalen Leakage kommt (Gilheany et al., 1994), wobei andere Studien dies nicht bestätigen konnten (Post et al., 2010). Ein weiterer Nachteil der Abschrägung ist, dass bei Verlaufskontrollen möglicherweise auf der Resektionsfläche liegende pathologische Prozesse röntgenologisch nur schwer darstellbar sind. Man kann annehmen, dass bei einer Abschrägung der Resektionsfläche zwischen 30°- 45° Grad mehr Dentinkanälchen freigelegt werden und es deshalb zu vermehrtem Leakage durch permeables apikales Dentin kommt (Mjör et al., 2001).

## **1. 8 Präparation der retrograden Kavität**

Der Präparation der retrograden Kavität kommt besondere Bedeutung zu, denn Studien haben gezeigt, dass das Abdichtungsvermögen von Füllungsmaterialien nicht ausschließlich vom verwendeten Material, sondern auch von einer sachgerecht präparierten Kavität abhängt (Koçak et al., 2011). Diese sollte möglichst entlang der Längsachse der Zahnwurzel sowie dem Verlauf des Wurzelkanales folgend gelegt werden. Die Präparation sollte dabei möglichst drucklos erfolgen, denn es besteht das Risiko der Perforation oder Rissbildung, wobei diese typischerweise an der dünnsten Stelle des die Kavität umschließenden Dentinwalls auftreten (Abedi et al., 1995). Des Weiteren sollte für die retrograde Kavität eine Mindesttiefe von 2mm angestrebt werden, da grundsätzlich gilt, dass das apikale Leakage mit zunehmender Kavitätentiefe abnimmt und dass bei zunehmender Kavitätentiefe die Nachteile eines hohen Resektionswinkels reduziert werden (Gilheany et al., 1994; Garip et al, 2011). In einem Bakterien-Leakage Test mit *E. faecalis* wurde jedoch auch gezeigt, dass eine Vergrößerung der retrograden Kavität von 3mm auf 5mm Tiefe keine signifikante Verbesserung der Dichtigkeit zur Folge hatte (Yildirim et al., 2010).

### **1. 8. 1 Mikroskop-Technik**

Da die Verwendung eines regulären Winkelstücks mit rotierendem Instrument eine großlumige Osteotomie voraussetzt und eine stärkere Abschrägung der Resektionsfläche erfordert, ist die Verwendung eines sogenannten Mikroskopes sinnvoll. Als Vorteil dieser Technik gegenüber der Ultraschalltechnik wird in der Literatur die signifikant geringer ausgeprägte Rissbildung in dem die Kavität

umgebenden Dentinwall beschrieben (Abedi et al., 1995). Jedoch hat die Verwendung des Mikrokopfes einige Nachteile, weshalb diese Technik in der modernen operativen Zahnerhaltungskunde kaum noch eine Rolle spielt. Zu nennen ist die im Vergleich zur Ultraschalltechnik stärkere Bildung einer Schmierschicht, die möglicherweise die Randständigkeit einer retrograden Füllung negativ beeinflussen kann (Wuchenich et al., 1994). Weiterhin ist die Handhabung äußerst kompliziert. So konnte in einer Studie gezeigt werden, dass die Durchschnittstiefe einer mit Mikroskop-Technik präparierten Kavität mit nur 1 mm deutlich zu kurz war und zusätzlich die Achse dieser schräg zur Zahnachse verlief (Wuchenich et al., 1994). Von Karlovic et al. werden ein unzureichenden Zugang, die Anatomie der Wurzel und die Wurzelangulation als mögliche Faktoren genannt, die die Schaffung einer idealen retrograden Kavität mit der Mikroskop-Technik und rotierenden Instrumenten beeinträchtigen können (Karlovic et al., 2005).

### **1. 8. 2 Schall-Technik**

Die Präparation der retrograden Kavität erfolgt hierbei üblicherweise mit abrasiv beschichteten, speziell abgewinkelten Instrumenten, die aufgrund ihrer Konfiguration eine Schonung von periapikaler Knochensubstanz erlauben. Die Benutzung von Schallspitzen zur Präparation retrograder Kavitäten wurde erstmals von Fong beschrieben (Fong, 1993). Er und weitere Autoren zeigten, dass auch mit speziell designten Schallspitzen eine suffiziente retrograde Präparation sowie ein erleichterter Zugang zum Apex und damit eine Schonung des periapikalen Knochens möglich ist (von Arx, 2011b). Ein weiterer Vorteil ist die mögliche Reduktion der Anschrägung der Resektionsfläche bei der Wurzelspitzenresektion, wodurch weniger Dentinkanälchen exponiert werden (Lloyd et al., 1997; von Arx 2011b). Es konnte gezeigt werden, dass die Präparation mit Ultraschall das Abdichtungsvermögen von retrograden Füllungen im Vergleich zu mit der konventionellen Technik präparierten retrograden Kavitäten positiv beeinflussen kann (Chailertvanitkul et al., 1998). Zu den bereits von Richman etablierten und später von Carr speziell designten Ultraschallinstrumenten zur retrograden Kavitätenpräparation besteht einzig der Unterschied in der Frequenz mit der die Geräte arbeiten (Richman, 1957; Carr, 1992). So arbeiten Schallgeräte bei 6000 Hz, Ultraschallgeräte bei bis zu 30.000 Hz (von Arx und Kurt, 1999). Beide erlauben im Vergleich zur Präparation mit konventionellen Diamantbohrern die Präparation einer ausreichenden Kavitätentiefe, die in ihrem Verlauf präzise dem eigentlichen Wurzelkanalverlauf entspricht (Wuchenich et al., 1994; Schultz et al., 2005). Als Nachteil der retrograden Schall- bzw. Ultraschallpräparation werden die Induktion von Rissen und das sogenannte *Chipping* gesehen. Diese Rissbildung betrifft



bis zu 75% der die Kavität umgebenden Dentinwände mit weniger als 1mm Dicke (Abedi et al., 1995). Das *Chipping*, also das Abplatzen von Dentinfragmenten ist bei der Schallaufbereitung im Vergleich zur konventionellen Technik signifikant erhöht (Lloyd et al., 1996). Andere Studien zeigen jedoch, dass die Präparation mit diamantierten Ultraschallspitzen nicht zu einem signifikanten Anstieg von Rissen führte (Peters et al., 2001). Auch die Frequenz mit der das Ultraschallgerät betrieben wurde, hatte keinen Einfluss auf die Anzahl der gebildeten Risse (Rodríguez-Martos et al., 2012). Sowohl Ultraschall als auch Schallpräparation haben laut Studien auf die Integrität der Wurzel keinen signifikanten Einfluss (Gondim et al., 2002).

### **1. 9 Die retrograde Füllung**

Die Art des verwendeten retrograden Füllmaterials kann ein prognostisch entscheidender Faktor für das Ergebnis einer Wurzelspitzenresektion sein (Villa-Machado et al., 2013). Ebenso diskutierte Faktoren sind neben dem Geschlecht des Patienten die Zahnposition sowie der Typ der apikalen Läsion (Song et al, 2011). Obwohl nahezu jedes in der operativen und restaurativen Zahnheilkunde zur temporären Versorgung verwendete Material, wie zum Beispiel Super-EBA-Zement und Cavit, sowie zur permanenten Versorgung, wie beispielsweise Amalgam, Komposite und Glasionomerezemente, auch in der Versorgung wurzelspitzenresizierter Zähne Verwendung fand, wird bis heute über das ideale retrograde Füllmaterial kontrovers diskutiert (Bodrumlu, 2008; von Arx, 2011a). Das ideale retrograde Füllmaterial sollte möglichst einfach zu applizieren, radioopak, dimensionsstabil, sowie nicht-resorbierbar sein und durch die Anwesenheit von Wasser nicht beeinflusst werden, denn das Ziel eines jeden retrograden Füllungsmaterials ist es, eine hermetische Abdichtung zwischen dem apikalen Parodont und dem Wurzelkanalsystem zu errichten (Aqrabawi, 2000; Bodrumlu, 2008). Es wird angenommen, dass bei besserer marginaler Adaptation einer retrograden Füllung weniger Reizstoffe nach apikal penetrieren können (Gondim et al., 2005). Ungenauigkeiten der Randständigkeit können deshalb möglicherweise einen Einfluss auf das Abdichtungsvermögen und den klinischen Erfolg haben (Soundappan et al., 2014).

### **1. 10 Füllungsmaterialien**

#### **1. 10. 1 Amalgam**

Amalgam ist ein in der Zahnheilkunde seit über 100 Jahren etabliertes Füllungsmaterial. Es entsteht bei der sogenannten Trituration, dem Vermischen des flüssigen Quecksilbers mit dem Feilungspulver, dem sogenannten Alloy. Weil der Schmelzpunkt von Quecksilber bei  $-38,9^{\circ}\text{C}$  liegt, reagiert es auch bei

Zimmertemperatur mit anderen Metallen, es kommt daher zu einer Legierungsbildung. Das Alloy besteht hauptsächlich aus Silber, Kupfer, Zinn und Zink, wobei moderne, sogenannte  $\gamma$ -2-freie Amalgame einen erhöhten Kupfergehalt aufweisen und damit eine geringere Korrosionsrate und höhere klinische Stabilität besitzen. Herkömmliche Amalgame bestehen indes im Wesentlichen aus Silber und Zinn. Des Weiteren kann das Alloy sowohl als Feilungsspähne sowie in Kugelform hergestellt werden. Hiervon, und von der Größe der Partikel hängt die Stopfbarkeit ab. Große Spähne benötigt dabei einen hohen Stopfdruck, lässt sich aber nur schwer kondensieren, kugelförmige Partikel hingegen lassen sich mühsamer, aber effektiver kondensieren. Ein Kompromiss wird in der Mischung beider gesehen (Marxkors et al., 2008). Nach der Trituration entsteht eine plastische, stopfbare Masse, die bei Zimmertemperatur aushärtet. Bis zum Erreichen von 70-90% der Endfestigkeit vergehen allerdings 8 Stunden, weshalb eine Politur der intraoperativ gelegten retrograden Amalgamfüllung nicht möglich ist. Trotz einiger Nachteile war Amalgam lange Zeit das am häufigsten genutzte Füllungsmaterial für retrograde Wurzelfüllungen (Torabinejad et al., 1993), weil es einfach in der Handhabung, radioopak und nicht-resorbierbar ist (Bodrumlu, 2008). Weiterhin scheint eine Kontamination der retrograden Kavität mit Blut keinen signifikanten Einfluss auf die Randdichtigkeit von retrograden Amalgamfüllungen zu haben (Torabinejad et al., 1994). Als weiterer Vorteil ist die Expansion während des Aushärtens zu nennen, woraus möglicherweise eine gute Randständigkeit resultiert. Trotzdem wurde die Anwendung von Amalgam als Füllmaterial für retrograde Kavitäten aufgrund medizinischer sowie die Umwelt betreffende Aspekte in Frage gestellt (Jeslén, 1995). Im Zuge eines breiten öffentlichen und wissenschaftlichen Diskurses kam es in einigen Ländern zum Verbot von Amalgam. Dabei gibt es Studien, die zeigen, dass das Legen einer retrograden Füllungen aus Amalgam sowohl 7 als auch 30 Tage post operationem keinen signifikant erhöhten Quecksilberspiegel im Blut des Patienten zur Folge hat (Skoner et al., 1996). Im Kontrast dazu stehen jedoch Studien, die das Legen einer retrograden Füllung aus Amalgam mit erhöhten Quecksilberspiegeln im Blut eine Woche postoperativ assoziieren (Saatchi et al., 2013). Eine entscheidende Rolle spielt außerdem die Biokompatibilität des Materials. Es konnte gezeigt werden, dass die Freisetzung von hohen Mengen Zink den Hauptfaktor für die Zytotoxizität von Amalgam darstellt (Meryon, 1984), wohingegen hochkupferhaltiges, Zink-freies Amalgam nur eine geringe Zytotoxizität besitzt (Chong et al., 1994). Nicht zuletzt die Untersuchung alternativer Füllungsmaterialien, wie zum Beispiel Mineral-Trioxid-Aggregat, das in Studien deutlich bessere Randständigkeiten als Amalgam zeigte (Torabinejad et al., 1993) und eine bessere Heilung des

periapikalen Gewebes (Baek et al., 2010) bedingte, führten zu einem zunehmenden Bedeutungsverlust der retrograden Amalgamfüllung.

### **1. 10. 2 Komposite**

Komposite sind Werkstoffe, die aus einer Kunststoffmatrix, basierend auf Dimethacrylaten, einer Verbundphase, basierend auf Silanen, sowie einer dispersen Phase bestehen, wobei hierbei zwischen Makro- und Mikrofüller unterschieden wird. Moderne Komposite sind plastisch verformbar, zahnfarben, röntgenopak, polierbar und härten nach Applikation chemisch oder durch Energiezufuhr aus. Wegen dieser Eigenschaften könnte auch dieses Material als retrogrades Füllungsmaterial in Betracht gezogen werden. Allerdings ist für den Haftverbund zwischen Zahn und Komposit ein sogenannter Haftvermittler von Nöten, dieser wiederum erfordert eine absolute Trockenlegung des Arbeitsumfelds. Diese Voraussetzung ist intraoperativ im apikalen Wurzelbereich nur schwer realisierbar. Ebenso legen histologische Untersuchungen des Wurzeldentins nahe, dass die geringe Anzahl an Dentinkanälchen im apikalen Wurzelbereich einen negativen Einfluss auf das Eindringen von Adhäsiven hat und folglich die strukturellen Eigenschaften des apikalen Dentins nicht günstig für adhäsive Füllungstechniken sind (Mjör et al., 2001). Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass eine Blutkontamination der retrograden Kavität die Haftkraft von Kompositfüllungen verringert und einen negativen Einfluss auf die Randdichtigkeit haben kann (Rud et al., 1991; Miles et al., 1994; Vignaroli et al., 1995). Moderne Kompositmaterialien schrumpfen während des Aushärtens um etwa 1-3%. Diese Schrumpfung bedingt die Entstehung von Spannungen, Randspalten und Randverfärbungen (Hellwig et al., 2013). Insbesondere eine Randspaltbildung würde sich negativ auf das Abdichtungsvermögen einer retrograden Kompositfüllung auswirken. Trotzdem konnte gezeigt werden, dass retrograde Kompositfüllungen in ihrem Abdichtungsvermögen signifikant besser sind als solche mit Super-EBA<sup>®</sup> Zement (Holt und Dumsha, 2000). Wenn eine Kontamination der retrograden Kavität vermieden werden kann, lassen sich Komposite hiernach als retrograde Füllmaterialien aus Sicht des Abdichtungsvermögens empfehlen. Als problematisch stellte sich jedoch die Biokompatibilität heraus. Zwar konnte gezeigt werden, dass sich an der Grenzfläche zu Retroplast, einem speziell für retrograde Kavitäten entwickelten Komposit, Bindegewebe aus Fibroblasten und Kollagenfasern bildete (Rud et al., 1991). Im Vergleich zu MTA zeigten retrograde Kompositfüllungen jedoch schlechtere postoperative Heilungsraten (Otani et al., 2011; von Arx et al., 2014). In einer vergleichenden Studie mit Wistar-Ratten, die Polyethylen-Röhrchen, welche verschiedene Materialien enthielten, in das subkutane Bindegewebe implantiert

bekamen, konnte nach 7 Tagen eine schwere Entzündungsreaktion festgestellt werden, welche im Verlauf von 90 Tagen abnahm. Im Verlauf der Untersuchung kam es auch hier zur Bildung einer dünnen Bindegewebsschicht um das Komposit (Ozbas et al., 2003). In einer weiteren Studie an Beagles zeigten sich nach 6 Monaten signifikant mehr Entzündungszellen um retrograde Füllungen aus Komposit als um solche aus Super-EBA® (Trope et al., 1996). Als problematisch werden einzelne Inhaltsstoffe, wie nicht umgesetztes Restmonomer sowie Initiatoren, die sich in Kunststoff nach dem Aushärten finden, angesehen. Diese Substanzen können möglicherweise ein toxikologisches Potential besitzen (Hellwig et al., 2013).

### **1. 10. 3 Mineral-Trioxid-Aggregat**

Mineral-Trioxid-Aggregat (MTA) ist ein Derivat des Portlandzements und besteht hauptsächlich aus Trikalziumsilikat, Trikalziumaluminat, Kaliumoxid und Siliziumoxid (Torabinejad et al., 1995). Weitere mineralische Oxide, wie zum Beispiel Wismutoxid dienen zur Erhöhung der Radioopazität (Camilleri et al., 2005; Torabinejad et al., 1995). Es wurde 1993 an der Universität von Loma Linda in Kalifornien entwickelt. Als Anwendungsgebiete gelten die direkte Überkappung, die Pulpotomie, die Behandlung von Perforationen, der retrograde apikale Verschluss, die Apexifikation sowie die Behandlung externer und interner Resorptionen. Einzige gesicherte Kontraindikation gegen die Verwendung von MTA ist die Anwendung mit direktem Kontakt zum oralen Milieu, da es hier zu Auswaschungen kommt (Trohorsch et al., 2012). Es lassen sich grundsätzlich zwei Arten Mineral-Trioxid-Aggregat unterscheiden. Zum einen das sogenannte White-MTA (wMTA) sowie das Grey-MTA (gMTA). Das wMTA enthält im Gegensatz zu gMTA keine Eisenanteile, beide haben ansonsten den gleichen chemischen Aufbau (Camilleri et al., 2005). Zwischen dem Abdichtungsvermögen von wMTA und gMTA bei der Perforationsreperatur gab es in einer Bakterien-Leakage-Untersuchung keinen signifikanten Unterschied (Ferris und Baumgartner, 2004). Mineral-Trioxid-Aggregat wird von verschiedenen Herstellern angeboten, zwischen ProRoot™ MTA und MTA Angelus konnte bezogen auf das Abdichtungsvermögen kein signifikanter Unterschied gefunden werden (Koçak et al., 2011). Das feine, hydrophile MTA-Pulver wird zunächst mit destilliertem Wasser im Verhältnis 3:1 vermischt. Es entsteht ein kolloidartiges Gel, welches innerhalb von zwei bis drei Stunden aushärtet und dann nicht mehr löslich ist. Es muss folglich im Vergleich zu anderen Materialien nicht zwingend unter absoluter Trockenlegung verarbeitet werden, ebenso scheint eine Blutkontamination keinen Einfluss auf das Abdichtungsvermögen zu haben (Torabinejad et al., 1994). Weiterhin deuten Studien darauf hin, dass auch die Anwesenheit der Präparation im Dentin verursachten Schmierschicht keinen Einfluss

auf das Abdichtungsvermögen von MTA hat (Yildirim et al., 2010; Hellwig et al., 2013). Der pH-Wert des angemischten MTA steigt von 10,2 direkt nach dem Anmischen auf bis zu 12,5 nach 3 Stunden (Torabinejad et al., 1995). In vergleichenden Studien zeigt sich MTA besser in Abdichtungsvermögen und Randdichtigkeit als Super-EBA-Zement, Kompomere, Amalgam und Biodentine, außerdem soll es durch Ultraschallpräparation entstandenen Risse verschließen können (Torabinejad et al., 1993; Aqrabawi, 2000; Schultz et al., 2005; Hindlekar und Raghavendra, 2014; Soundappan et al., 2014; Benz et al., 2017). Andere Studien zeigen jedoch, dass Biodentine™, im Bezug auf das Abdichtungsvermögen, dem von MTA überlegen ist (Han, 2011). Auch eine prospektive, klinische Studie konnte keinen MTA im Vergleich zu IRM® keine signifikant besseren Erfolgsraten nachweisen (Chong et al., 2003). MTA wird jedoch gemeinhin als der Goldstandard für retrograde Füllungen angesehen (von Arx, 2011a.). Bezüglich der Handhabbarkeit geben Autoren widersprüchliche Erfahrungen an. So wird MTA einerseits als einfach anzumischen und mit Amalgamstopfern als leicht in die präparierte Kavität einzubringen beschrieben. Ebenso sind Überschüsse von MTA leicht zu entfernen (Torabinejad et al., 1993). Andere Autoren wiederum geben als Nachteile von MTA die schwere Handhabbarkeit und die lange Abbindezeit an (Caron et al., 2014). Als weiterer Nachteil sind die hohen Kosten zu nennen. Sie sind für Pro Root MTA™ ca. 5 mal so hoch wie für Super-EBA®-Zement, wobei eine Packung Pro Root MTA™ für lediglich fünf Anwendungen, eine Packung Super-EBA®-Zement für ca. 100 Anwendungen ausreicht (Schultz et al., 2005).

#### **1. 10. 4 Glasionomerzemente**

Glasionomerzemente, auch Polyalkenoatzemente genannt, bestehen aus den für Dentalzemente typischen Komponenten Pulver und Flüssigkeit. Der Pulveranteil besteht hierbei aus Kalzium-Aluminium-Silikatglas mit eingesprengten kalziumfluoridreichen, kristallinen Tröpfchen. Die Flüssigkeit besteht aus destilliertem Wasser sowie wässriger Polycarbonsäure. Die wässrige Säurelösung und das feine Glaspulver werden zu einer viskösen Masse angemischt, welche innerhalb von Minuten aushärtet (Sidhu und Nicholson, 2016). Ionen aus dem Glaspulver reagieren mit der Säure zu unlöslichen Salzen. Initial reagiert dabei hauptsächlich Kalzium mit der Polycarbonsäure und bildet Kalziumpolycarboxylatgel, welches empfindlich gegen Feuchtigkeit und Austrocknung ist. Bis zu 24 Stunden lang kommt es daraufhin zur Einlagerung von Aluminium in die entstandene Matrix, hierdurch kommt es zur finalen Aushärtung. In vollständig ausgehärtetem Glasionomerzement sind Kalzium und Aluminium etwa in gleichem Mengen vorhanden (Crisp et al., 1974; Hellwig et al., 2013). Nach dem Abbinden enthält Glasionomerzement einen gewissen Teil an nicht-

reagiertem Glas, welches als Füller den abgebundenen Zement verstärkt (Sidhu und Nicholson, 2016). Glasionomerzemente haften über kovalente sowie ionische Bindungen an Schmelz und Dentin (Barkhordar et al., 1989). Neben den konventionellen Glasionomerzementen gibt es sogenannte Cermetzemente (Keramik-Metall-Zemente). Bei diesen kann durch Sinterung ein Metall in die Glaspartikel eingeschmolzen werden. Oftmals wird hier Silber verwendet, die Folge sind eine erhöhte Biege- sowie Abriebfestigkeit (Hellwig et al., 2013). Ein bekannter Vertreter ist Ketac™ Silver, welcher als einfach zu Handhaben und schnell aushärtend beschrieben wird (Schwartz und Alexander, 1988). Dieses Zement war in Studien konventionellem Glasionomerzement bezüglich des Abdichtungsvermögens leicht unterlegen (Barkhordar et al., 1989). Konventionelle Glasionomerzemente sowie Cermetzemente sind jedoch Studien zufolge retrograden Füllungen aus Amalgam überlegen (Schwartz und Alexander, 1988; Jesslén et al., 1995). Andere Studien wiederum sehen Ketac™ Silver der retrograden Amalgamfüllung als ebenbürtig an (Barkhordar et al., 1989; al-Ajam und McGregor, 1993). In einer in-vitro Untersuchung zum Einfluss von verschiedenen Glasionomerzementen auf die Viabilität humaner, gingivaler Fibroblasten zeigten sowohl Ketac™ Silver als auch Ketac™ fil Plus Aplicap™ keine zytotoxischen Eigenschaften, wobei andere Glasionomerzemente eine milde Zytotoxizität aufwiesen (Marczuk-Kolada et al., 2017). Es wird angenommen, dass zwar die Metallionen  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$  und  $Na^{+}$  nicht toxisch oder reizend auf lebende Zellen oder Gewebe wirken, dass jedoch hauptsächlich die Polyakrylsäure für milde Toxizität verantwortlich ist (Selimović-Dragaš et al., 2012). Eine weitere Variante der Glasionomerzemente sind die sogenannten kunststoffmodifizierten Glasionomerzemente (resin-modified glasionomers), welche neben den konventionellen Bestandteilen in der Flüssigkeit zusätzlich auch hydrophile Monomere, Bis-GMA und Fotoakzeleratoren enthalten (Hellwig et al., 2013). Im Vergleich zu konventionellen Glasionomerzementen zeigen kunststoffmodifizierte Glasionomerzemente gegenüber unterschiedlichen Zelllinien eine erhöhte Zytotoxizität (Selimović-Dragaš et al., 2012). Das Abdichtungsvermögen eines kunststoffmodifizierten Glasionomerzementes (Fuji II LC) war in einem Farbstoffpenetrationstest dem von konventionellem Glasionomerzement überlegen, wenn auch nicht signifikant. In weiteren Studien konnte jedoch gezeigt werden, dass das Abdichtungsvermögen von kunststoffmodifizierten Glasionomerzementen gegen Farbstoffpenetration nicht im Vergleich zu Komposit, jedoch zu MTA signifikant schlechter ist (Chohan et al., 2015; Jain et al., 2016).

### **1. 10. 5 Verstärkte Zinkoxid-Eugenol-Zemente**

Klassische Zinkoxid-Eugenol Zemente bestehen aus Pulver, welches Zinkoxid und Naturharze enthält, und dem Eugenol als Flüssigkeit. Beide reagieren nach dem Anmischen zu Zinkeugenolat in Form nadelförmiger Kristalle. Da diese Umsetzung nicht vollständig erfolgt, ist Eugenol zu 25-50% aus dem abgebundenen Zement verfügbar, dieses kann jedoch potenziell zyto- und neurotoxisch wirken (Hellwig et al., 2013). Weiterhin sind als möglicher Nachteil die bei Verwendung dieses Materials auftretenden Resorptionen zu nennen. Zur Verhinderung dieser und um die Festigkeit des Zementes zu erhöhen, wurde nach Zusätzen gesucht, um verbesserte Materialeigenschaften zu erhalten (Oynick, 1978). Heutzutage werden beispielsweise Methylmethacrylat und Aluminiumoxid als Pulverzusatz angewandt. Ein bekannter Vertreter des Methylmethacrylat verstärkten Zinkoxid-Eugenol Zements ist IRM<sup>®</sup> (Intermediate Restorative Material). Super-EBA-Zemente hingegen sind mit Aluminiumoxid verstärkte Zinkoxid-Eugenol Zemente, deren Flüssigkeit zu 32% aus Eugenol und zu 68% aus Ethoxybenzoesäure bestehen (Aqrabawi, 2000). Man spricht deshalb hierbei von Ethoxybenzoesäurezementen (EBA-Zemente). Ein bekannter Vertreter ist Super-EBA<sup>®</sup>. Die Ethoxybenzoesäure reagiert hier mit dem ZnO zum Zinksalz, vermag aber, wie das Eugenol auch, ein Zink-Chelat-Komplex zu bilden (Marxkors et al., 2008). Super-EBA<sup>®</sup> Zement enthält nur zu ein Drittel an Eugenol im Vergleich zu IRM<sup>®</sup> und wird wegen seiner geringen Zytotoxizität als potentielles retrogrades Füllmaterial beschrieben (Dorn und Gartner, 1990; Chong et al., 1994). Ebenso konnten in einer Studie einwachsende Kollagenfasern in Rissen eines zur retrograden Füllung benutzten EBA-Zementes (Staline Super-EBA-Zement) nachgewiesen werden, was von dem Autor als Zeichen für Biokompatibilität gewertet wird (Oynick, 1978). Die Kontamination der retrograden Kavität mit Blut hat laut Studien keinen statistisch signifikanten Einfluss auf das Abdichtungsvermögen von EBA-Zementen, ebenso ist die Haftung an Zahnstrukturen auch unter Feuchtigkeit gegeben (Torabinejad et al., 1994; Bodrumlu, 2008). Bezüglich des Abdichtungsverhaltens zeigen Studien unterschiedliche Ergebnisse. So ist das Abdichtungsvermögen retrograder Super-EBA<sup>®</sup> Füllungen dem von Amalgam überlegen und dem von IRM<sup>®</sup> ebenso, wenn auch nicht statistisch signifikant (Bondra et al., 1989; Torabinejad et al., 1993). Wiederum sind IRM<sup>®</sup> und Super-EBA<sup>®</sup> Zement in anderen Studien dem Abdichtungsvermögen von Amalgam und MTA unterlegen (Torabinejad et al., 1994; Holt und Dumsha, 2000). In einer retrospektiven Studie konnte außerdem gezeigt werden, dass nach einem Zeitraum von mindestens 6 Monaten die Heilung nach retrograder Füllungslegung mit Super-EBA<sup>®</sup> und IRM<sup>®</sup> erfolgreicher verläuft als bei Amalgam (Dorn und Gartner, 1990).

## 2. Zielstellung

Obwohl die Wurzelspitzenresektion ein in der Zahnmedizin lange etabliertes Therapieverfahren ist, wird bis heute kontrovers über die Qualität verschiedener Füllungsmaterialien diskutiert. Ziel dieser in-vitro Studie ist es daher, etablierte sowie neuere Materialien auf ihre Adaptationsfähigkeit an das Wurzelentfernen einer mit unterschiedlichen Schallspitzen präparierten retrograden Kavität unter lichtmikroskopischer Auswertung zu untersuchen. Die Adaptation der Materialien entscheidet maßgeblich über die Dichtigkeit der Füllung gegenüber der Penetration von Bakterien und deren Toxinen und ist daher ein Parameter, der es erlaubt, über klinische Erfolgsraten eine Vorhersage zu treffen. Die Ermittlung des perfekten Randschlusses, des maximalen Randspaltes sowie des Luftanteils pro Kavitätenfläche kann deshalb zur Beurteilung der Qualität der geprüften Füllungsmaterialien untereinander dienen. Durch die quantitative Analyse des Anteils an imperfektem Rand, des maximalen Randspaltes und des Anteils an Luft der gesamten Kavitätenfläche sollen folgende Fragen geklärt werden:

- Welchen Einfluss hat die Kavitätenkonfiguration auf die Randständigkeit und Homogenität von retrograden Füllungsmaterialien?
- Gibt es Unterschiede in der Randständigkeit und Homogenität verschiedener Füllungsmaterialien?
- Gibt es Unterschiede in der Randständigkeit und der Homogenität verschiedener Füllungsmaterialien bei unterschiedlicher retrograder Präparation?
- Wie sind das Randständigkeitsverhalten und die Homogenität von retrograden Füllungsmaterialien auf unterschiedlichen Schnitthöhen der retrograden Kavität?
- Kann mit den gewonnenen Ergebnissen eine Voraussage zur klinischen Anwendung getroffen werden?



### 3. Material und Methoden

#### 3. 1 Material

##### 3. 1. 1 Zahnproben

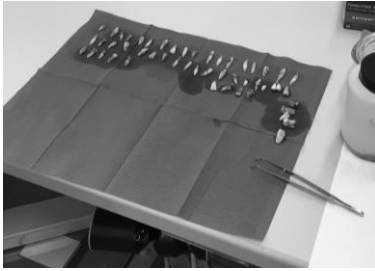


Abb. 1: Auswahl der Versuchszähne

Für die Durchführung des Experiments wurden 135 humane, extrahierte, einwurzelige, einkanalige Zähne benutzt, die ohne vorangegangene endodontische Behandlung waren, keine kariösen Läsionen, Füllungen oder Frakturen aufwiesen und über ein abgeschlossenes Wurzelwachstum verfügten. Die frisch extrahierten Zähne wurden in steriler, physiologischer Kochsalzlösung (B. BRAUN Melsungen AG, Melsungen, Deutschland) gelagert.

##### 3. 1. 2 Materialien zur Vorbereitung der Zahnproben

##### 3. 1. 3 Spüllösungen

**Kochsalzlösung** (B. BRAUN Melsungen AG, Melsungen, Deutschland)

Die 0,9%ige Natriumchloridlösung wurde als Lagerungsmedium sowie Neutralisationsspülung verwendet. Zusammensetzung 1000 ml Lösung:

- 9 g NaCl
- 991 g gereinigtes Wasser

**Natriumhypochloritlösung** (Universitätsapotheke Halle, Halle (Saale), Deutschland)

Diese 1% Lösung wurde zur chemischen Aufbereitung und Desinfektion des Wurzelkanalsystems verwendet. Neben seinen antibakteriellen Eigenschaften hat dieses flüssige Oxidationsmittel auch gute gewebslösende Eigenschaften. Zusammensetzung der 1000ml Lösung:

- 10g NaOCl
- 990g gereinigtes Wasser

**Natrium-ethylendiamin-tetraacetat (Natriumedetat)** (Universitätsapotheke Halle, Halle (Saale), Deutschland)

Diese 20% Lösung wurde zur Spülung der retrograden Kavität verwendet. Neben der Spülfunktion kann diese Flüssigkeit den bei der Präparation von Dentin entstehenden sogenannten Smear-layer auflösen. Zusammensetzung der 100 ml Lösung:

- 20g Natriumedetat
- 28g gereinigtes Wasser

- 52g Natriumhydroxidlösung (4%)

### 3. 1. 4 Aufbereitungssystem

Die Aufbereitung des Kanalsystems erfolgte mittels des Reciproc<sup>®</sup>-Systems. Dieses bestand aus einem VDW-Silver-Reciproc<sup>®</sup> Endodontiemotor (VDW GmbH, München, Deutschland) und R40 Feilen (VDW GmbH, München, Deutschland). Diese sind aus einer Nickel-Titan-Legierung gefertigt und besitzen einen apikalen Durchmesser von 0,40 mm (ISO 40) sowie eine Konizität (Taper) von sechs Prozent innerhalb der ersten 3 mm apikal. Der Durchmesser D16 beträgt 1,10 mm.

### 3. 1. 5 Wurzelfüllung

Die orthograde Wurzelfüllung erfolgte mit der kalten, lateralen Kondensationstechnik.

#### **Guttaperchapoints (ROEKO, Langenau, Deutschland)**



Abb. 2: Roeko Guttapercha; [www.ap.coltene.com](http://www.ap.coltene.com); 18.02.18

Diese farbcodierten, ISO-genormten, halbfesten Wurzelfüllstifte dienen der orthograden Wurzelfüllung. Die Basis des Materials ist der eingetrocknete Milchsaff verschiedener tropischer Gewächse, das sogenannte Guttapercha, welches dem Kautschuk ähnelt. Dentales Guttapercha liegt in der Regel in der  $\beta$ -Form vor. Weitere Zusätze sind Zinkoxid als Füller, Wachse, Kunststoff als Weichmacher und Metallsulfate zur Erhöhung des Röntgenkontrastes sowie Farbstoffe und Spurenelemente. Die Verarbeitung kann sowohl kalt als auch warm erfolgen, es ist jedoch immer eine Wurzelkanalfüllpaste anzuwenden. Vorteilhafte Eigenschaften des Materials sind das relativ gute Abdichtungsverhalten, die Biokompatibilität, gute Wiederentfernbarkeit, gute Handhabbarkeit sowie dass es keiner Resorption unterliegt.

#### **AH-Plus<sup>™</sup> Sealer (Dentsply, Konstanz, Deutschland)**






Abb. 3: AH-Plus Sealer; [www.maillefer.com](http://www.maillefer.com); 18.02.18

Die Wurzelkanalfüllpaste auf Epoxydharzbasis wurde in Kombination mit den Guttaperchastiften zur orthograden Wurzelfüllung verwendet. Als Vorteile nennt der Hersteller eine gute Handhabbarkeit, gute Radioopazität, hohe Dimensionsstabilität, geringe Löslichkeit und gute Biokompatibilität. Der Sealer liegt in zwei separaten Tuben, die im Verhältnis 1:1 angemischt werden, vor. Die Verarbeitungszeit beträgt bis zu vier Stunden, die Aushärtephase dauert bis zu 24 Stunden.

### 3. 1. 6 Retrograde Präparation

**SONICflex retro Spitze Nr. 17**  
 Behandlung: Präparation des Wurzelkanals, deutlich erleichteter Zugang bei starker Wurzelkrümmung  
 Form: **rechts**, kleiner Zylinder, Diamantierung D 64








Bestellnummer: passend für SONICflex 2000 N / L, 2003 / L  
 passend für SONICflex 2008 / L, 2008 S / LS

0.571.5581  
 1.006.2035

---

**SONICflex retro Spitze Nr. 20 und Nr. 21**  
 Behandlung: Präparation des Unterschnitts. Achsengerechte Wurzelkanalaufbereitung bei minimalem Knochendefekt  
 Form: birnenförmig, **klein, links** (Nr. 20), **rechts** (Nr. 21), Diamantierung D 64

Bestellnummer: passend für SONICflex 2000 N / L, 2003 / L  
 passend für SONICflex 2008 / L, 2008 S / LS

0.571.5521  
 1.006.2037

Abb. 4: Diamantierte Ultraschallansätze SONICflex retro Spitzen Nr. 17 und 21; [www.kavo.com](http://www.kavo.com); 12.02.18

In der vorliegenden Untersuchung wurden zwei unterschiedliche retrograde Kavitäten präpariert, um einen möglichen Einfluss der Kavitätenkonfiguration auf die Randständigkeit unterschiedlicher Füllungsmaterialien zu ermitteln. Zur Präparation der retrograden Kavität wurden die diamantierten Schallspitzen SonicFlex retro Spitze Nr. 21 (Diamantierung D64, KaVo Dental GmbH, Bieberach, Deutschland) sowie die SonicFlex retro Spitze Nr. 17 (Diamantierung D64, KaVo Dental GmbH, Bieberach, Deutschland) benutzt.

### 3. 1. 7 Materialien zur retrograden Wurzelfüllung

Für die vorliegende Untersuchung wurden verschiedene retrograde Füllungsmaterialien verwendet, die in Bezug auf ihre Randständigkeit und Homogenität hin untersucht wurden. Die Materialien werden im Folgenden beschrieben.

**ProRoot™ MTA** (DENTSPLY DeTrey, Konstanz, Deutschland)

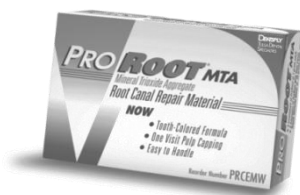


Abb. 5: Pro Root™ MTA; [www.dentsplysirona.com](http://www.dentsplysirona.com); 12.02.18

Dieses mineralische Trioxid-Aggregat bestehend unter anderem aus Calcium- und Aluminiumoxid sowie Calciumsulfat ist laut Herstellerangaben unter anderem für folgende Indikationen geeignet: als retrogrades Wurzelfüllmaterial, zur Apexifikation, zum Verschluss von Wurzelperforationen und als Überkappungsmaterial. Der Hersteller verspricht maximale Randdichtigkeit und damit vermindertes Eindringen von Bakterien.

Zusammensetzung: Pulver:

- Tricalciumsilikat
- Tricalciumaluminat
- Calciumoxid
- Siliziumoxid
- Wismutoxid

Flüssigkeit:

- destilliertes Wasser

**Biodentine™** (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés Cedex, Frankreich)



Abb. 6: Biodentine™; [www.septodont.de](http://www.septodont.de); 12.02.18

Biodentine™ ist ein bioaktiver und biokompatibler Dentinersatz auf Basis von Tricalciumsilikat. Es ist laut Herstellerangaben dem menschlichen Dentin in seinen mechanischen Eigenschaften ähnlich und kann deshalb im Zahnkronen und Zahnwurzelbereich als Dentinersatz ohne vorherige Oberflächenkonditionierung benutzt werden. Neben der provisorischen Füllungstherapie, der definitiven Unterfüllung, der Zahnhalsfüllung, der direkten und indirekten Überkappung, der Pulpotomie, dem Einsatz bei Perforationen und Resorptionen gibt der Hersteller auch die retrograde Füllungstherapie als Indikationsgebiet für die Anwendung von Biodentine™ an.

Zusammensetzung Pulver:

- Tricalciumsilikat

- Dicalciumsilikat
- Calciumcarbonat
- Eisenoxid
- Zirkoniumoxid

Flüssigkeit:

- wässrige Calciumchloridlösung
- wasserlösliche Polymere

**Super-EBA®** (The Bosworth Company, Skokie, USA)



Abb. 7: Super-EBA®; [www.netdental.de](http://www.netdental.de); 12.02.18

Super-EBA®-Zement ist ein durch Zusatz von Ethoxybenzoesäure abgewandelter Zinkoxid-Eugenol Zement, der weiterhin Aluminiumverstärkt ist. Diese Modifikationen bedingen eine höhere Druckfestigkeit und geringere Löslichkeit. Das enthaltene Eugenol wirkt pulpasedierend sowie bakterizid. Das Mischungsverhältnis kann laut Hersteller je nach Indikation individuell über den zugesetzten Pulveranteil variiert werden.

Zusammensetzung: Pulver:

- Zinkoxid
- Aluminiumoxid
- Naturharz

Flüssigkeit:

- Ortho-Ethoxy Benzoesäure
- Eugenol

**Ketac™ fil Plus Aplicap™** (3M Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland)



Abb. 8: Ketac™ fil Plus Aplicap™; [3m.com](http://3m.com); 12.02.2018

Ketac™ fil zählt zur Gruppe der Glasionomerezemente und ist in acht verschiedenen Farben erhältlich. Es hat laut Hersteller einen dem Zahn ähnlichen

Ausdehnungskoeffizienten, ist röntgenopak und zeichnet sich durch eine hohe Fluoridabgabe aus. Die Verpackungsform der Anmischkapseln bietet, komplettiert durch die Anwendung eines maschinellen Anmischsystems, gleichbleibende Mischungsverhältnisse sowie Anmischzeiten.

Zusammensetzung Pulver:

- Calciumfluorid
- Siliciumoxid
- Aluminiumoxid
- Aluminiumfluorid
- Aluminiumphosphat

Flüssigkeit:

- Polyacrylsäure
- Weinsäure
- Wasser

### 3. 1. 8 Materialien zur Probeneinbettung

Die Dehydratisierung, Entfettung und Einbettung der Proben erforderte die folgenden Materialien:

**Ethanol** (Ethanol absolute  $\geq 99,8\%$ , Honeywell Specialty Chemicals Seelze GmbH, Seelze, Deutschland)

Zur Dehydration der Proben wurden diese in einer aufsteigenden Alkoholreihe gelagert.

**Roticlear<sup>®</sup>** (Carl Roth GmbH, Karlsruhe, Deutschland)



Abb. 9: Roticlear<sup>®</sup>; [www.carlroth.com](http://www.carlroth.com); 14.02.18

Mit diesem Intermedium aus aliphatischen Kohlenwasserstoffen, einem Xylolersatz, erfolgte die Entfettung der Proben.

**Methacrylat** (Methyl methacrylat, Merck Schuchardt OHG, Hohenbrunn, Deutschland)

Dient zur Einbettung der Proben. Unter normalen Bedingungen, bei Raumtemperatur stabiles, geruchloses, flüssiges Methylmethacrylat. Enthält den Stabilisator Hydrochinonmonomermethylether.

**Dibutylphtalat** (Xylenes, SIGMA-ALDRICH CHEMIE GmbH, Steinheim, Deutschland)

Farblose, ölige Flüssigkeit, bestehend aus einem Ester aus 1-Butanol und Phtalsäure. Dient als Weichmacher und bestimmt die Endhärte des Kunststoffblocks, welche möglichst der der eingebetteten Probe entsprechen sollte, um beim Säge- und Schleifvorgang Abplatzungen und Brüche zu vermeiden.

**Benzoylperoxid** (Merck Schuchardt OHG, Hohenbrunn, Deutschland)

Dieses organische Peroxid mit zugesetztem Wasser (25%) als Stabilisator dient als Polymerisationsinitiator.

### 3. 1. 9 Materialien zur Herstellung der Dünnschliffe

Um die eingebetteten Proben nach der Aushärtung des Methylmethacrylates zu histologischen Dünnschliffen zu verarbeiten, waren die folgenden Materialien nötig:

**Diamantbandsäge** (Exakt Apparatebau GmbH, Norderstedt, Deutschland)

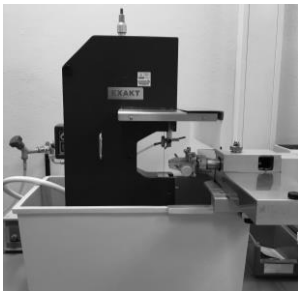


Abb. 10: Diamantbandsäge Exact; Orthopädielabor UKH, 11.01.18

Mit dieser Diamantbandsäge können neben nativen Proben auch eingebettete Proben verarbeitet werden. Möglich ist die Trennung von Implantaten und Schrauben, aber auch von Knochen und Muskelgewebe sowie Zähnen unter Wasserkühlung. Die in einer Präzisionsparallelführung angebrachte Werkstückführung mit eingespanntem Probenblock kann dabei eine Pendelbewegung um die eigene Achse ausführen. Dieses sogenannte *Contact-Point-Verfahren* geht mit geringerer Wärmeentwicklung und höherer Oberflächengüte einher. Zusätzlich kann auch die Vorschubkraft des Probenblocks über Gewichte individuell reguliert werden.

**Präzisionsklebepresse** (Exakt Apparatebau GmbH, Norderstedt, Deutschland)



Abb. 11: Präzisionsklebepresse Exact; Orthopädielabor UKH; 11.01.18

Mit dieser Vakuum-Klebpresse kann die für die Herstellung hochqualitativer Dünnschliffe notwendige planparallele Klebung der Probenschnitte auf Plexiglas-Objektträger gewährleistet werden. Das Gerät besteht aus einer feststehenden Deckplatte, die eine über Vakuum vermittelte Aufnahme des Objektträgers ermöglicht und einer beweglichen Bodenplatte, die über eine fest montierte Achse parallel zur Deckplatte verschiebbar ist. Eine einschwenkbare Lichtquelle über der Deckelplatte kann der Photopolymerisation eines Klebstoffes dienen.

**Exakt Mikroschleifgerät** (Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland)



Abb. 12: Mikroschleifsystem Exact; Orthopädielabor UKH; 11.01.18

Dieses Mikroschleifsystem mit Flächenschleiftechnologie (engl. contact-surface) dient der Herstellung planparalleler Dünnschliffe bis zu 20 µm Dicke. Durch wechselnde Schleifpapiere kann eine hohe Oberflächengüte gewährleistet werden. Die Probe wird an einem sich selbst zur Schleiffläche parallel haltenden Probenhaltersystem befestigt, so kann ein gleichmäßiger Abtrag gewährleistet werden. Der Schleifvorgang findet unter konstanter Wasserspülung statt, dabei kann sowohl die Oszillationsgeschwindigkeit des Vertikalschlittens, als auch die Rotationsgeschwindigkeit des Drehtellers mit aufgelegtem Schleifpapier reguliert werden. Der Druck der Probe auf dem Schleifpapier kann individuell über die Schwerkraft anhängbarer Gewichte reguliert werden.

**Siliciumcarbidpapier** (Struers ApS, Ballerup, Dänemark)

Mit Siliciumcarbid beschichtete Nassschleifpapiere der Körnung 1200, 2400 und 4000 mit einer Diagonale von 305 mm dienen zur Reduktion der Dicke der Dünnschliffe sowie zur abschließenden Politur.



### 3. 2 Methoden

#### 3. 2. 1 Grafische Übersicht der Methoden

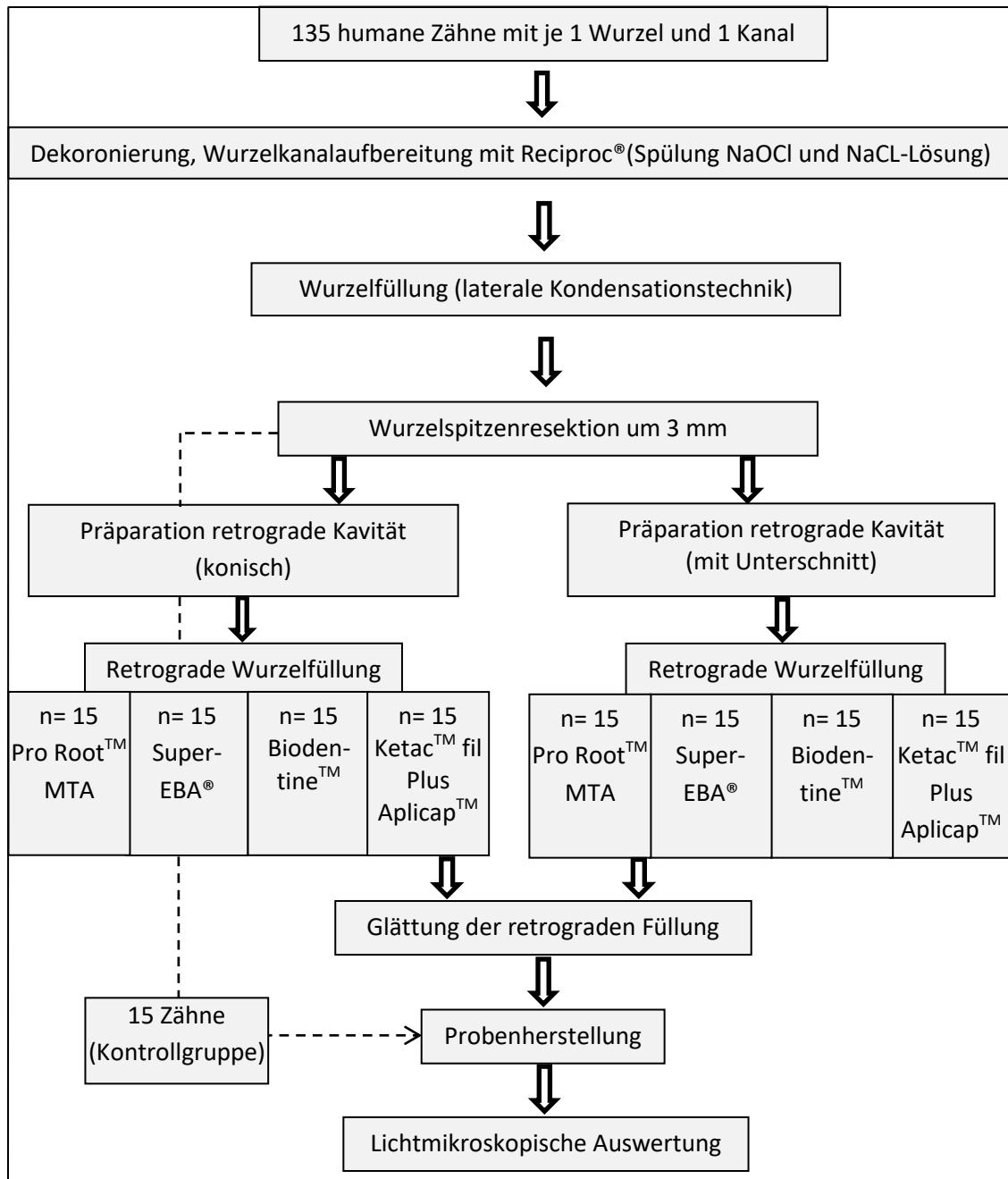


Abb. 13: Methodenübersicht

#### 3. 2. 2 Vorbereitung der Proben

Die Dekoronierung der Zähne erfolgte mit einem zylindrisch runden Diamantbohrer mit grüner Ringmarkierung (Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland). Die Arbeitsteillänge betrug 8,3mm. Dieser wurde in ein FG-Winkelstück eingespannt, unter Wasserkühlung (50ml/min) erfolgte die Präparation bei 200.000 U/min. Eventuell noch vorhandene Reste des Pulpadaches wurden entfernt und es erfolgte, falls nötig, eine koronale Erweiterung der Pulpenkavität. Diese erfolgte mit

einem *Gates-Glidden* Bohrer mit blauer Ringmarkierung (KOMET, Lemgo, Deutschland). Zur Sondierung und Abschätzung der Kanal Anatomie wurden Headströmfeilen der ISO-Größe 10 verwendet (VDW, München, Deutschland). Zum Einbringen der Spüllösung in das Kanalsystem wurde eine 3 ml fassende Spritze (BD, Franklin Lakes, New Jersey, USA) mit Luer-Lok sowie eine stumpfe Endokanüle mit frontaler Öffnung (Transcodent, Kiel, Deutschland) verwendet. Während des Aufbereitens wurde das Kanalsystem zusätzlich mit einer Wechselfspülung, bestehend aus einer Natriumhypochloridlösung (Universitätsapotheke Halle, Halle (Saale), Deutschland) und isotonischer Kochsalzlösung (B. BRAUN, Melsungen, Deutschland) behandelt, wobei jeweils mindestens 10 ml pro Probe zum Einsatz kamen. Die Trocknung der Kanäle wurde mit Papierspitzen (ROEKO Paper Points, Langenau, Deutschland) der ISO-Größen 15 bis 40 vorgenommen. Die orthograde Obturation des Wurzelkanalsystems erfolgte mittels der lateralen Kondensationstechnik mit Guttaperchaspitzen (ROEKO, Langenau, Deutschland) der ISO-Größen 15 bis 40 und AH Plus Sealer (Dentsply, Konstanz, Deutschland). Die verwendeten Spreader (VDW GmbH, München, Deutschland) hatten ISO-Größen zwischen 20 und 35. Bis zur weiteren Verarbeitung wurden die Proben mindestens 24 Stunden in steriler, isotoner Kochsalzlösung (B. BRAUN, Melsungen, Deutschland) gelagert, um die vollständige Aushärtung der Wurzelfüllung zu gewährleisten. Das Ausmaß der Wurzelspitzenkürzung um 3mm wurde mittels eines Stahllineals (HU-FRIEDY, Chicago, USA) validiert. Die Markierung erfolgte mit einem wasserfester Filzschreiber (STABILO, Heroldsberg, Deutschland). Die Kürzung der Wurzelspitze erfolgte unter Wasserspraykühlung mit einem konischen Diamantbohrer mit roter Ringmarkierung (Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) und einer Arbeitsteillänge von 8,3 mm. Dieser wurde in ein rotes Winkelstück (KaVo INTRAmatic Lux 2 25 LN (rot), KaVo Dental GmbH, Biberach, Deutschland) mit einer Übersetzung von 1:5 eingespannt. Hiernach wurden die Zähne randomisiert in 9 Gruppen eingeteilt. Durch die variable Schnitfführung ergeben sich jedoch 27 unterschiedliche Gruppen (siehe Tab. 3). Von den 135 Zähnen wurden 15 hiernach ohne weitere Behandlung in Kunststoff eingebettet, sie dienten als Kontrollgruppe mit orthograde Guttaperchafüllung ohne retrograden Verschluss. Zur Präparation der retrograden Kavität wurden die diamantierten Schallspitzen SonicFlex retro Spitze Nr. 21 (Diamantierung D64, KaVo Dental GmbH, Biberach, Deutschland) sowie die SonicFlex retro Spitze Nr. 17 (Diamantierung D64, KaVo Dental GmbH, Biberach, Deutschland) verwendet. Diese wurden in ein Schallhandstück (Kavo SonicFlex 2003/L (KaVo Dental GmbH, Biberach, Deutschland) gespannt. Die Präparation der Kavitäten erfolgte drucklos, möglichst ohne Lateralbewegung und unter

Wasserspraykühlung bei maximaler Stärke (6 kHz). Die Mindesttiefe der retrograden Kavität von 3mm wurde durch eine Parodontalsonde (Parodontometer CP-15 Universität North Carolina, Hu-Friedy Mfg. Co., LLC, Chicago, USA) validiert. Die Präparationsachse wurde möglichst genau dem Wurzelkanalverlauf entsprechend gelegt. Es wurde darauf geachtet, möglichst das gesamte Guttapercha im Kavitätenbereich zu entfernen. Die Kontrolle erfolgte durch Inspektion. Anschließend wurde die durch Präparation im Dentin verursachte Schmierschicht mittels einer mindestens 5ml umfassenden EDTA-Spülung entfernt (Universitätsapotheke Halle, Halle (Saale), Deutschland). Hierfür wurden 3 ml fassende Einmalspritzen (BD, Franklin Lakes, New Jersey, USA) mit Luer-Lok Ansatz sowie eine stumpfe, frontal offene Endkanüle (Transcodent, Kiel, Deutschland) verwendet. Anschließend erfolgte eine Neutralisationsspülung mit mindestens 5 ml NaCl-Lösung (B. BRAUN Melsungen AG, Melsungen, Deutschland). Zuletzt erfolgte die Trocknung der retrograden Kavität mittels Papierspitzen der Größen 15-40 (ROEKO Paper Points, Langenau, Deutschland). Anschließend erfolgte das Legen der retrograden Füllung. Die genannten Füllungsmaterialien wurden entsprechend den Herstellerangaben verarbeitet. Zur Applikation des Füllungsmaterials in die retrograde Kavität wurde ein Heidemann-Spatel (Komposit-Füllinstrument Goldstein #3 Gr. #6, Hu-Friedy Mfg. Co., LLC, Chicago, USA), sowie einem Amalgamstopfer (Amalgamstopfer PLGEF16, Hu-Friedy Mfg. Co., LLC, Chicago, USA) zur Verdichtung benutzt. Nach erfolgter Aushärtung der Materialien, welche mittels einer Zahnärztlichen Sonde (Sonde #3 Gr#6, Hu-Friedy Mfg. Co., LLC, Chicago, USA) validiert wurde, erfolgte eine abschließende Finierung des apikalen Bereiches zur Entfernung überschüssigen Materials sowie zur Glättung mittels eines konischen Diamantbohrers mit roter Ringmarkierung und einer Arbeitsteillänge von 8,3mm (Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland). Hiernach wurden die Proben für 24 Stunden in steriler NaCl-Lösung (B. BRAUN Melsungen AG, Melsungen, Deutschland) bei Raumtemperatur bis zur weiteren Verarbeitung gelagert. In der nachfolgenden Tabelle ist eine Auflistung der Untersuchungsgruppen dargestellt. GU steht dabei für die mit Guttapercha gefüllte Kontrollgruppe, SE für die mit Super-EBA<sup>®</sup> retrograd gefüllten Proben, BI für die mit Biodentine<sup>™</sup> retrograd gefüllten Proben, KT für die mit Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup> retrograd gefüllten Proben und MT für die mit Pro Root<sup>™</sup> MTA retrograd gefüllten Proben. Die Buchstaben A, I, und K zeigen auf welcher Schnitthöhe der retrograden Kavität, apikal, mittig oder koronal das histologische Präparat gefertigt wurde. Die Spezifizierung 1 bzw. 2 steht für die Konfiguration der retrograden Kavität (1= parallel, 2= mit Unterschnitt).

### 3. 2. 3 Versuchsgruppeneinteilung

Tab. 1: Einteilung der Untersuchungsgruppen

Versuchsgruppen	Nr	Zahnanzahl	retrogrades Füllmaterial	retrograde Präparation	Schnitthöhe
GU-A1	1	15	Guttapercha	Orthograd	apikal
GU-I1	2	15	Guttapercha	Orthograd	mittig
GU-K1	3	15	Guttapercha	Orthograd	koronal
SE-A1	4	15	Super-EBA®	parallel	apikal
SE-I1	5	15	Super-EBA®	parallel	mittig
SE-K1	6	15	Super-EBA®	parallel	koronal
SE-A2	7	15	Super-EBA®	mit Unterschnitt	apikal
SE-I2	8	15	Super-EBA®	mit Unterschnitt	mittig
SE-K2	9	15	Super-EBA®	mit Unterschnitt	koronal
BI-A1	10	15	Biodentine™	parallel	apikal
BI-I1	11	15	Biodentine™	parallel	mittig
BI-K1	12	15	Biodentine™	parallel	koronal
BI-A2	13	15	Biodentine™	mit Unterschnitt	apikal
BI-I2	14	15	Biodentine™	mit Unterschnitt	mittig
BI-K2	15	15	Biodentine™	mit Unterschnitt	koronal
KT-A1	16	15	Ketac™ fil Plus Aplicap™	parallel	apikal
KT-I1	17	15	Ketac™ fil Plus Aplicap™	parallel	mittig
KT-K1	18	15	Ketac™ fil Plus Aplicap™	parallel	koronal
KT-A2	19	15	Ketac™ fil Plus Aplicap™	mit Unterschnitt	apikal
KT-I2	20	15	Ketac™ fil Plus Aplicap™	mit Unterschnitt	mittig
KT-K2	21	15	Ketac™ fil Plus Aplicap™	mit Unterschnitt	koronal
MT-A1	22	15	Pro Root™ MTA	parallel	apikal
MT-I1	23	15	Pro Root™ MTA	parallel	mittig
MT-K1	24	15	Pro Root™ MTA	parallel	koronal
MT-A2	25	15	Pro Root™ MTA	mit Unterschnitt	apikal
MT-I2	26	15	Pro Root™ MTA	mit Unterschnitt	mittig
MT-K2	27	15	Pro Root™ MTA	mit Unterschnitt	koronal

### 3. 2. 4 Probenherstellung



Abb. 14: Proben in temperiertem Wasserbad

Die Probenherstellung wurde in Anlehnung an die von Donath etablierte Trenn-Dünnschlifftechnik durchgeführt (Donath und Breuner, 1982). Das schematische Vorgehen der Einbettung ist in Tab. 2 gezeigt. Es wurde auf eine ausreichende Entwässerung geachtet, da verbleibendes Wasser zu sogenannten Lunkerstellen führen kann, welche die Schnittqualität negativ beeinflussen können. Die Lagerung der Proben erfolgte bis zur Lösung MMA I auf einem Universalschüttler (SM-30, Edmund Bühler GmbH, Tübingen, Deutschland). Die nachfolgende Einbettung in den Lösungen MMA II sowie MMA III erfolgte im temperierten Wasserbad (Julabo Labortechnik, Seelbach, Deutschland) bei 27 °C zur Ableitung der Reaktionswärme. Die Vorrichtung steht dabei unter einem Luftabzug. Als Einbettform dienten Gläser mit luftdicht verschließbaren Deckeln. Die Proben mussten während der ganzen Prozedur immer vollständig von dem jeweiligen Medium bedeckt sein. Jeder Wechsel der Lösung macht zudem eine Neuorientierung der Probe in ihrem Gefäß notwendig.

Tab. 2: Einbettprotokoll der Proben

Dauer	Substanz
1 Tag	70% Ethanol, RT, Schüttler
2 Tage	96% Ethanol, RT, Schüttler
3 Tage	Abs. Ethanol, RT, Schüttler
1 Tag	Roticlear®, RT, Schüttler
2 Tage	MMA I, RT, Schüttler
4 Tage	MMA II, Wasserbad 27°C
Bis vollständig ausgehärtet (ca. 1 Woche)	MMA III, Wasserbad 27°C

Die Zusammensetzung der unterschiedlichen MMA-Lösungen ist nachstehend aufgeführt.

Tab. 3: Zusammensetzung der MMA-Lösungen

	MMA-Lösung	Dibuthylphtalat (Weichmacher)	Benzoylperoxid (Polymerisationsstarter)
MMA I	100 ml		
MMA II	95 ml	5 ml	1 g
MMA III	95 ml	5 ml	3 g

Die oben gezeigten Mischverhältnisse stellten sich als ideal heraus, um transparente, gleichmäßig auspolymerisierte Kunststoffblöcke zu erhalten, die sowohl gut schneidbar, als auch schleif- und polierbar waren. Nach der vollständigen Aushärtung der Proben erfolgte die Entfernung der Kunststoffblöcke aus den Einbettgläsern und die Herstellung serienmäßiger Dünnschliffe.



Abb. 15: Vollständig auspolymerisierte Probe nach Zerschlagung des Einbettglases.

Nach dem Einspannen der Probenblöcke in die Klemmvorrichtung der Präzisions-Parallelführung wurde zunächst bis zum Erreichen des apikalen Wurzelbereiches schrittweise das Überschüssige PMMA mit einer Diamantbandsäge (Exact Apparatebau GmbH, Norderstedt, Deutschland) unter Wasserspraykühlung entfernt.



Abb. 16: Eingespannter Probenblock in der Werkstückführung

Das eingesetzte Trennband aus Stahl mit Stirnseitiger Diamantbeschichtung und der Körnung D64 bewirkt einen Schnittverlust von etwa 0,25 mm pro Schnitt. Unter Beachtung des Schnittverlustes wurden dann je Probe drei Schliffe der retrograden Füllung unter Wasserkühlung gefertigt, jeweils auf 1mm (apikal), 2mm (in der Mitte) und 3mm (koronal) Entfernung vom apikalen Wurzelbereich. Die gewünschte Ebene wurde dabei zunächst an die Oberfläche gebracht und dann in einer Entfernung von 0,200 mm als Schliff abgetrennt. Dies gelingt über die im Zentrum der Parallelführung befindliche Pinole mit Klemmvorrichtung für den Probenblock, die über eine Mikroschraube um 0,02 mm zum Trennband hin oder davon weg bewegt werden kann. Es erfolgte die Markierung der zu untersuchenden Schnittebene mit einem wasserfesten Filzschreiber (STABILO, Heroldsberg, Deutschland).

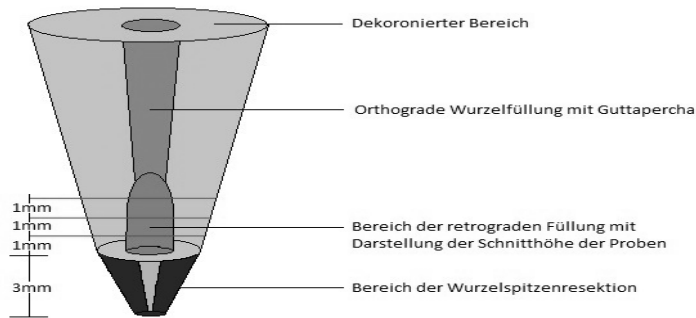


Abb. 17: Schema zur Fertigung der Dünnschliffe im Bereich der retrograden Füllung einer Probe. Koronal liegt die Wurzelfüllung aus Guttapercha, die im Rahmen der Probenvorbereitung durchgeführt wurde.

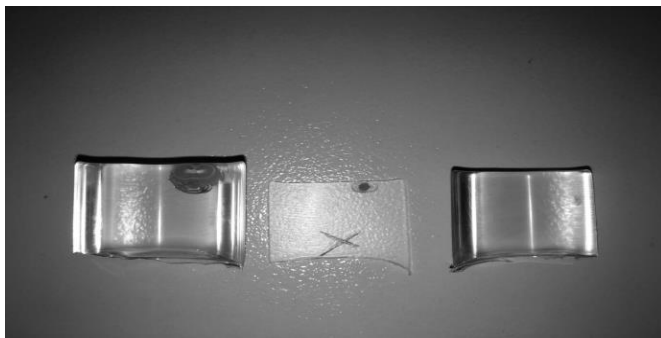
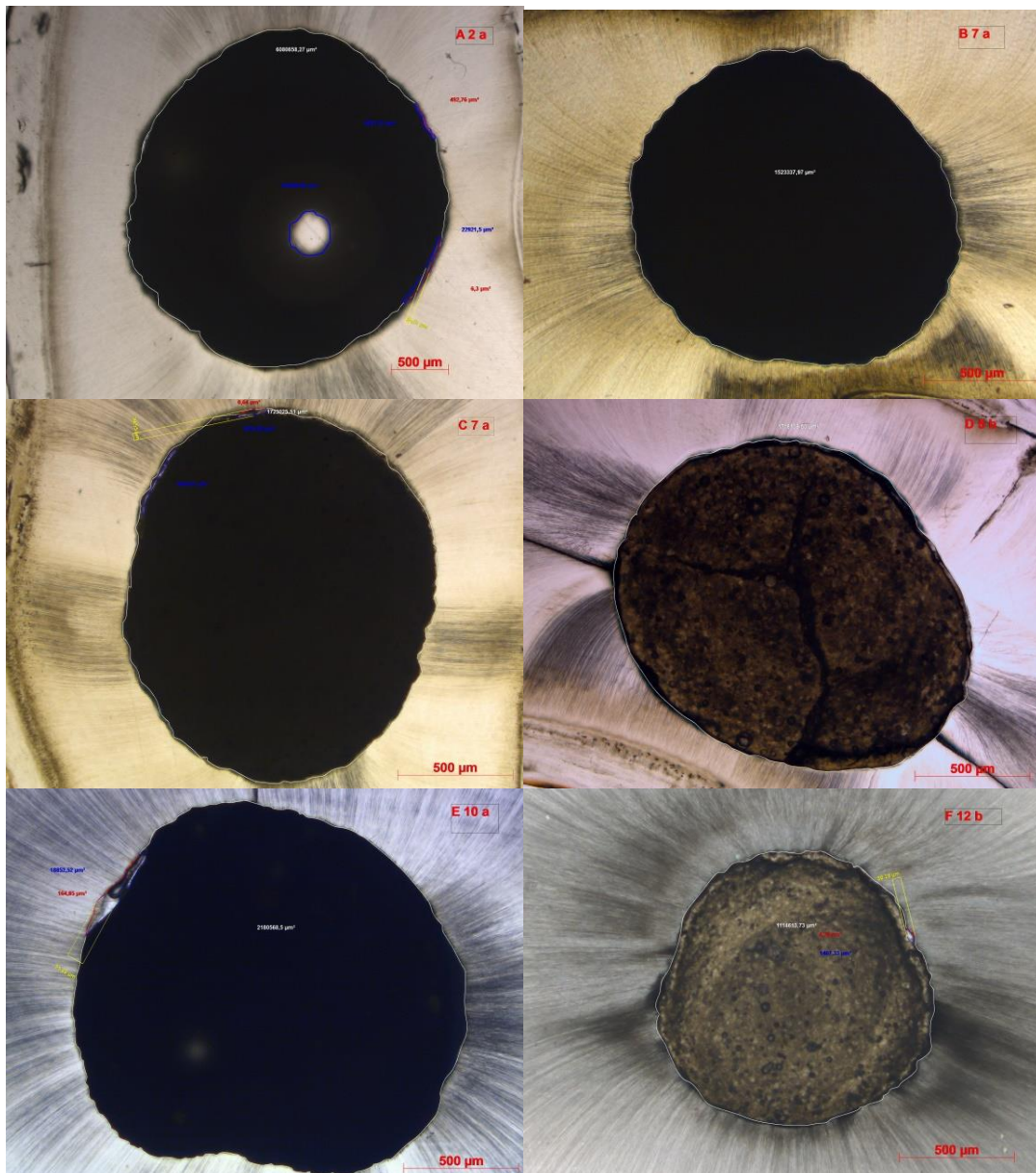


Abb. 18: Probenblock nach durchgeführtem Dünnschnitt mit Ebenenmarkierung.

Anschließend wurden die Schliffe per Hand mit Siliciumcarbid-Papier mit der Körnung 1200 (Struers ApS, Ballerup, Dänemark) an der zu klebenden Seite vorgeschliffen. Nun erfolgte die definitive Schliffdickenbestimmung mit einer Bügelmikrometerschraube mit Digitalanzeige (Mitutoyo Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland). Daraufhin wurde mit einer Präzisionsklebepresse (Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland) das Aufkleben der Schnitte auf planparallele Plexiglas-Objektträger (Walter Messner GmbH, Oststeinbek, Deutschland) mittels des transparenten Einkomponentenklebers Delo<sup>®</sup>-CA 2905 (DELO Industrie Klebstoffe, Windach, Deutschland) vorgenommen. Die markierte Ebene bildete hierbei die Klebefläche. Eine luftblasenfreie, transparente Klebung ist Voraussetzung für die weitere Untersuchung. Die Aushärtung des Klebers erfolgte unter Tageslicht. Mit dem Exakt-Mikroschleifsystem (Exakt Apparatebau GmbH, Norderstedt, Deutschland) und gewässertem Siliciumcarbid-Papier der Körnung 1200 und 2400 (Struers ApS, Ballerup, Dänemark) wurden die Proben daraufhin auf eine Dicke zwischen 80µm bis 160µm geschliffen. Gewährleistet wurde dies durch kontinuierliche Messung mit einer Bügelmikrometerschraube mit Digitalanzeige (Mitutoyo Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland). Zuletzt erfolgte eine Politur der Oberfläche mit gewässertem Siliciumcarbid-Papier der Körnung 4000.

### 3. 3 Analyse

Die Untersuchung der fertigen Proben erfolgte mit dem Durchlichtmikroskop Axioplan unter 5-facher Vergrößerung sowie der Mikroskopkamera Axioicam ERc 5s (beide Carl Zeiss Microscopy, Jena, Deutschland). Die Auswertung der gewonnenen Bilder wurde mit der Software für digitale Bildverarbeitung AxioVision SE 64 (Carl Zeiss Microscopy, Jena, Deutschland) durchgeführt. Es erfolgte eine Benennung der Proben sowie das Einfügen eines Maßstabbalkens. Die Skalierung erfolgt hierbei automatisch durch die Software bei bekannter Objektivgröße und Bildgröße. Neben dem Umfang und der Fläche der Kavität wurde der Anteil des imperfekten Randes, der maximale Randspalt ebenso wie der Anteil an Luftblasen an der Gesamtfläche der Kavität gemessen.





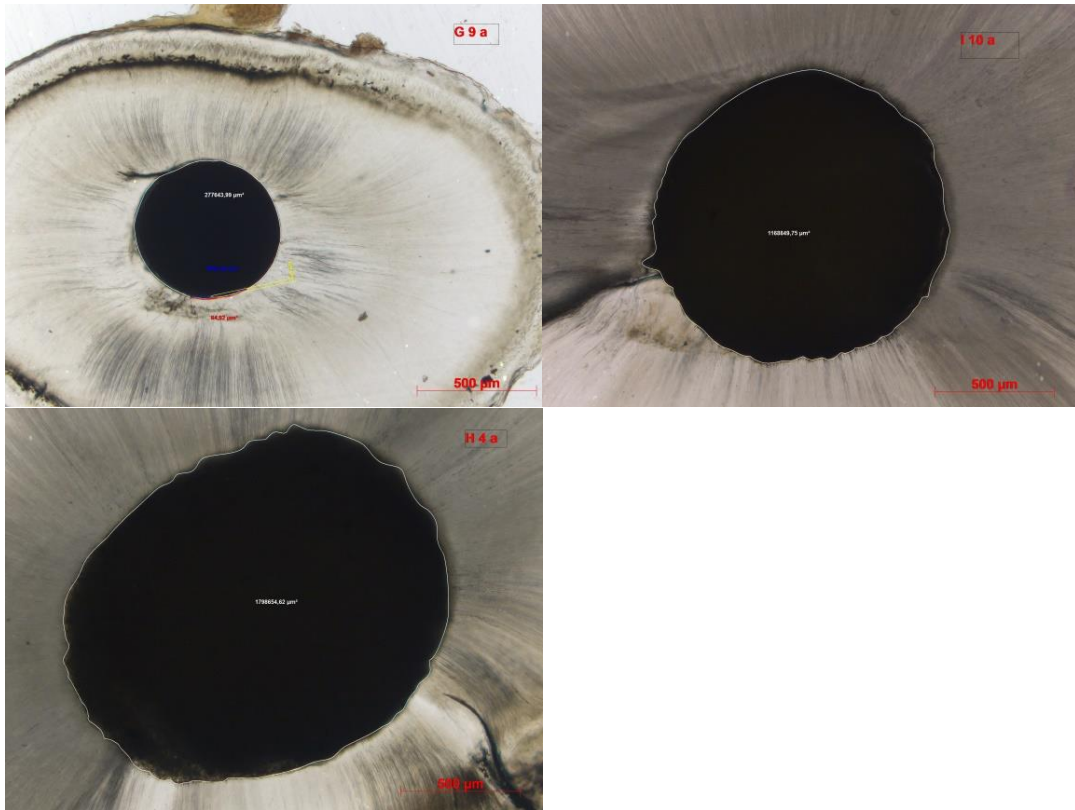


Abb. 19: Beispiele der ausgewerteten Proben aus Gruppe A-I. Auswertung mit der Bildanalysesoftware AxioVison SE 64.

### 3. 4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der gewonnenen Daten erfolgte mit dem Programm SPSS Statistics 25<sup>®</sup> (IBM<sup>®</sup>, Armonk, USA). Weiterhin erfolgten alle Berechnungen und graphischen Darstellungen mit diesem Programm oder Microsoft Office Excel. Für jede Versuchsgruppe wurden die Mittelwerte, der Median und die Standardabweichung des Anteils des imperfekten Randes am Gesamtumfang der Kavität, der maximale Randspalt sowie der Anteil an Lufteinschlüssen bezogen auf die Gesamtfläche erhoben. Der statistische Vergleich der Versuchsgruppen untereinander erfolgte mittels der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA). Anschließend wurde mit Hilfe des Tukey`s Studentized Range Tests bei einem Signifikanzlevel von 5 % der Vergleich der Gruppen untereinander durchgeführt.

## 4. Ergebnisse

### 4. 1 Ergebnisse in Präparationsabhängigkeit

#### 4. 1. 1 Anteil des imperfekten Randes in Abhängigkeit der Präparation

Sowohl die Gruppe der Proben mit parallel präparierter retrograder Kavität als auch die Proben mit retrograder Kavität mit Unterschnitt wiesen eine Randspaltbildung auf. Der höhere Mittelwert zeigte sich in der Gruppe P (parallel), der geringere in der Gruppe U (mit Unterschnitt). Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der beiden Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Prozent.

Tab. 4: Anteil imperfekter Rand in Abhängigkeit der Konfiguration der retrograden Kavität (%)

Gruppe	Abkürzung	n	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	P	170	5,06	11,51	0,00	100,00	0,00
2	U	168	2,79	6,12	0,00	37,97	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des Anteiles an imperfektem Rand und deren Medianwerte sowie das obere Quartil, den Whisker sowie Ausreißer.

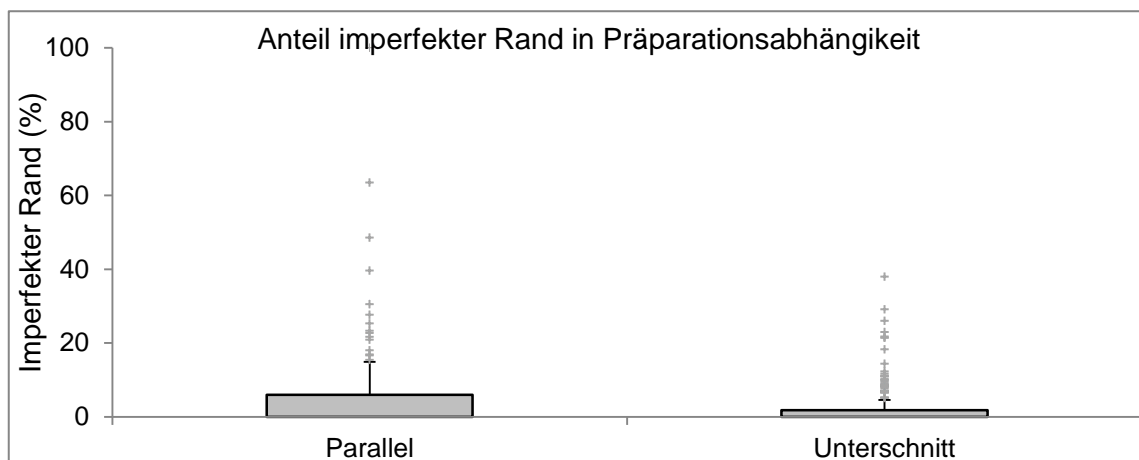


Abb. 20: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

#### 4. 1. 2 Maximaler Randspalt in Abhängigkeit der Präparation

Beide Untersuchungsgruppen mit unterschiedlich präparierter retrograder Kavität wiesen eine Randspaltbildung auf. Der höhere Mittelwert des maximalen Randspaltes zeigte sich in der Gruppe P (parallel) der geringere in der Gruppe U. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der beiden Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Mikrometer.

Tab. 5: Ergebnisse in Abhängigkeit der Konfiguration der retrograden Kavität ( $\mu\text{m}$ )

Gruppe	Abkürzung	n	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	P	170	37,68	111,48	0,00	840,73	0,00
2	U	168	38,00	131,06	0,00	1240,97	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des maximalen Randspaltes und deren Medianwerte sowie das obere Quartil, den oberen Whisker sowie Ausreißer.

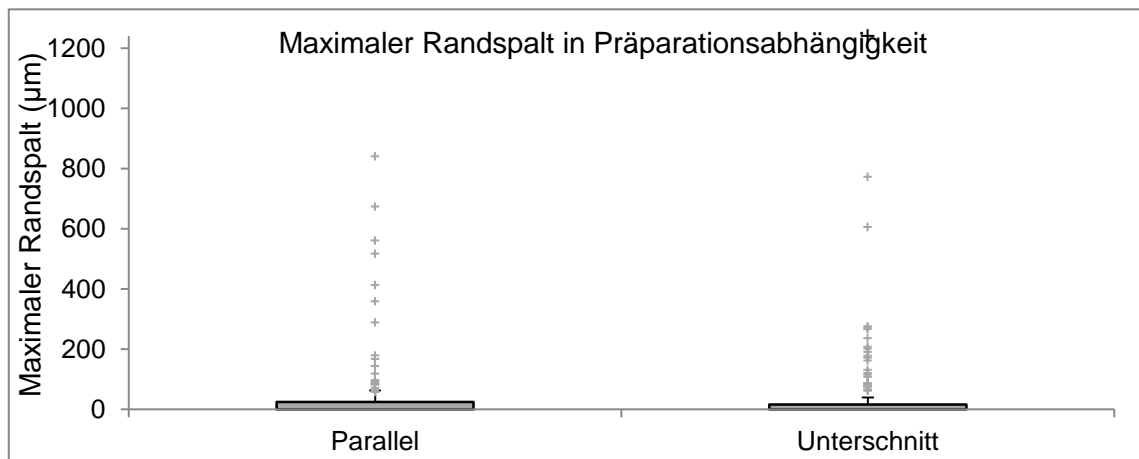


Abb. 21: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

#### 4. 1. 3 Anteil Lufteinschlüsse an der Kavitätenfläche in Präparationsabhängigkeit

Sowohl die Gruppe der Proben mit parallel präparierter retrograder Kavität als auch die Proben mit retrograder Kavität mit Unterschnitt wiesen Lufteinschlüsse auf. Der höhere Mittelwert zeigte sich in der Gruppe P (parallel), der geringere in der Gruppe U (mit Unterschnitt). Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der beiden Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Prozent.

Tab. 6: Luftanteil in Abhängigkeit der Konfiguration der retrograden Kavität (%)

Gruppe	Abkürzung	n	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	P	170	5,86	14,54	0,00	100,00	0,00
2	U	168	3,02	3,02	0,00	41,43	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des maximalen Randspaltes und deren Medianwerte sowie das obere Quartil, den oberen Whisker und Ausreißer.

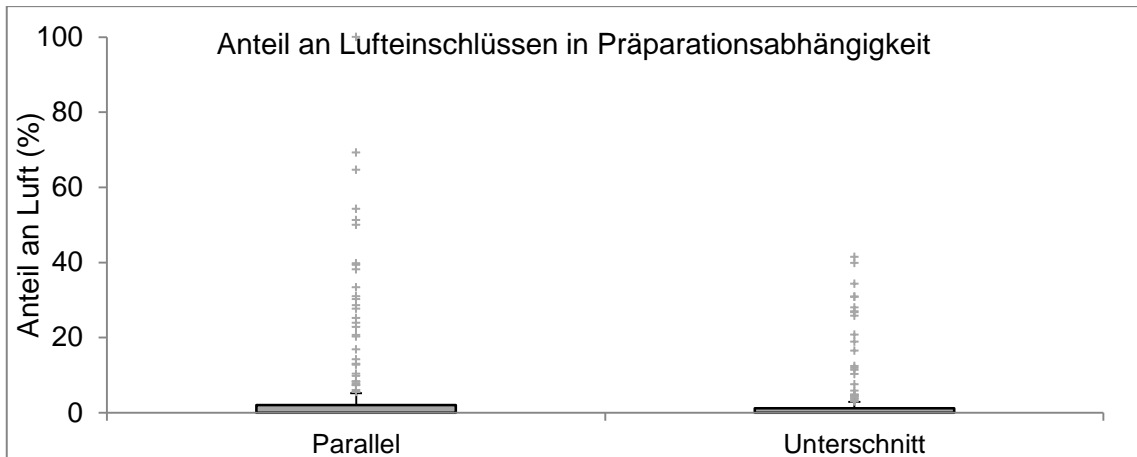


Abb. 22: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

## 4. 2 Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien

### 4. 2. 1 Anteil des imperfekten Randes in Abhängigkeit des retrograden Füllungsmaterials

Alle Versuchsgruppen der unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien zeigten eine Randspaltbildung. Der höchste Mittelwert zeigte sich dabei in der Gruppe KT (Ketac<sup>TM</sup> fil Plus Aplicap<sup>TM</sup>). Der geringste Mittelwert war in der Gruppe MT (ProRoot<sup>TM</sup> MTA) zu finden. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Prozent.

Tab. 7: Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien (%)

Gruppe	Abkürzung	n	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	GU	45	2,42	6,59	0	38,33	0,00
2	SE	85	3,19	6,29	0	37,97	0,00
3	MT	85	1,66	4,17	0	21,70	0,00
4	BI	82	4,85	10,21	0	63,46	0,00
5	KT	86	6,04	13,24	0	100,00	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des Anteiles an imperfekten Rand und deren Medianwerte sowie das obere und untere Quartil.

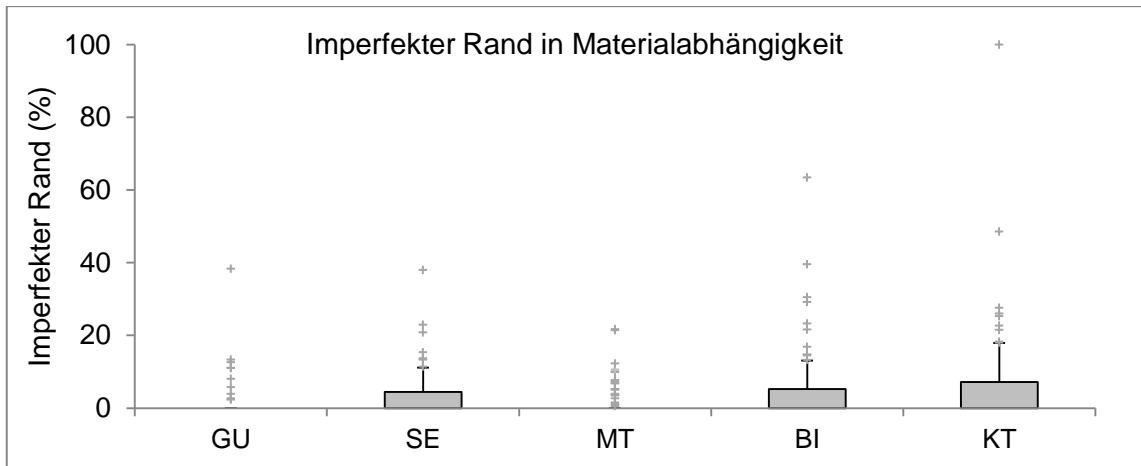


Abb. 23: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

Für die Versuchsgruppen des Anteils an imperfektem Rand in Materialabhängigkeit ergaben sich die folgenden Prozentanteile imperfekten Randes. Die Anteile imperfekten Randes der Versuchsreihe mit Guttapercha lagen bei 2,42% ( $\pm 6,59$ ). Die Versuchsreihe der retrograden Super-EBA<sup>®</sup> Füllung zeigte einen Wert von 3,19% ( $\pm 6,29$ ). Für die Versuchsreihe der mit ProRoot<sup>™</sup> MTA gefüllten Proben zeigte sich ein Mittelwert von 1,66 % ( $\pm 4,17$ ). In der Versuchsreihe der retrograden Biodentine<sup>™</sup> Füllung lag der Mittelwert bei 4,85% ( $\pm 10,21$ ). In der Versuchsreihe mit Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup> lag der Mittelwert bei 6,04 % ( $\pm 13,24$ ).

#### 4. 2. 2 Maximaler Randspalt in Abhängigkeit des retrograden Füllungsmaterials

Alle Versuchsgruppen der unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien zeigten eine Randspaltbildung. Der höchste Mittelwert zeigte sich dabei in der Gruppe KT (Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup>), der geringste in der Gruppe MT (Pro Root<sup>™</sup> MTA). Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Mikrometer.

Tab. 8: Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien ( $\mu\text{m}$ )

Gruppe	Abkürzung	n	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	GU	45	17,54	46,78	0	202,40	0,00
2	SE	85	18,74	45,93	0	270,40	0,00
3	MT	85	17,40	48,27	0	266,43	0,00
4	BI	82	21,32	62,37	0	517,78	0,00
5	KT	86	92,68	215,09	0	1240,97	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des maximalen Randspaltes sowie dessen Medianwerte sowie das obere und untere Quartil.

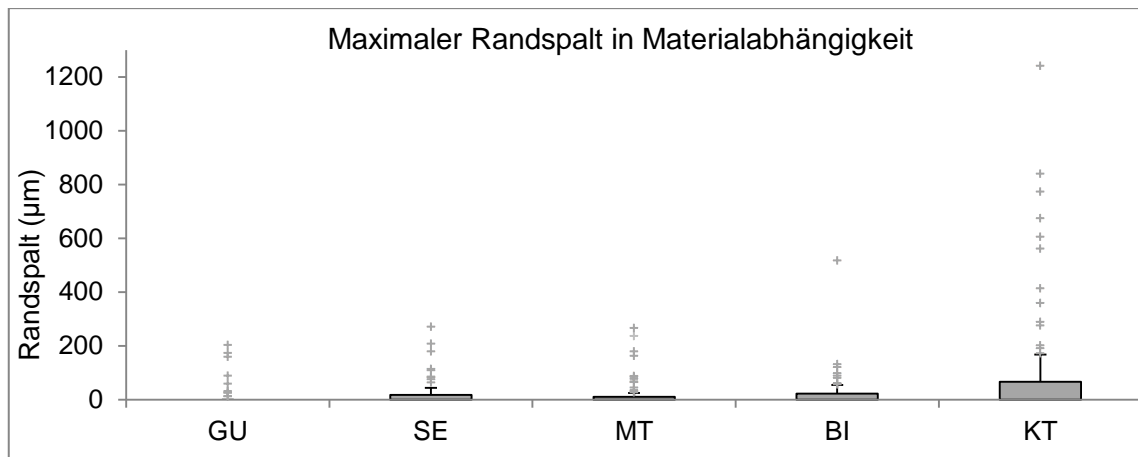


Abb. 24: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils

Für die Versuchsgruppen des maximalen Randspaltes in Materialabhängigkeit ergaben sich die folgenden mittleren Messwerte in Mikrometern. Die maximalen Randspalte lagen bei 17,54 ( $\pm$  46,78) für die Kontrollgruppe Guttapercha, bei 18,74 ( $\pm$  45,93) in der Gruppe mit retrograder Super-EBA<sup>®</sup> Füllung, bei 17,40 ( $\pm$  48,27) für die Gruppe mit retrograder Pro Root<sup>™</sup> MTA Füllung, bei 21,32 ( $\pm$  62,37) in der Gruppe mit retrograder Biodentine<sup>™</sup> Füllung und bei 92,68 ( $\pm$  215,09) in der mit Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup> retrograd gefüllten Gruppe.

#### 4. 2. 3 Anteil an Lufteinschlüssen an der Kavitätenfläche in Abhängigkeit des retrograden Füllungsmaterials

Alle Versuchsgruppen der unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien zeigten vorhandene Lufteinschlüsse. Der größte mittlere Anteil war dabei in der Gruppe KT (Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup>), der geringste in der Gruppe MT (ProRoot<sup>™</sup> MTA) zu finden. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Prozent.

Tab. 9: Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien (%)

Gruppe	Abkürzung	n	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	GU	45	1,54	3,27	0	15,79	0,00
2	SE	85	5,55	12,49	0	64,60	0,00
3	MT	85	0,67	2,28	0	18,84	0,00
4	BI	82	1,57	5,93	0	39,77	0,00
5	KT	86	9,86	17,54	0,83	100,00	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des Anteil an Lufteinschlüssen und dessen Medianwerte sowie das obere und untere Quartil.

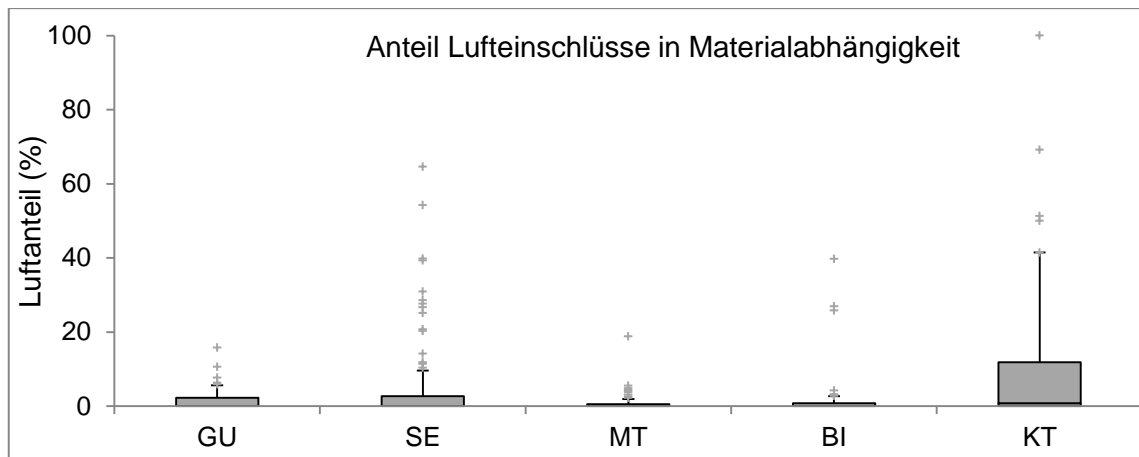


Abb. 25: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils

Für die Versuchsgruppen des Anteils an Lufteinschlüssen in Materialabhängigkeit ergaben sich die folgenden mittleren Messwerte in Prozent. Die mittleren Anteile an Luft lagen bei 1,54 ( $\pm 3,72$ ) für die Kontrollgruppe Guttapercha, bei 5,55 ( $\pm 12,49$ ) bei der Gruppe mit retrograder Super-EBA<sup>®</sup> Füllung, bei 0,67 ( $\pm 2,28$ ) für die Gruppe mit retrograder Pro Root<sup>™</sup> MTA Füllung, bei 1,57 ( $\pm 5,93$ ) bei der Gruppe mit retrograder Biodentine<sup>™</sup> Füllung und bei 9,86 ( $\pm 17,54$ ) bei der mit Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup> retrograd gefüllten Gruppe.

#### 4. 3 Ergebnisse in Material- und Präparationsabhängigkeit

##### 4. 3. 1 Imperfekter Rand in Material- und Präparationsabhängigkeit

Alle Versuchsgruppen der Füllungsmaterialien zeigten bei unterschiedlicher Präparation eine Randspaltbildung. Der höchste Mittelwert zeigte sich dabei in der Gruppe KT-P (Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup> parallel), der geringste Mittelwert war in der Gruppe MT-P (ProRoot<sup>™</sup> MTA parallel) zu finden. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Prozent.

Tab. 10: Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien und der Präparation (%)

Gruppe	Abkürzung	n	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	GU	45	2,42	6,59	0,00	38,33	0,00
2	SE-P	42	2,98	5,24	0,00	20,83	0,00
3	SE-U	43	3,41	7,22	0,00	37,97	0,00
4	MT-P	43	1,37	2,84	0,00	10,58	0,00
5	MT-U	42	1,96	5,22	0,00	21,70	0,00
6	BI-P	42	7,86	12,67	3,24	63,46	0,00
7	BI-U	40	1,68	5,28	0,00	29,12	0,00
8	KT-P	43	8,05	17,49	0,00	100,00	0,00
9	KT-U	43	4,02	6,36	0,00	25,98	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des Anteiles an imperfekten Rand und deren Medianwerte sowie das obere und untere Quartil.

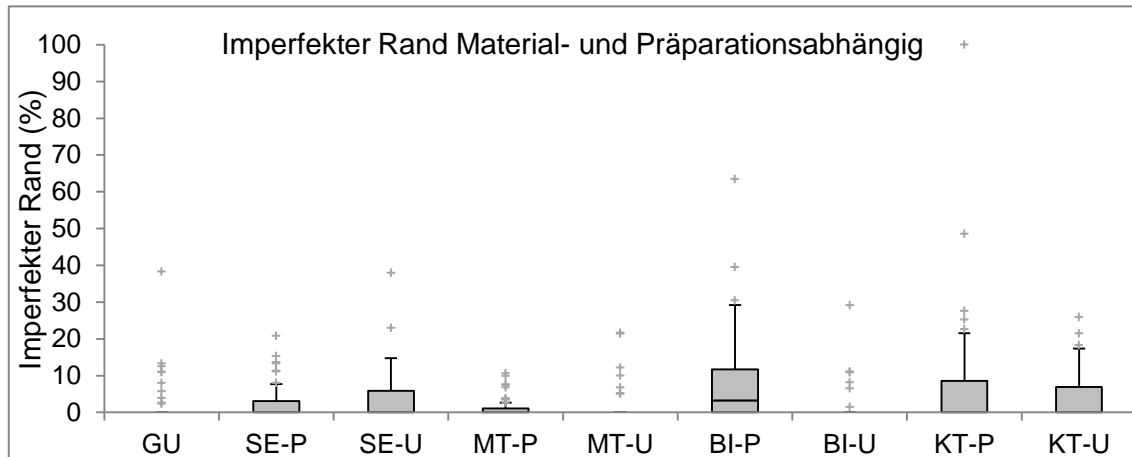


Abb. 26: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

Für die Versuchsgruppen des Anteils an imperfekten Rand in Material- und Präparationsabhängigkeit ergaben sich die folgenden Prozentanteile imperfekter Rand. Die Anteile imperfekten Randes der Versuchsreihe mit Guttapercha lagen bei 2,42% ( $\pm 6,59$ ). Die Versuchsreihe mit Super-EBA<sup>®</sup> Füllung und parallel präparierter retrograden Kavität zeigte einen Wert von 2,98% ( $\pm 5,24$ ), bei der mit Unterschnitt präparierten Gruppe von 3,41% ( $\pm 7,22$ ). Für die Versuchsreihe der mit ProRoot<sup>™</sup> MTA gefüllten Proben zeigten sich ein Mittelwert von 1,37% ( $\pm 2,84$ ) bei der Gruppe der parallel präparierten retrograden Kavität und ein Mittelwert von 1,96% ( $\pm 5,22$ ) bei der mit Unterschnitt. In der Versuchsreihe der retrograden Biodentine<sup>™</sup> Füllung lag der Mittelwert bei der parallel präparierten retrograden Kavität bei 7,86% ( $\pm 12,67$ ) und bei 1,68% ( $\pm 5,28$ ) bei der mit Unterschnitt präparierten retrograden Kavität. In der Versuchsreihe mit retrograder Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup>-Füllung lag der Mittelwert bei parallel präparierter retrograder Kavität bei 8,05% ( $\pm 17,49$ ) und bei 4,02% ( $\pm 6,36$ ) bei der mit Unterschnitt präparierten Kavität.

#### 4. 3. 2 Maximaler Randspalt in Material- und Präparationsabhängigkeit

Alle Versuchsgruppen der Füllungsmaterialien zeigten bei unterschiedlicher Präparation eine Randspaltbildung. Der höchste Mittelwert zeigte sich dabei in der Gruppe KT-U (Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup> mit Unterschnitt), der geringste Mittelwert war in der Gruppe BI-U (Biodentine<sup>™</sup> Unterschnitt) zu finden. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Mikrometer.



Tab. 11: Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien und der Präparation ( $\mu\text{m}$ )

Gruppe	Abkürzung	n	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	GU	45	17,54	46,78	0,00	202,40	0,00
2	SE-P	42	16,00	35,28	0,00	179,11	0,00
3	SE-U	43	21,41	54,67	0,00	270,40	0,00
4	MT-P	43	10,12	21,69	0,00	87,38	0,00
5	MT-U	42	24,85	64,65	0,00	266,43	0,00
6	BI-P	42	32,37	80,91	13,52	517,78	0,00
7	BI-U	40	9,71	30,45	0,00	131,67	0,00
8	KT-P	43	91,61	194,06	0,00	840,73	0,00
9	KT-U	43	93,75	236,58	0,00	1240,97	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des maximalen Randspaltes und dessen Medianwerte sowie das obere und untere Quartil.

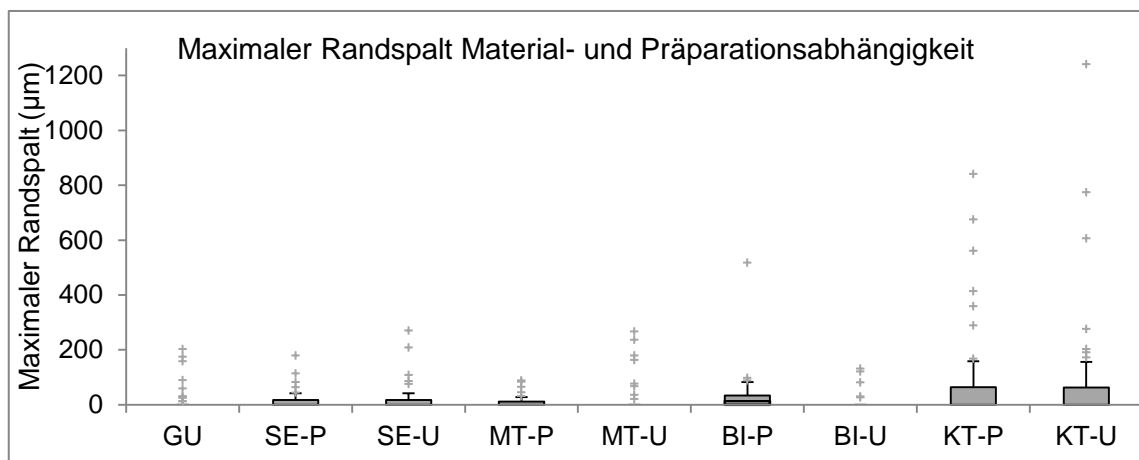


Abb. 27: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

Für die Versuchsgruppen des maximalen Randspaltes in Material- und Präparationsabhängigkeit ergaben sich die folgenden Messwerte in Mikrometer. Die mittleren Anteile des maximalen Randspaltes der Versuchsreihe mit Guttapercha lagen bei 17,54 ( $\pm$  46,78). Die Versuchsreihe mit Super-EBA<sup>®</sup> Füllung und parallel präparierter retrograden Kavität zeigte einen mittleren Wert von 16,00 ( $\pm$  35,28), bei der mit Unterschnitt präparierten Gruppe von 21,41 ( $\pm$  54,67). Für die Versuchsreihe der mit ProRoot<sup>™</sup> MTA gefüllten Proben zeigte sich ein Mittelwert von 10,12 ( $\pm$  21,69) bei der Gruppe der parallel präparierten retrograden Kavität und ein Mittelwert von 24,85 ( $\pm$  64,65) bei der mit Unterschnitt. In der Versuchsreihe der retrograden Biodentine<sup>™</sup> Füllung lag der Mittelwert bei der parallel präparierten retrograden Kavität bei 32,34 ( $\pm$  80,91) und bei 9,71 ( $\pm$  30,45) bei der mit Unterschnitt präparierten retrograden Kavität. In der Versuchsreihe mit retrograder Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup>-Füllung lag der Mittelwert bei parallel präparierter retrograder Kavität bei 91,61 ( $\pm$  194,06) und bei 93,75 ( $\pm$  236,58) bei der mit Unterschnitt präparierten Kavität.

#### 4. 3. 3 Anteil an Lufteinschlüssen in Material- und Präparationsabhängigkeit

Alle Versuchsgruppen der Füllungsmaterialien zeigten bei unterschiedlicher Präparation Lufteinschlüsse. Der höchste Mittelwert zeigte sich dabei in der Gruppe KT-P (Ketac™ fil Plus Aplicap™ parallel), der geringste Mittelwert war in der Gruppe MT-P (Pro Root™ MTA parallel) zu finden. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Prozent.

Tab. 12: Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien und der Präparation (%)

Gruppe	Abkürzung	n	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	GU	45	1,54	3,27	0,00	15,79	0,00
2	SE-P	42	7,30	15,16	0,35	64,60	0,00
3	SE-U	43	3,84	9,01	0,00	39,80	0,00
4	MT-P	43	0,31	0,89	0,00	5,51	0,00
5	MT-U	42	1,04	3,09	0,00	18,84	0,00
6	BI-P	42	1,49	6,11	0,00	39,77	0,00
7	BI-U	40	1,65	5,81	0,00	26,94	0,00
8	KT-P	43	14,29	21,52	6,00	100,00	0,00
9	KT-U	43	5,43	10,91	0,49	41,43	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des maximalen Randspaltes und dessen Medianwerte sowie das obere und untere Quartil.

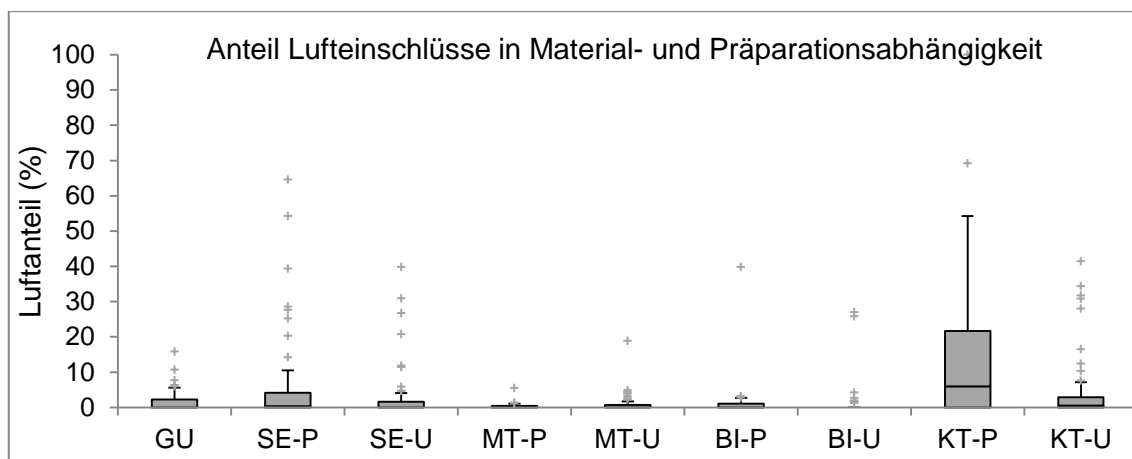


Abb. 28: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

Für die Versuchsgruppen des Anteils an Lufteinschlüssen an der Kavitätenfläche in Material- und Präparationsabhängigkeit ergaben sich die folgenden Messwerte in Prozent. Die mittleren Anteile des maximalen Randspaltes der Versuchsreihe mit Guttapercha lagen bei 1,54% ( $\pm 3,27$ ). Die Versuchsreihe mit Super-EBA® Füllung und parallel präparierter retrograden Kavität zeigte einen mittleren Wert von 7,30% ( $\pm 15,16$ ), bei der mit Unterschnitt präparierten Gruppe von 3,84% ( $\pm 9,01$ ). Für die

Versuchsreihe der mit ProRoot™ MTA gefüllten Proben zeigte sich ein Mittelwert von 0,31% ( $\pm 0,89$ ) bei der Gruppe der parallel präparierten retrograden Kavität und ein Mittelwert von 1,04% ( $\pm 3,09$ ) bei der mit Unterschnitt. In der Versuchsreihe der retrograden Biodentine™ Füllung lag der Mittelwert bei der parallel präparierten retrograden Kavität bei 1,49% ( $\pm 6,11$ ) und bei 1,65% ( $\pm 5,81$ ) bei der mit Unterschnitt präparierten retrograden Kavität. In der Versuchsreihe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung lag der Mittelwert bei parallel präparierter retrograder Kavität bei 14,29% ( $\pm 21,52$ ) und bei 5,43% ( $\pm 10,91$ ) bei der mit Unterschnitt präparierten Kavität.

#### 4. 4 Ergebnisse in Material- und Schnitthöhenabhängigkeit

##### 4. 4. 1 Imperfekter Rand in Abhängigkeit des retrograden Füllungsmaterials und der Schnitthöhe

Alle Versuchsgruppen der retrograden Füllungsmaterialien zeigten auf allen Schnitthöhen eine Randspaltbildung. Der höchste Mittelwert zeigte sich dabei in der Gruppe KT-K (Ketac™ fil Plus Aplicap™-koronal). Der geringste Mittelwert war in der Gruppe SE-K (Super-EBA®-koronal) zu finden. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Prozent.

Tab. 7: Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien und der Schnitthöhe (%)

Gruppe	Abkürzung	N	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	GU-A	15	2,37	4,62	0,00	13,30	0,00
2	GU-I	15	3,44	10,06	0,00	38,33	0,00
3	GU-K	15	1,44	3,40	0,00	11,02	0,00
4	SE-A	26	5,79	8,59	2,68	37,97	0,00
5	SE-I	30	2,92	5,81	0,00	22,95	0,00
6	SE-K	29	1,14	2,66	0,00	8,88	0,00
7	BI-A	27	5,69	10,09	0,00	39,56	0,00
8	BI-I	27	3,04	6,76	0,00	23,30	0,00
9	BI-K	28	5,78	12,89	0,00	63,36	0,00
10	MT-A	29	1,45	2,86	0,00	10,58	0,00
11	MT-I	28	1,19	3,08	0,00	12,22	0,00
12	MT-K	28	2,37	5,95	0,00	21,70	0,00
13	KT-A	29	4,22	6,89	0,00	25,98	0,00
14	KT-I	30	3,21	5,35	0,00	25,27	0,00
15	KT-K	27	11,13	21,21	1,63	100,00	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des Anteiles an imperfektem Rand in Abhängigkeit vom verwendeten Füllungsmaterial und der Schnitthöhe und deren Medianwerte sowie das obere und untere Quartil.

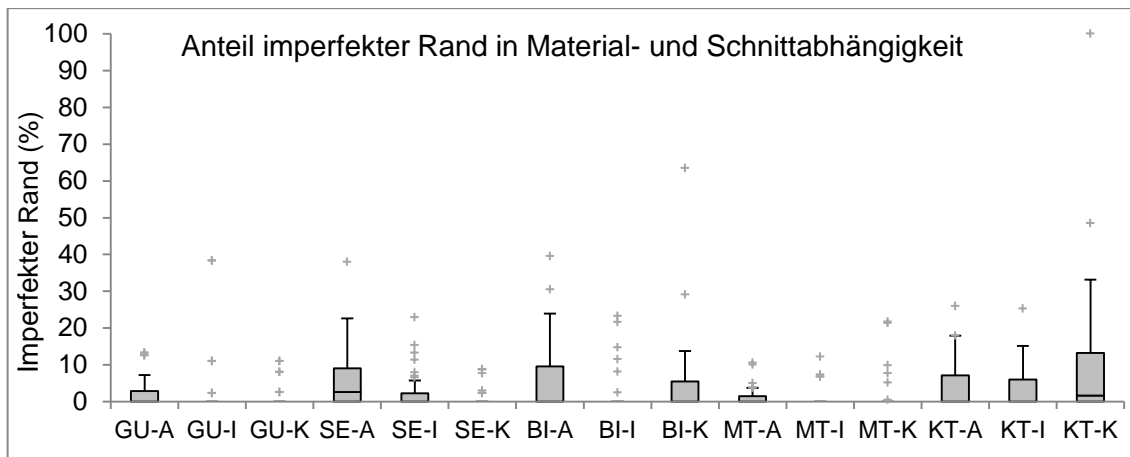


Abb. 29: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

#### 4. 4. 2 Maximaler Randspalt in Material- und Schnittabhängigkeit

Alle Versuchsgruppen der retrograden Füllungsmaterialien zeigten auf allen Schnitthöhen eine Randspaltbildung. Der höchste Mittelwert zeigte sich dabei in der Gruppe KT-K (Ketac<sup>TM</sup> fil Plus Aplicap<sup>TM</sup>-koronal). Der geringste Mittelwert war in der Gruppe SE-I (Super-EBA<sup>®</sup>-intermediär) zu finden. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Mikrometer.

Tab. 8: Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien und der Schnitthöhe (µm)

Gruppe	Abkürzung	N	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	GU-A	15	8,53	9,14	0,00	58,99	0,00
2	GU-I	15	30,99	33,20	0,00	202,40	0,00
3	GU-K	15	13,10	14,03	0,00	158,29	0,00
4	SE-A	26	31,07	46,05	16,82	179,11	0,00
5	SE-I	30	8,16	17,99	0,00	85,16	0,00
6	SE-K	29	18,63	61,95	0,00	270,40	0,00
7	BI-A	27	13,65	22,89	0,00	88,02	0,00
8	BI-I	27	11,39	27,25	0,00	120,63	0,00
9	BI-K	28	38,28	99,97	0,00	517,78	0,00
10	MT-A	29	11,14	30,71	0,00	162,54	0,00
11	MT-I	28	18,02	69,64	0,00	266,43	0,00
12	MT-K	28	23,25	51,35	0,00	236,56	0,00
13	KT-A	29	72,76	234,11	0,00	1240,97	0,00
14	KT-I	30	63,51	158,24	0,00	840,73	0,00
15	KT-K	27	146,68	244,68	1,63	773,64	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des maximalen Randspaltes in Abhängigkeit vom verwendeten Füllungsmaterial und der Schnitthöhe und deren Medianwerte sowie das obere und untere Quartil.

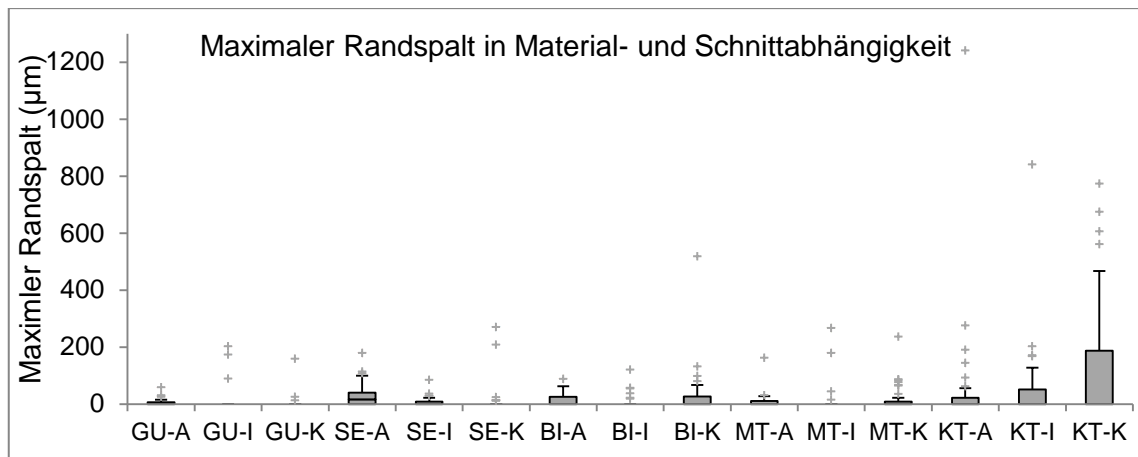


Abb. 30: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

#### 4. 4. 3 Anteil an Lufteinschlüssen in Material- und Schnittabhängigkeit

Alle Versuchsgruppen der Füllungsmaterialien zeigten bei unterschiedlicher Präparation und Schnitthöhe Lufteinschlüsse. Der höchste Mittelwert zeigte sich dabei in der Gruppe KT-K (Ketac™ fil Plus Aplicap™ koronal), der geringste Mittelwert war in der Gruppe MT-P (Pro Root™ MTA parallel) zu finden. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Untersuchungsgruppen mit Darstellung des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung, des Medianwertes sowie des Maximums und Minimums in Prozent.

Tab. 9: Ergebnisse in Abhängigkeit der retrograden Füllungsmaterialien und der Schnitthöhe (%)

Gruppe	Abkürzung	N	Mittelwert	Standardabweichung	Median	Maximum	Minimum
1	GU-A	15	0,67	0,71	0,00	3,70	0,00
2	GU-I	15	2,45	2,62	0,00	15,79	0,00
3	GU-K	15	1,50	1,61	0,00	10,64	0,00
4	SE-A	26	0,95	2,24	0,00	10,36	0,00
5	SE-I	30	7,45	12,95	0,28	39,80	0,00
6	SE-K	29	7,71	16,16	0,00	64,60	0,00
7	BI-A	27	1,51	4,94	0,00	25,81	0,00
8	BI-I	27	1,30	5,16	0,00	26,94	0,00
9	BI-K	28	1,88	7,50	0,00	39,77	0,00
10	MT-A	29	1,19	3,67	0,00	18,84	0,00
11	MT-I	28	0,26	0,77	0,00	3,82	0,00
12	MT-K	28	0,54	1,02	0,00	4,32	0,00
13	KT-A	29	4,48	9,97	0,00	41,43	0,00
14	KT-I	30	8,32	13,64	2,20	51,28	0,00
15	KT-K	27	17,34	24,44	7,35	100,00	0,00

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht alle ermittelten Werte des Anteil an Lufteinschlüssen in Abhängigkeit vom verwendeten Füllungsmaterial und der

Schnitthöhe und deren Medianwerte sowie das obere und untere Quartil.

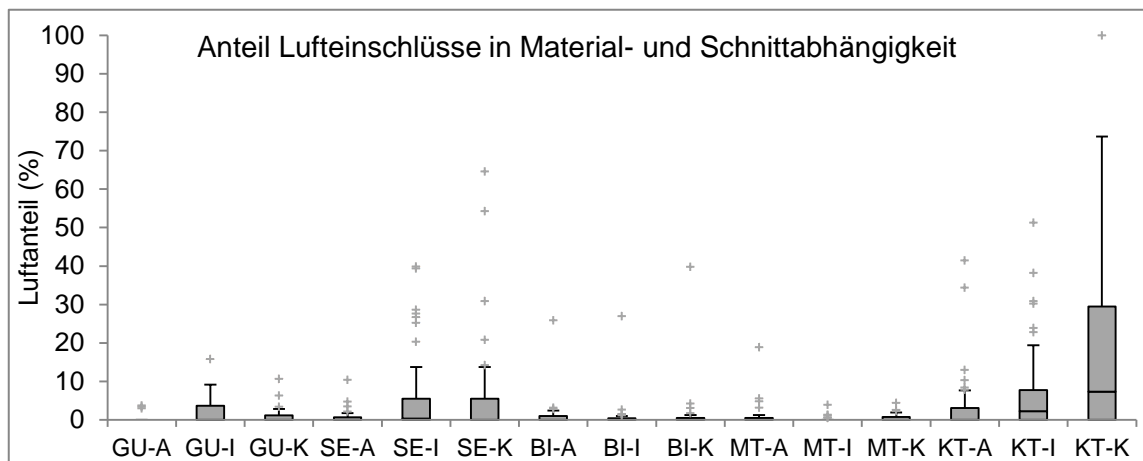


Abb. 31: Graphische Darstellung der Messwerte sowie des Medians, des oberen und unteren Quartils.

#### 4. 5 Statistische Auswertung

##### 4. 5. 1 Statistische Auswertung des Anteils an imperfektem Rand in Präparationsabhängigkeit.

Sowohl die Gruppe mit paralleler retrograder Kavität als auch die Gruppe mit retrograder Kavität mit Unterschnitt wiesen imperfekten Randschluss auf. Die ermittelten Werte der Versuchsgruppe mit retrograder Kavität mit Unterschnitt (U) waren dabei signifikant niedriger als die der Versuchsgruppe mit paralleler retrograder Kavität (P) ( $p \leq 0,05$ ; Tukey's Studentized Range Test).

Tab. 10: Statistischer Vergleich des Anteils an imperfektem Rand der Gruppen mit paralleler und mit Unterschnitt präparierten Gruppen, Tukey's Studentized Range Test

	<b>P</b> $\bar{x}=5,06$
<b>U</b> $\bar{x}=2,79$	$p= 0,025$

##### 4. 5. 2 Statistische Auswertung des maximalen Randspaltes in Präparationsabhängigkeit

Sowohl die Gruppe mit paralleler retrograder Kavität als auch die Gruppe mit retrograder Kavität mit Unterschnitt wiesen einen Randspalt auf. Die ermittelten Werte der Versuchsgruppe mit retrograder Kavität mit Unterschnitt (U) waren hierbei nicht signifikant niedriger als die der Versuchsgruppe mit paralleler retrograder Kavität (P) ( $p \geq 0,05$ ; Tukey's Studentized Range Test).

Tab. 11: Statistischer Vergleich maximalen Randspaltes der Gruppen mit paralleler und mit Unterschnitt präparierten Gruppen, Tukey's Studentized Range Test

	<b>P</b> $\bar{x}=37,68$
<b>U</b> $\bar{x}=38,00$	$p= 0,981$

#### 4. 5. 3 Statistischer Vergleich des Anteils an Lufteinschlüssen in Präparationsabhängigkeit

Sowohl die Gruppe mit paralleler retrograder Kavität als auch die Gruppe mit retrograder Kavität mit Unterschnitt wiesen Lufteinschlüsse auf. Der Anteil an Lufteinschlüssen war dabei bei der Versuchsgruppe mit retrograder Kavität mit Unterschnitt (U) signifikant niedriger als bei der Versuchsgruppe mit paralleler retrograder Kavität (P) ( $p \leq 0,05$ ; Tukey's Studentized Range Test).

Tab. 12: Statistischer Vergleich des Anteils an Lufteinschlüssen der Gruppen mit paralleler und mit Unterschnitt präparierten Gruppen, Tukey's Studentized Range Test

	<b>P</b> $\bar{x}=5,86$
<b>U</b> $\bar{x}=3,02$	$p= 0,027$

#### 4. 5. 4 Statistische Auswertung des Anteils an imperfektem Rand in Materialabhängigkeit

Zwischen den verwendeten Materialien zeigten sich Unterschiede im Anteil an imperfektem Rand. So zeigte die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung (KT) einen signifikant höheren Anteil an imperfektem Rand als die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA Füllung (MT) ( $p \leq 0,05$ ). Zwischen den verbleibenden Gruppen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ( $p \geq 0,05$ ).

Tab. 13: Statistischer Vergleich des Anteils an imperfektem Rand der Gruppen mit unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien, Tukey's Studentized Range Test

	<b>GU</b> $\bar{x}=2,42$	<b>SE</b> $\bar{x}=3,19$	<b>MT</b> $\bar{x}=1,66$	<b>BI</b> $\bar{x}=4,85$
<b>SE</b> $\bar{x}=3,19$	$p=0,990$			
<b>MT</b> $\bar{x}=1,66$	$p=0,991$	$p=0,797$		
<b>BI</b> $\bar{x}=4,85$	$p=0,583$	$p=0,752$	$p=0,145$	
<b>KT</b> $\bar{x}=6,04$	$p=0,180$	$p=0,229$	$p=0,013$	$p=0,910$

#### 4. 5. 5 Statistische Auswertung des maximalen Randspaltes in Materialabhängigkeit

Bei der Untersuchung des maximalen Randspaltes zeigten alle Materialien unterschiedliche Ergebnisse. Es konnte für die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung (KT) ein signifikant höherer maximaler Randspalt im Vergleich zu den Untersuchungsgruppen mit retrograder Super-EBA®-Füllung (SE), Pro Root™ MTA-Füllung (MT), Biodentine™-Füllung (BI) und orthograder

Guttaperchafüllung (GU) ermittelt werden ( $p \leq 0,05$ ). Zwischen den verbleibenden Gruppen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ( $p \geq 0,05$ ).

Tab. 14: Statistischer Vergleich des maximalen Randspaltes der Gruppen mit unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien, Tukey's Studentized Range Test

	<b>GU</b> $\bar{x}=17,54$	<b>SE</b> $\bar{x}=18,74$	<b>MT</b> $\bar{x}=17,40$	<b>BI</b> $\bar{x}=21,32$
<b>SE</b> $\bar{x}=18,74$	p=1,000			
<b>MT</b> $\bar{x}=17,40$	p=1,000	p=1,000		
<b>BI</b> $\bar{x}=21,32$	p=1,000	p=1,000	p=0,999	
<b>KT</b> $\bar{x}=92,68$	p=0,003	p=0,000	p=0,000	p=0,000

#### 4. 5. 6 Statistische Auswertung des Anteils an Lufteinschlüssen in Materialabhängigkeit

Die Untersuchung des Anteils an Lufteinschlüssen ergab signifikante Unterschiede zwischen den verwendeten Materialien. So wies die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac<sup>TM</sup> fil Plus Aplicap<sup>TM</sup>-Füllung (KT) einen signifikant höheren Anteil an Lufteinschlüssen auf als die Untersuchungsgruppe mit orthograder Guttaperchafüllung (GU), sowie die Untersuchungsgruppen mit retrograder Pro Root<sup>TM</sup> MTA-Füllung (MT) und Biodentine<sup>TM</sup>-Füllung (BI) auf ( $p \leq 0,05$ ). Die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root<sup>TM</sup> MTA-Füllung (MT) zeigte gegenüber der Untersuchungsgruppe mit retrograder Super-EBA<sup>®</sup>-Füllung (SE) signifikant weniger Lufteinschlüsse ( $p \leq 0,05$ ). Zwischen den verbleibenden Gruppen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ( $p \geq 0,05$ ).

Tab. 15: Statistischer Vergleich des Anteils an Lufteinschlüssen der Gruppen mit unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien, Tukey's Studentized Range Test

	<b>GU</b> $\bar{x}=1,54$	<b>SE</b> $\bar{x}=5,55$	<b>MT</b> $\bar{x}=0,67$	<b>BI</b> $\bar{x}=1,57$
<b>SE</b> $\bar{x}=5,55$	p=0,248			
<b>MT</b> $\bar{x}=0,67$	p=0,992	p=0,025		
<b>BI</b> $\bar{x}=1,57$	p=1,000	p=0,114	p=0,983	
<b>KT</b> $\bar{x}=9,86$	p=0,000	p=0,065	p=0,000	p=0,000



#### 4. 5. 7 Statistische Auswertung des Anteils an imperfektem Rand in Material- und Präparationsabhängigkeit

Die statistische Auswertung des Anteils an imperfektem Rand in Material- und Präparationsabhängigkeit ergab signifikante Unterschiede. So zeigte die Untersuchungsgruppe mit retrograder Biodentine™-Füllung bei paralleler Präparation (BI-P) signifikant mehr imperfekten Rand als die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA-Füllung bei paralleler (MT-P) und mit Unterschnitt (MT-U) gelegter Präparation sowie die Untersuchungsgruppe mit retrograder Biodentine™-Füllung bei Präparation mit Unterschnitt (BI-U) ( $p \leq 0,05$ ). Weiterhin zeigt die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung und paralleler Präparation (KT-P) signifikant schlechtere Ergebnisse als die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA-Füllung bei paralleler (MT-P) und mit Unterschnitt (MT-U) gelegter Präparation sowie die Untersuchungsgruppe mit retrograder Biodentine™-Füllung bei Präparation mit Unterschnitt (BI-U) ( $p \leq 0,05$ ). Zwischen den verbleibenden Gruppen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ( $p \geq 0,05$ ).

Tab. 16: Statistischer Vergleich des Anteils an imperfektem Rand der Gruppen mit unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien bei unterschiedlicher Präparation, Tukey's Studentized Range Test

	<b>GU</b> $\bar{x}=2,42$	<b>SE-P</b> $\bar{x}=2,98$	<b>SE-U</b> $\bar{x}=3,41$	<b>MT-P</b> $\bar{x}=1,37$	<b>MT-U</b> $\bar{x}=1,96$	<b>BI-P</b> $\bar{x}=7,86$	<b>BI-U</b> $\bar{x}=1,68$	<b>KT-P</b> $\bar{x}=8,05$
<b>SE-P</b> $\bar{x}=2,98$	p=1,000							
<b>SE-U</b> $\bar{x}=3,41$	p=1,000	p=1,000						
<b>MT-P</b> $\bar{x}=1,37$	p=1,000	p=0,996	p=0,978					
<b>MT-U</b> $\bar{x}=1,96$	p=1,000	p=1,000	p=0,998	p=1,000				
<b>BI-P</b> $\bar{x}=7,86$	p=0,095	p=0,212	p=0,323	p=0,021	p=0,057			
<b>BI-U</b> $\bar{x}=1,68$	p=1,000	p=0,999	p=0,993	p=1,000	p=1,000	p=0,042		
<b>KT-P</b> $\bar{x}=8,05$	p=0,069	p=0,166	p=0,261	p=0,014	p=0,040	p=1,000	p=0,029	
<b>KT-U</b> $\bar{x}=4,02$	p=0,995	p=1,000	p=1,000	p=0,899	p=0,977	p=0,534	p=0,954	p=0,458

#### 4. 5. 8 Statistischer Vergleich des maximalen Randspaltes in Material- und Präparationsabhängigkeit

Die Untersuchung des maximalen Randspaltes in Material- und Präparationsabhängigkeit ergab signifikante Unterschiede. So zeigte die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung bei paralleler Präparation (KT-P) einen signifikant größeren mittleren maximalen Randspalt im

Vergleich zu den Untersuchungsgruppen mit retrograder Pro Root™ MTA-Füllung bei paralleler Präparation (MT-P) und Biodentine™ bei Präparation mit Unterschnitt (BI-U) ( $p \leq 0,05$ ). Die Versuchsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung bei Präparation mit Unterschnitt (KT-U) zeigte einen signifikant größeren mittleren maximalen Randspalt im Vergleich zu den Untersuchungsgruppen mit orthograder Guttaperchafüllung (GU), mit retrograder Super-EBA®-Füllung bei paralleler Präparation (SE-P), mit retrograder Pro Root™ MTA-Füllung bei paralleler Präparation (MT-P) und mit retrograder Biodentine™-Füllung bei Präparation mit Unterschnitt (BI-U) ( $p \leq 0,05$ ). Zwischen den verbleibenden Gruppen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ( $p \geq 0,05$ ).

Tab. 17: Statistischer Vergleich des maximalen Randspaltes der Gruppen mit unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien bei unterschiedlicher Präparation, Tukey's Studentized Range Test

	<b>GU</b> $\bar{x}=17,54$	<b>SE-P</b> $\bar{x}=16,00$	<b>SE-U</b> $\bar{x}=21,41$	<b>MT-P</b> $\bar{x}=10,12$	<b>MT-U</b> $\bar{x}=24,85$	<b>BI-P</b> $\bar{x}=32,37$	<b>BI-U</b> $\bar{x}=9,71$	<b>KT-P</b> $\bar{x}=91,61$
<b>SE-P</b> $\bar{x}=16,00$	p=1,000							
<b>SE-U</b> $\bar{x}=21,41$	p=1,000	p=1,000						
<b>MT-P</b> $\bar{x}=10,12$	p=1,000	p=1,000	p=1,000					
<b>MT-U</b> $\bar{x}=24,85$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000				
<b>BI-P</b> $\bar{x}=32,37$	p=1,000	p=0,999	p=1,000	p=0,992	p=1,000			
<b>BI-U</b> $\bar{x}=9,71$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=0,992		
<b>KT-P</b> $\bar{x}=91,61$	p=0,053	p=0,052	p=0,091	p=0,023	p=0,136	p=0,268	p=0,027	
<b>KT-U</b> $\bar{x}=93,75$	p=0,041	p=0,040	p=0,072	p=0,017	p=0,109	p=0,224	p=0,020	p=1,000

#### 4. 5. 9 Statistische Auswertung des Anteils an Lufteinschlüssen in Material und Präparationsabhängigkeit

Die Untersuchung des Anteils an Lufteinschlüssen in Material und Präparationsabhängigkeit ergab signifikante Unterschiede. So wies die Untersuchungsgruppe mit retrograder retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ bei paralleler Präparation einen signifikant höheren Anteil an Lufteinschlüssen auf als die Untersuchungsgruppe mit orthograder Guttaperchafüllung (GU), die Untersuchungsgruppe mit retrograder Super-EBA®-Füllung bei Präparation mit Unterschnitt (SE-U), die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA-Füllung bei paralleler Präparation (MT-P), die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA-Füllung bei Präparation mit Unterschnitt (MT-U), die

Untersuchungsgruppe mit retrograder Biodentine™-Füllung bei paralleler Präparation (BI-P) sowie bei Präparation mit Unterschnitt (BI-U) und die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ bei Präparation mit Unterschnitt (KT-U) ( $p \leq 0,05$ ). Zwischen allen weiteren Gruppen ließen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen ( $p \geq 0,05$ ).

Tab. 18: Statistischer Vergleich des Anteils an Luftpfehlern der Gruppen mit unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien bei unterschiedlicher Präparation, Tukey's Studentized Range Test

	<b>GU</b> $\bar{x}=1,54$	<b>SE-P</b> $\bar{x}=7,30$	<b>SE-U</b> $\bar{x}=3,84$	<b>MT-P</b> $\bar{x}=0,31$	<b>MT-U</b> $\bar{x}=1,04$	<b>BI-P</b> $\bar{x}=1,49$	<b>BI-U</b> $\bar{x}=1,65$	<b>KT-P</b> $\bar{x}=14,29$
<b>SE-P</b> $\bar{x}=7,30$	p=0,205							
<b>SE-U</b> $\bar{x}=3,84$	p=0,983	p=0,845						
<b>MT-P</b> $\bar{x}=0,31$	p=1,000	p=0,057	p=0,825					
<b>MT-U</b> $\bar{x}=1,04$	p=1,000	p=0,137	p=0,948	p=1,000				
<b>BI-P</b> $\bar{x}=1,49$	p=1,000	p=0,215	p=0,982	p=1,000	p=1,000			
<b>BI-U</b> $\bar{x}=1,65$	p=1,000	p=0,264	p=0,990	p=1,000	p=1,000	p=1,000		
<b>KT-P</b> $\bar{x}=14,29$	p=0,000	p=0,057	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	
<b>KT-U</b> $\bar{x}=5,43$	p=0,721	p=0,996	p=0,999	p=0,367	p=0,592	p=0,726	p=0,781	p=0,003

#### 4. 5. 10 Statistische Auswertung des Anteils an imperfekten Rand in Material- und Schnitthöhenabhängigkeit

Zwischen den Untersuchungsgruppen in Abhängigkeit des Materials sowie der Schnitthöhe ließen sich bezüglich des Anteils an imperfektem Rand signifikante Unterschiede feststellen. So wies die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung auf koronaler Schnitthöhe (KT-K) einen signifikant höheren Anteil an imperfektem Rand auf als die Untersuchungsgruppen mit retrograder Super-EBA®-Füllung auf intermediärer Schnitthöhe (SE-I), die Untersuchungsgruppe mit retrograder Super-EBA®-Füllung auf koronaler Schnitthöhe (SE-K) sowie die Untersuchungsgruppen mit Pro Root™ MTA-Füllung auf apikaler (MT-A), intermediärer (MT-I) sowie koronaler (MT-K) Schnitthöhe auf ( $p \leq 0,05$ ). Zwischen den verbliebenen Gruppen ließen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen ( $p \geq 0,05$ ).

Tab. 19: Statistischer Vergleich des Anteils an imperfektem Rand der Gruppen mit unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien auf unterschiedlichen Schnitthöhen, Tukey's Studentized Range Test

	GU-A $\bar{x}=2,37$	GU-I $\bar{x}=3,44$	GU-K $\bar{x}=1,44$	SE-A $\bar{x}=5,79$	SE-I $\bar{x}=2,92$	SE-K $\bar{x}=1,14$	BI-A $\bar{x}=5,69$	BI-I $\bar{x}=3,04$	BI-K $\bar{x}=5,78$	MT-A $\bar{x}=1,45$	MT-I $\bar{x}=1,19$	MT-K $\bar{x}=2,37$	KT-A $\bar{x}=4,22$	KT-I $\bar{x}=3,21$
GU-I $\bar{x}=3,44$	p= 1,000													
GU-K $\bar{x}=1,44$	p= 1,000	p= 1,000												
SE-A $\bar{x}=5,79$	p= 0,997	p= 1,000	p= 0,972											
SE-I $\bar{x}=2,92$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,997										
SE-K $\bar{x}=1,14$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,823	p= 1,000									
BI-A $\bar{x}=5,69$	p= 0,998	p= 1,000	p= 0,976	p= 1,000	p= 0,998	p= 0,836								
BI-I $\bar{x}=3,04$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,998	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,999							
BI-K $\bar{x}=5,78$	p= 0,997	p= 1,000	p= 0,969	p= 1,000	p= 0,996	p= 0,804	p= 1,000	p= 0,998						
MT-A $\bar{x}=1,45$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,885	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,896	p= 1,000	p= 0,871					
MT-I $\bar{x}=1,19$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,841	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,853	p= 1,000	p= 0,823	p= 1,000				
MT-K $\bar{x}=2,37$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,984	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,987	p= 1,000	p= 0,982	p= 1,000	p= 1,000			
KT-A $\bar{x}=4,22$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,992	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,997	p= 0,994	p= 1,000		
KT-I $\bar{x}=3,21$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,999	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,999	p= 1,000	p= 0,999	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	
KT-K $\bar{x}=11,13$	p= 0,125	p= 0,302	p= 0,050	p= 0,659	p= 0,036	p= 0,003	p= 0,613	p= 0,056	p= 0,627	p= 0,004	p= 0,003	p= 0,020	p= 0,184	p= 0,054

#### 4. 5. 11 Statistische Auswertung des maximalen Randspaltes in Material- und Schnitthöhenabhängigkeit

Es ließen sich zwischen den Untersuchungsgruppen in Abhängigkeit des Materials sowie der Schnitthöhe bezüglich des maximalen Randspaltes signifikante Unterschiede feststellen. So zeigte die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung auf koronaler Schnitthöhe (KT-K) einen signifikant größeren maximalen Randspalt als die Untersuchungsgruppe mit orthograder Guttaperchafüllung auf koronaler Schnitthöhe (GU-K), die Untersuchungsgruppen mit retrograder Super-EBA®-Füllung auf apikaler (SE-A), intermediärer (SE-I) und

koronaler Schnitthöhe (SE-K), die Untersuchungsgruppen mit retrograder Biodentine™-Füllung auf apikaler (BI-A), intermediärer (BI-I) und koronaler Schnitthöhe (BI-K) und die Untersuchungsgruppen mit retrograder Pro Root™ MTA-Füllung auf apikaler (MT-A), intermediärer (MT-I) und koronaler (MT-K) Schnitthöhe ( $p \leq 0,05$ ). Zwischen den verbliebenen Gruppen ließen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen ( $p \geq 0,05$ ).

Tab. 20: Statistischer Vergleich des maximalen Randspaltes der Gruppen mit unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien auf unterschiedlichen Schnitthöhen, Tukey's Studentized Range Test

	GU-A $\bar{x}=8,53$	GU-I $\bar{x}=30,99$	GU-K $\bar{x}=13,10$	SE-A $\bar{x}=31,07$	SE-I $\bar{x}=8,16$	SE-K $\bar{x}=18,63$	BI-A $\bar{x}=13,65$	BI-I $\bar{x}=11,39$	BI-K $\bar{x}=38,28$	MT-A $\bar{x}=11,14$	MT-I $\bar{x}=18,02$	MT-K $\bar{x}=23,25$	KT-A $\bar{x}=72,76$	KT-I $\bar{x}=63,51$
GU-I $\bar{x}=30,99$	p=1,000													
GU-K $\bar{x}=13,10$	p=1,000	p=1,000												
SE-A $\bar{x}=31,07$	p=1,000	p=1,000	p=1,000											
SE-I $\bar{x}=8,16$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000										
SE-K $\bar{x}=18,63$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000									
BI-A $\bar{x}=13,65$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000								
BI-I $\bar{x}=11,39$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000							
BI-K $\bar{x}=38,28$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=0,999	p=1,000	p=1,000	p=1,000						
MT-A $\bar{x}=11,14$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000					
MT-I $\bar{x}=18,02$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000				
MT-K $\bar{x}=23,25$	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000	p=1,000			
KT-A $\bar{x}=72,76$	p=0,892	p=0,998	p=0,937	p=0,988	p=0,647	p=0,876	p=0,808	p=0,762	p=0,998	p=0,732	p=0,875	p=0,939		
KT-I $\bar{x}=63,51$	p=0,966	p=1,000	p=0,984	p=0,999	p=0,841	p=0,968	p=0,936	p=0,912	p=1,000	p=0,896	p=0,967	p=0,989	p=1,000	
KT-K $\bar{x}=146,68$	p=0,12	p=0,089	p=0,019	p=0,016	p=0,000	p=0,002	p=0,001	p=0,001	p=0,028	p=0,001	p=0,002	P=0,005	p=0,463	p=0,248

#### 4. 5. 12 Statistische Auswertung des Anteils an Lufteinschlüssen in Material- und Schnitthöhenabhängigkeit

Die Untersuchungsgruppen in Material- und Schnitthöhenabhängigkeit wiesen bezüglich des Anteils an Lufteinschlüssen signifikante Unterschiede auf. So zeigte die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung auf koronaler Schnitthöhe einen signifikant höheren Anteil an Lufteinschlüssen als alle anderen Untersuchungsgruppen ( $p \leq 0,05$ ), außer zu der Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung auf intermediärer Schnitthöhe (KT-I), wo kein signifikanter Unterschied bestand ( $p \geq 0,05$ ). Zwischen den verbliebenen Gruppen ließen sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede feststellen ( $p \geq 0,05$ ).

Tab. 21: Statistischer Vergleich des Anteils an Lufteinschlüssen der Gruppen mit unterschiedlichen retrograden Füllungsmaterialien auf unterschiedlichen Schnitthöhen, Tukey's Studentized Range Test

	GU-A $\bar{x}=0,67$	GU-I $\bar{x}=2,45$	GU-K $\bar{x}=1,50$	SE-A $\bar{x}=0,95$	SE-I $\bar{x}=7,45$	SE-K $\bar{x}=7,71$	BI-A $\bar{x}=1,51$	BI-I $\bar{x}=1,30$	BI-K $\bar{x}=1,88$	MT-A $\bar{x}=1,19$	MT-I $\bar{x}=0,26$	MT-K $\bar{x}=0,54$	KT-A $\bar{x}=4,48$	KT-I $\bar{x}=8,32$
GU-I $\bar{x}=2,45$	p= 1,000													
GU-K $\bar{x}=1,50$	p= 1,000	p= 1,000												
SE-A $\bar{x}=0,95$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000											
SE-I $\bar{x}=7,45$	p= 0,757	p= 0,972	p= 0,892	p= 0,564										
SE-K $\bar{x}=7,71$	p= 0,712	p= 0,959	p= 0,862	p= 0,508	p= 1,000									
BI-A $\bar{x}=1,51$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,695	p= 0,640								
BI-I $\bar{x}=1,30$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,642	p= 0,586	p= 1,000							
BI-K $\bar{x}=1,88$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,771	p= 0,720	p= 1,000	p= 1,000						
MT-A $\bar{x}=1,19$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,581	p= 0,524	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000					
MT-I $\bar{x}=0,26$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,350	p= 0,304	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000				
MT-K $\bar{x}=0,54$	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,420	p= 0,369	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000	p= 1,000			
KT-A $\bar{x}=4,48$	p= 0,998	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,995	p= 0,999	p= 0,997	p= 0,999	p= 0,998	p= 1,000	p= 0,997	p= 0,971	p= 0,984		
KT-I $\bar{x}=8,32$	p= 0,569	p= 0,902	p= 0,751	p= 0,342	p= 1,000	p= 1,000	p= 0,464	p= 0,411	p= 0,547	p= 0,351	p= 0,178	p= 0,226	p= 0,985	
KT-K $\bar{x}=17,34$	p= 0,000	p= 0,001	p= 0,000	p= 0,000	p= 0,029	p= 0,043	p= 0,000	p= 0,000	p= 0,000	p= 0,000	p= 0,000	p= 0,000	p= 0,000	p= 0,076

## **5. Diskussion**

Das Abdichtungsvermögen von retrograden Füllungen kann durch Messung ihrer Homogenität und Randständigkeit in in-vitro Studien an extrahierten Zähnen ermittelt werden. In der vorliegenden Studie wurden vier retrograde Füllmaterialien in zwei unterschiedlich präparierten Kavitäten auf drei Schnitthöhen miteinander verglichen.

### **5. 1 Diskussion der Methodik**

#### **5. 1. 1 Auswahl der Zähne**

Für die Durchführung des Experiments wurden 135 humane, extrahierte, einwurzelige Zähne verwendet, die ohne vorangegangene endodontische Behandlung sowie Frakturen waren und neben Karies- und Füllungsfreiheit über ein ausgewachsenes Wurzelwachstum verfügten. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, ist diese Standardisierung sinnvoll, denn präoperative Faktoren, insbesondere die Zahnstellung sowie seine Position im Kiefer, haben im Vergleich zu intraoperativen Faktoren möglicherweise einen stärkeren Einfluss auf den Erfolg von Wurzelspitzenresektionen (Song et al., 2013). Zwar könnten auch tierische Zähne zur Untersuchung von retrograden Füllmaterialien verwendet werden, wie es beispielsweise im Rahmen von in-vivo Studien zu Biokompatibilität und Toxizität geschieht. Jedoch ist die Verwendung humaner Proben sinnvoll, weil die klinischen Methoden zur Aufbereitung und Vorbereitung dieser auf die humane Wurzelkanalanatomie optimiert sind. Bis zum Zeitpunkt der Extraktion waren die Zähne unterschiedlichsten im Mundraum auftretenden, exogenen Faktoren ausgesetzt. Ein Einfluss dieser auf den apikalen Wurzelbereich der Zähne ist nicht vollständig auszuschließen. Da Dentin weiterhin als vitales Gewebe auch nach der Extraktion strukturellen Veränderungen unterliegt, kann ein Einfluss hierdurch auf die vorliegende Untersuchung nicht ausgeschlossen werden (Schroeder, 2000). Die Zähne wurden ab dem Zeitpunkt der Extraktion in steriler, physiologischer Kochsalzlösung bei Raumtemperatur gelagert um eine Austrocknung zu vermeiden. Während manche Autoren davon ausgehen, dass es hierdurch nicht zu einer strukturellen Veränderung des Dentins kommt, sagen anderen, dass sowohl die Aufbewahrungslösungen, als auch die Aufbewahrungszeit den strukturellen Aufbau von Dentin beeinflussen können (Secilmis et al., 2011). Ob der Zeitpunkt der Extraktion und die Lagerungszeit der Zahnproben einen Einfluss auf die Randständigkeit der retrograden Füllmaterialien haben, bleibt deshalb vorerst ungeklärt.

#### **5. 1. 2 Vorbereitung der Proben**

Für die vorliegende Studie erfolgte eine Dekoronierung der Zähne, dadurch konnte ein idealer, einheitlicher, geradliniger Zugang zum Wurzelkanalsystem geschaffen und

somit eine standardisierte Wurzelkanalaufbereitung gewährleistet werden. Die Vorbereitung der Proben diente dazu, den praxisbezogenen Workflow zu simulieren und etwaige daraus resultierende Einflüsse zu übernehmen. Die chemomechanische Aufbereitung erfolgte unter Zuhilfenahme eines maschinellen Systems. Die Verwendung maschineller Aufbereitungssysteme hat im Vergleich zur Handaufbereitung folgende Vorteile: Das Risiko der Entstehung von Zips und Elbows ist signifikant reduziert, es gibt eine signifikant höhere Wahrscheinlichkeit die richtige Arbeitslänge zu erreichen und die Arbeitszeit ist signifikant kürzer. Die Aufbereitung mit Handfeilen hingegen produziert signifikant weniger Frakturen und ist der maschinellen bezüglich Schmierschicht- und Dentinspähneentfernung überlegen (Sonntag et al., 2003; Manjunatha et al., 2013; Reddy et al., 2014). Andere Studien zeigen weiterhin, dass es bei der Rissbildung zwischen der Aufbereitung mit Handfeilen und der mit maschinellen NiTi-Systemen keinen signifikanten Unterschied gibt (Devale et al., 2017). Zur Desinfektion des Wurzelkanalsystems wurde eine 1%-ige Natriumhypochloridlösung verwendet. Natriumhypochloridlösungen sind Kochsalzlösungen bezüglich der antibakteriellen Wirkung signifikant überlegen, jedoch macht die Konzentration (1%; 2,5%; 5,25%) keinen signifikanten Unterschied aus (Siqueira et al., 2000). Die nach der Trocknung der Kanäle vorgenommene Wurzelkanalfüllung wurde im Rahmen der kalten, lateralen Kondensationstechnik in Kombination mit einem Sealer vorgenommen. Diese Goldstandartmethode dient als Vergleichswert gegenüber den retrograden Füllungen, welche idealerweise ein vergleichbares Abdichtungsvermögen und eine ähnliche Homogenität gewährleisten sollten, da die WSR auch eine mögliche Alternative zur Revisionstherapie ist. Die vorliegende Studie legt nahe, dass orthograde Guttaperchafüllungen dieser Methode durchaus gute Ergebnisse in den gemessenen Kategorien aufweisen, gegenüber der retrograden Ketac™ fil Plus Apilicap™ zeigen sie sogar signifikant bessere Ergebnisse bezüglich des Anteils an Lufteinschlüssen und des maximalen Randspaltes. Weiterführende Untersuchungen, insbesondere auch mit anderen Wurzelfüllmethoden sind zu dieser Thematik empfehlenswert. Neben der möglichst exakten Reproduktion des Workflows hat die Wurzelfüllung zusätzlich die Aufgabe, für die später gelegte retrograde Wurzelfüllung als Gegenlager, gegen welches diese adaptiert wird, zu dienen. Auch die Wurzelspitzenresektion wurde möglichst praxisnah durchgeführt. Die Resektion um 3 mm bei 0° Abschrägung folgt den Empfehlungen anderer Studien. So kann bei einer senkrechten Resektionsfläche eine bessere Abdichtung erreicht werden (Gagliani et al., 1998). Eine Resektion um 3 mm bedingt weiterhin die Entfernung von etwa 98% der apikalen Ramifikationen und 93% der lateralen Kanäle, die für den Misserfolg der Wurzelkanalbehandlung verantwortlich sein können und ist deshalb



unabdingbar (von Arx, 2011a; von Arx, 2011b; Soundappan et al., 2014). In der vorliegenden Studie wurde die Präparation der retrograden Kavität mit Schallinstrumenten vorgenommen, da auch unter operativen Bedingungen eine Resektion der Wurzelspitze von 0° in der Regel nur bei gleichzeitiger Verwendung dieses Systems möglich ist (Kim, 2006; Kacarska, 2017). Bezüglich der Induktion von Rissen konnte eine Studie an Körperspendern keinen signifikanten Unterschied zwischen der Ultraschalltechnik und der konventionellen Technik zeigen (Gray et al., 2000). Weiterhin hat die konventionelle Technik zur retrograden Kavitätenpräparation vielzählige Nachteile. Zum einen den intraoperativ erschwerten Zugang zur Wurzelspitze, aber auch das erhöhte Risiko der Lingualperforation, eine insuffiziente Kavitätenpräparation und dadurch insuffiziente Retention des Füllungsmaterials sowie eine vermehrte Freilegung von Dentinkanälchen. Die Präparation der retrograden Kavität mit konventionellen Bohrern wird daher nicht länger empfohlen (von Arx, 2011a). Die auch in dieser Studie angewendeten diamantierten Schallspitzen zeigen im Vergleich zu solchen aus rostfreiem Stahl eine geringere Rissinduktion im Wurzeldentin (Rodríguez-Martos et al., 2012). Studien zur Folge sollte die Tiefe einer retrograden Kavität idealerweise mit der Abschrägung der Resektionsfläche steigen (Gilheany et al., 1994). In der vorliegenden Studie wurde deshalb bei 0° Ansträgung eine retrograde Kavitätentiefe von mindestens drei Millimetern angestrebt, außerdem sollte die Kavität möglichst dem Verlauf des Wurzelkanals folgen. Dieses Design entspricht Empfehlungen anderer Autoren (Torabinejad und Pitt Ford, 1996; von Arx, 2011b).

### **5. 1. 3 Anwendung der retrograden Füllungsmaterialien**

Die retrograden Füllungsmaterialien wurden standardisiert verarbeitet und es wurden die jeweiligen Herstellerangaben berücksichtigt. Da auch im klinischen Alltag intraoperativ nicht bis zum vollständigen Aushärten der retrograden Füllungsmaterialien gewartet werden kann, da dies beispielsweise im Fall von Ketac<sup>TM</sup> fil bis zu 24 Stunden andauert, wird in der Regel nach initialer Härtung der Materialien die Finierung vorgenommen, woraufhin der Verschluss der operativ geschaffenen Knochenkavität mittels einer Naht erfolgt. Die Finierung einer retrograden Füllung kann eine bessere marginale Adaptation dieser bedingen (Gondim et al., 2005). Um einen praxisnahen Workflow zu simulieren wurden die Proben, nach initial erfolgter Härtung des retrograden Füllungsmaterials, für 24 Stunden in steriler Kochsalzlösung gelagert. Die vollständige Aushärtung erfolgte also, wie es in-vivo auch der Fall ist, unter Feuchtigkeitseinfluss. In einer Studie konnte gezeigt werden, dass das Lagerungsmedium, in dem Zähne nach retrograder Füllung für 24 Stunden gelagert

werden, möglicherweise einen Einfluss auf die Mikrohärtigkeit im Vickers-Versuch sowie die Oberflächenmorphologie hat (Kang et al., 2012). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass verschiedene Füllungsmaterialien durch ein gleiches Lagerungsmedium unterschiedlich beeinflusst werden. So zeigte eine retrograde Pro Root™ MTA-Füllung nach einer 24 stündigen Lagerung in Wasser eine im Vergleich zur Trockenlagerung fünffach verringerte Mikrohärtigkeit im Vickers-Versuch, für Super-EBA® zeigte sich hingegen kein signifikanter Unterschied. Ebenso konnte eine stärkere Beeinflussung der Oberflächenmorphologie durch Feuchtlagerung bei Pro Root™ MTA festgestellt werden (Rhim et al., 2012). Inwieweit die vollständige Aushärtung unter Feuchtigkeitseinfluss einen Einfluss auf das Randständigkeitsverhalten von verschiedenen retrograden Füllungsmaterialien hat, kann durch diese Studie nicht beantwortet werden. Auch ob der Einfluss des Lagerungsmediums nur oberflächliche Einflüsse auf die retrograde Füllung hat, oder sie auch in ihrer Tiefe beeinflusst, bleibt ebenfalls unbeantwortet.

#### **5. 1. 4 Probenherstellung**

Die Einbettung von Zähnen zur Gewinnung histologischer Präparate ist ein bekanntes Verfahren. Standardmäßig erfolgt die Einbettung von Geweben in Paraffin. Dieses wird bezüglich Kosten, Handhabbarkeit und Einfärbemöglichkeit als geeignetes Einbettmedium gesehen. Jedoch ist es selbst nicht hart genug um als Einbettmedium für Metalle, unkalzifizierten Knochen oder Zähne zu dienen (Rousselle, 2008). Zahnproben müssten vorerst einen Dekalzifizierungsprozess durchlaufen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass säurehaltige Substanzen die zur Dekalzifizierung dienen, möglicherweise die histologische Struktur von Proben verändern, weshalb die Aussagekraft von Studien dieses Verfahrens umstritten ist (Keklikoglu, 2013). Deshalb erfolgte für die vorliegende Studie die Einbettung in Methylmethacrylat (MMA), welche ohne vorangegangene Dekalzifizierung auskommt, jedoch im Vergleich zur konventionellen Technik teurer und komplizierter durchzuführen ist. Ein möglicher Einfluss dieses Herstellungsprozesses auf die Proben, zum Beispiel durch die Lagerung der Proben in der aufsteigenden Alkoholreihe sowie in Roticlear® und den MMA-Lösungen, kann nicht ausgeschlossen werden. Durch die Standardisierung des Verfahrens sollten jedoch etwaige Einflüsse vernachlässigbar sein. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass dieses Verfahren grundsätzlich zur Einbettung von Zähnen geeignet ist und in Kombination mit der Trenn-Dünnschlifftechnik Proben, die lichtmikroskopisch untersucht werden können, hergestellt werden können (Donath, 1982; Silva et al., 2011). Im Rahmen der Trenn-Dünnschlifftechnik gehen bei jedem Säge- und Schleifvorgang Teile einer jeden Probe unwiederbringlich verloren. Diese

entsprechen mindestens dem durch den Sägevorgang hervorgerufenen sowie dem schleif- und polierbedingten Materialverlust. Um trotzdem eine Vergleichbarkeit unter den Proben zu gewährleisten und um jede einzelne retrograde Füllung in mehreren Ebenen beurteilen zu können, wurden in der vorliegenden Studie drei eindeutig definierte Bereiche der Füllungen zur Untersuchung herangezogen. Die gewählten Bereiche apikal, in der Mitte und koronal, jeweils auf den Höhen 1 mm, 2 mm und 3 mm der retrograden Füllung ermöglichen hierbei die qualitative Untersuchung der zirkulären Adaptationsfähigkeit sowie Homogenität auf verschiedenen Ebenen.

### **5. 1. 5 Analyse**

In dieser Studie wurde das Randständigkeitsverhalten verschiedener retrograder Füllungsmaterialien an die Dentinwand in unterschiedlichen retrograden Kavitäten sowie die Homogenität dieser lichtmikroskopisch analysiert. Die in-vitro Untersuchung der Randständigkeit von retrograden Füllungsmaterialien ist sinnvoll zur Qualitätsuntersuchung dieser, da davon auszugehen ist, dass das Abdichtungsverhalten indirekt mit der Randständigkeit korreliert (Soundappan et al., 2014). Zur in-vitro Untersuchung von retrograden Füllungsmaterialien wurden bisher zahlreiche Verfahren angewendet. So gibt es beispielsweise Untersuchungen mittels des *fluid-filtration* Modells (de Vasconcelos et al., 2011; Shetty et al., 2017), aktive und passive Farbstoffpenetrationstests (Vertucci und Beatty, 1986; Torabinejad et al., 1993), Radioisotopenpenetrationstests (Tronstad et al., 1983; Szeremeta-Browar et al., 1985), Bakterienpenetrationstest (Wong et al., 1994; Yildirim et al., 2010), Glukosepenetrationstests, Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (Stabholz et al., 1985; Wuchenich et al., 1994) und lichtmikroskopische Untersuchungen (Wallace, 2006). Klinische in-vivo Studien eignen sich kaum zur Untersuchung der Randständigkeit von retrograden Füllungen, eine Untersuchung erfordert in der Regel die vorherige Extraktion der Zähne. In-vivo Untersuchungen werden daher meist zur Untersuchung der klinischen Erfolgsraten unterschiedlicher retrograder Füllungsmaterialien sowie deren Biokompatibilität herangezogen (Waikakul und Punwutikorn, 1991; Skoner et al., 1996; Otani et al., 2011; Wälivaara et al., 2012; Villa-Machado et al., 2013). Bei Penetrationstests kann die Quantifizierung verschiedener Stoffe entweder durch Anfertigung von Quer- oder Längsschnitten mit anschließender Messung der Penetrationstiefe geschehen oder durch Spektralphotometrie nach Auflösen der Zähne durch Säuren. Letztere lässt keine Rückschlüsse auf die Penetrationstiefe zu, kann jedoch eine Aussage über die Menge des penetrierten Stoffes treffen. Im Gegensatz dazu kann das erstgenannte Verfahren keine Aussage über die Menge des penetrierten Stoffes machen, jedoch über die Tiefe der

Penetration. Ebenso ist es fraglich, in wie weit das Eindringen von verschiedenen Stoffen oder Lösungen mit der tatsächlichen Penetration von Bakterien oder deren Toxinen verglichen werden kann. So beurteilen Bakterienpenetrationstest zwar das Eindringen von Bakterien, nicht aber das derer Toxine, wohl aber können in-vivo auch diese periapikale Entzündungen initiieren und unterhalten (Torabinejad et al., 1993). Auch zwischen den verwendeten Penetrationsstoffen gibt es Unterschiede, so ist eine Untersuchung des Abdichtungsvermögens mithilfe der Penetration radioaktiver Isotope ungenauer als die mit Farbstofflösungen. Weil sowohl Farbstoffpartikel als auch Radioisotope kleiner als Bakterien sind, wird die Aussagekraft solcher Studien angezweifelt, eine Vergleichbarkeit zur klinischen Relevanz ist eingeschränkt (Matloff et al., 1982; Torabinejad et al., 1995). Wegen der genannten Nachteile wurde in der vorliegenden Studie die Untersuchung des Adaptationsverhaltens verschiedener retrograder Füllungsmaterialien mittels Lichtmikroskopie vorgenommen. Die hierzu nötige Anfertigung von Schnitten hingegen lässt eine Auswertung der marginalen Adaptation, des Randspaltes und der Homogenität auf bestimmten Ebenen zu, kann aber nie die gesamte Grenzfläche zwischen Füllung und Kavität beurteilen. Dieser Nachteil ist so auch bei Untersuchungen mit longitudinaler Schnittführung durch die Proben zu finden. Bei diesem Vorgehen wird nur eine einzige Ebene der Füllung dargestellt und es kann deshalb keine Aussage über die Qualität der retrograden Füllung insgesamt gemacht werden (Chohan et al., 2015). Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Studie gezielt Schnitte auf den klar definierten Höhen 1 mm, 2 mm und 3 mm der retrograden Füllung gemacht, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Als Vorteil ist zu nennen, dass transversales Sektionieren die Beurteilung der gesamten Grenzfläche zwischen Dentin und retrograder Füllung entlang des gesamten Umfangs auf einer Ebene erlaubt (Soundappan et al., 2014). Weil retrograde Füllungen nach apikal kondensiert werden, ist möglicherweise davon auszugehen, dass der apikale Bereich am besten adaptiert ist, die Adaptation im koronalen Bereich hingegen schlechter ist (Stabholz et al., 1985). Das angewandte Design der Studie ermöglicht eine Bewertung dieser Annahme. Trotzdem bleibt die Tatsache, dass nicht die gesamte Grenzfläche zwischen retrograder Füllung und Kavitätenfläche optisch dargestellt werden können, eine Limitation dieser Studie.

## **5. 2 Diskussion der Ergebnisse und Statistik**

In der vorliegenden Studie wurde bei jedem verwendeten Material, bei unterschiedlicher Präparation und auf unterschiedlichen Schnitthöhen eine Randspaltbildung sowie Inhomogenitäten festgestellt. Die 27 Versuchsgruppen repräsentieren alle möglichen Variablen aus verwendetem Material, retrograder

Präparation und Schnitthöhe. Das Poolen unterschiedlicher Versuchsgruppen erlaubt die Untersuchung verschiedener Faktoren, wie beispielsweise den Einfluss der retrograden Kavitätenkonfiguration, des retrograden Füllmaterials sowie der Schnitthöhe auf die Adaptation und Homogenität retrograder Füllungsmaterialien. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser in-vitro Studie auf in-vivo Bedingungen müssen Einschränkungen gemacht werden. Denn sowohl die Vorbereitung der Proben als auch der gesamte Workflow der Wurzelspitzenresektion, der retrograden Aufbereitung und Füllungslegung fand unter idealisierten Bedingungen statt. Im klinischen Alltag können diese optimalen Bedingungen oft nur schwer realisiert werden. Als Limitationen sind eine unzureichende Trockenlegung, ein erschwerter Zugang zum Operationsgebiet und eine verminderte Sicht zu nennen. Dennoch kann durch das standardisierte Verfahren ein Vergleich der Materialien untereinander ermöglicht werden.

### **5. 2. 1 Einfluss des Materials auf die Randständigkeit und Homogenität von retrograden Füllungen**

In Studien konnte gezeigt werden, dass die Wahl des retrograden Füllungsmaterials einen entscheidenden Einfluss auf das Abdichtungsvermögen haben kann (Villa-Machado et al., 2013). In der vorliegenden Studie zeigten alle Füllungsmaterialien das Vorhandensein von imperfektem Rand und Lufteinschlüssen. Den geringsten mittleren Anteil an imperfektem Rand wies dabei die Versuchsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA Füllung auf (MT; 1,66%), ebenso wie den geringsten mittleren maximalen Randspalt (17,40µm) und den geringste Anteil an Lufteinschlüssen (0,67%). Die Überlegenheit retrograder MTA-Füllungen gegenüber anderen retrograden Füllungsmaterialien ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Studien (Torabinejad et al., 1993; Torabinejad et al., 1994; Torabinejad et al., 1995; von Arx T 2011a; Soundappan et al., 2014; Benz et al., 2017). Für die Überlegenheit retrograder MTA Füllungen gibt es verschiedene Erklärungsansätze. Man nimmt an, dass das Abdichtungsvermögen möglicherweise auf die hydrophilen Eigenschaften und die leichte Expansion während des Abbindens in feuchter Umgebung zurückzuführen ist. Im Falle von wMTA beträgt die lineare Expansion nach einer Aushärtephase von 24 Stunden etwa 0,08% (Storm et al., 2008). Zwar ist bislang eine präzise Beschreibung der Abbindereaktion von MTA unter klinischen Bedingungen nicht möglich, jedoch wird angenommen, dass durch die Hydratation des hydrophilen MTA-Pulver die Bildung eines kolloidartigen Gels bedingt wird (Torabinejad et al., 1995, Camilleri et al., 2005). MTA muss also nicht zwingend in trockener Umgebung verarbeitet werden, was als Vorteil angesehen werden kann, denn es muss davon ausgegangen werden, dass Zahngewebe wasserpermeabel sind und jegliche retrograde Restaurationsmaterialien

somit immer auch Feuchtigkeit ausgesetzt sind (Torabinejad et al., 1993; Darvell und Wu, 2011). Auch wird davon ausgegangen, dass die feuchte Umgebung der Schmierschicht, die zwangsläufig bei der Präparation im Dentin entsteht, einen positiven Effekt auf die Adaptation von MTA an die Dentinwand hat (Yildirim et al., 2010). Eine unzureichende intraoperative Trockenlegung sowie eine vollständige Aushärtung unter Feuchtigkeitseinfluss hätten demnach möglicherweise keinen negativen Einfluss auf die Randständigkeit retrograder MTA-Füllungen. Weiterhin zeigen jedoch auch andere in dieser Studie verwendete Materialien gute Ergebnisse in den betrachteten Kategorien. So weist die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA-Füllung (MT) zwar bessere Ergebnisse bezüglich des Adaptationsverhaltens als die der Untersuchungsgruppen mit retrograder Super-EBA® (SE), mit retrograder Biodentine™ Füllung (BI) und mit orthograder Guttaperchafüllung (GU) auf, jedoch sind diese Unterschiede nicht signifikant. Lediglich gegenüber der Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung (KT) lässt sich ein signifikant besseres Adaptationsverhalten feststellen. Gegenüber den anderen Untersuchungsgruppen zeigt die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung einen nicht signifikant höheren Anteil an imperfektem Rand, jedoch einen signifikant höheren mittleren maximalen Randspalt. Dies entspricht weitgehend den Untersuchungen anderer Autoren, die Glasionomerzemente anderen retrograden Füllungsmaterialien bezüglich des Abdichtungsvermögens unterlegen sehen (Gundam et al., 2014; Jain et al., 2016; Shetty et al., 2017). Als mögliche Ursache hierfür ist die erhöhte Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit während der ersten Phase des Aushärtens zu nennen. Das entstehende Pulver-Flüssigkeitsgemisch des Glasionomerzementes härtet zwar innerhalb von 2-3 Minuten in einer Säure-Basen-Reaktion initial ab, vollständig ist die Aushärtung jedoch erst nach bis zu 24 Stunden abgeschlossen (Crisp et al., 1974; Sidhu und Nicholson, 2016). In der vorliegenden Studie wurde die Aushärtung dem klinischen Workflow entsprechend taktile mittels einer zahnärztlichen Sonde validiert, danach erfolgte die Lagerung in steriler Kochsalzlösung. Dies entspricht in-vivo Bedingungen, auch hier ist die Zeit zur initialen Aushärtung des Materials durch die Operationsdauer begrenzt. Es muss folglich davon ausgegangen werden, dass die notwendigen Bedingungen zur idealen Verarbeitung von Glasionomerzementen nicht gegeben sind. Im weiteren Vergleich zeigen sowohl die Untersuchungsgruppen mit retrograder Super-EBA®-Zement Füllung, die mit retrograder Biodentine™-Füllung als auch die Kontrollgruppe mit orthograder Guttaperchafüllung keine signifikanten Unterschiede untereinander, ebenso gibt es zur Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™-MTA Füllung keinen signifikanten Unterschied bezüglich des Adaptationsverhaltens. In der Literatur werden hierzu teils

konträre Ergebnisse dargelegt. So werden einerseits ähnliche Ergebnisse beschrieben (Adamo et al., 1999; Shetty et al., 2017). Auf der anderen Seite wird das Adaptations- und Abdichtungsverhalten von retrograden Füllungen mit sowohl Biodentine™ als auch Super-EBA®-Zement als signifikant schlechter im Vergleich mit retrograden MTA Füllungen beschrieben (Torabinejad et al., 1993; Aqrabawi, 2000; Soundappan et al., 2014). In der vorliegenden Studie ist das Adaptationsverhalten von Biodentine™ nicht signifikant schlechter als jenes von Pro Root™ MTA, im Vergleich zu den anderen Materialien ist lediglich bezüglich des maximalen Randspaltes ein signifikanter Unterschied zu Ketac™ fil Plus Aplicap™ feststellbar. Da Biodentine™ genau wie Pro Root™ MTA auf Tricalciumsilikat basiert, und ebenso feucht aushärtet, ist davon auszugehen, dass eine unvollständige Trockenlegung während der Füllungslegung keinen negativen Einfluss auf die Randständigkeit hat, möglicherweise resultiert hierdurch lediglich eine längere Abbindezeit (Rajasekharan et al., 2018). Als Vorteil gegenüber MTA kann das schnellere Abbinden von Biodentine™ genannt werden, welches auf der Zugabe des Abbindebeschleunigers Calciumchlorid und einem als Wasserreduktionsmittel wirkenden wasserlöslichen Polymer in der Flüssigkeit beruht (Caron et al., 2014, Soundappan et al., 2014). Möglicherweise bedingt das schnellere Abbinden jedoch auch eine schlechtere Handhabbarkeit und Stopfbarkeit des Materials, wodurch möglicherweise das schlechtere Abschneiden gegenüber MTA erklärt werden kann. Die erschwerte Handhabbarkeit wurde bereits in der Literatur beschrieben (Caron et al., 2014). Dennoch bewies Biodentine™ auch in der klinischen Anwendung in einem Fallbeispiel einen positiven Effekt auf den Erfolg der Behandlung einer chronischen periapikalen Läsion (Pawaret al., 2013). In der vorliegenden Studie zeigte auch die Untersuchungsgruppe mit retrograder Super-EBA® Füllung ein gutes Abdichtungsvermögen. So zeigt das Material im Vergleich zu Biodentine™ und Ketac™ fil Plus Aplicap™ einen besseren Randschluss und geringeren maximalen Randspalt, jedoch sind zu keiner der Versuchsgruppen signifikante Unterschiede feststellbar. Das gute Abdichtungsvermögen ist möglicherweise dadurch bedingt, dass Super-EBA®-Zement auch unter feuchten Bedingungen an Zahnstrukturen haftet und eine Kontamination der Kavität laut einer Studie keinen signifikanten Einfluss auf das Abdichtungsvermögen hat (Torabinejad et al., 1994; Bodrumlu, 2008). In der Literatur wird Super-EBA® bezüglich des Abdichtungsvermögens dem von MTA als unterlegen, dem von Amalgam und IRM® als überlegen und gemeinhin zusammen mit MTA als am besten geeignetes retrogrades Füllungsmaterial gesehen. (Bondra et al., 1989; Torabinejad et al., 1993; Schultz et al., 2005; Bodrumlu, 2008). In dieser Studie kann Super-EBA® jedoch nicht an das Abdichtungsvermögen von Pro Root™ MTA heranreichen. Bei der Betrachtung der Homogenität retrograder Füllungsmaterialien

zeichnen sich ebenfalls signifikante Unterschiede ab. So sind die Ergebnisse des Anteils an Luft an der Kavitätenfläche der Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA Füllung (MT) nicht signifikant besser als die der Untersuchungsgruppen mit retrograder Biodentine™ Füllung (BI) oder orthograder Guttaperchafüllung (GU), jedoch signifikant gegenüber den Untersuchungsgruppen mit retrograder Super-EBA® (SE) und Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung (KT). Die Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung (KT) zeigt weiterhin signifikant schlechtere Ergebnisse als alle anderen Untersuchungsgruppen, ausgenommen der Untersuchungsgruppe mit retrograder Super-EBA® (SE) Füllung. Neben den Eigenschaften der verwendeten Materialien haben auch die Art des Anmischens, die Verarbeitung sowie das Vorgehen bei der Füllungslegung einen Einfluss auf das mögliche Auftreten von Inhomogenitäten in Form von Luftblasen. Das automatisierte Anmischen von Füllungsmaterialien bietet den Vorteil, dass immer das herstellerseitig vorgegebene Mischungsverhältnis eingehalten wird und somit immer die gleiche Konsistenz und Verarbeitungszeit gewährleistet wird. Andererseits kann bei der manuellen Anmischung die Konsistenz variiert werden, was bei unterschiedlichen Anwendungsindikationen sinnvoll sein kann. Obwohl in der vorliegenden Studie alle Materialien nach Herstellerangaben verarbeitet wurden ohne die vorgeschriebenen Mischungsverhältnisse zu verändern, kam bei der retrograden Füllung mit Ketac™ fil Plus Aplicap™ (KT) und Biodentine™ (BI) ein maschinelles Anmischsystem zur Anwendung. Ein möglicherweise verbessertes Abdichtungsvermögen retrograder Füllungen bei maschineller Verarbeitung gegenüber der manuellen konnte bereits in einer Studie gezeigt werden, ein daraus resultierender Einfluss auf die Ergebnisse ist also möglich (Gupta et al., 2015). Da bei der Füllungslegung ein standardisiertes Vorgehen angewendet wurde, ist eine Beeinflussung hierdurch eher unwahrscheinlich. In der Literatur werden zwar auch von anderen Autoren Hohlräume in der retrograden Füllung beschrieben, eine Quantifizierung beispielsweise durch elektronenmikroskopische Messungen erfolgt in der Regel jedoch nur für den maximalen Randspalt und die Fläche des Randspaltes, bisher gibt es keine Studien, die auch den Anteil an in retrograden Füllungen existierenden Luftblasen quantifiziert (Torabinejad et al., 1995; Bohsali et al., 1998; Gundam et al., 2014; Rosa et al. 2014). Da jedoch Inhomogenitäten von klinischer Relevanz sind werden weiterführende Untersuchungen hierzu empfohlen.

### **5.2.2 Einfluss der Präparation auf die Randständigkeit und Homogenität retrograder Füllungsmaterialien**

In beiden Untersuchungsgruppen der verschiedenen retrograden Präparationsart konnte das Vorhandensein von imperfektem Rand und Lufteinschlüssen



nachgewiesen werden, jedoch mit signifikanten Unterschieden. So zeigte die retrograde Präparation mit Unterschnitt einen signifikant geringeren Anteil an imperfektem Rand (U; 2,79%) sowie einen signifikant geringeren Anteil an Luft einschlüssen (U; 3,02%) gegenüber der Untersuchungsgruppe mit paralleler retrograder Präparation. Bezüglich des maximalen Randspaltes zeigte die parallele retrograde Präparation (P; 37,68 µm) im Vergleich zu der mit Unterschnitt präparierten Kavität nicht signifikant bessere Ergebnisse. Auch bei Betrachtung des Einflusses der Präparation auf die Randständigkeit und Homogenität verschiedener Füllungsmaterialien konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden. So zeigte die retrograde Füllung mit Pro Root™ MTA bei paralleler Präparation den geringsten imperfekten Randanteil (MT-P: 1,37%), dieser war gegenüber den Untersuchungsgruppen mit Ketac™ fil Plus Aplicap™ und paralleler Präparation (KT-P) und Biodentine™ und paralleler Präparation (BI-P) signifikant. Bei Präparation mit Unterschnitt hingegen zeigte die retrograde Biodentine™ Füllung den geringsten imperfekten Randanteil (BI-U: 1,68%), wobei dieser signifikant geringer war als der der Gruppen mit retrograder Biodentine™ Füllung und paralleler Präparation (BI-P) und der mit Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung und paralleler Präparation (KT-P). Zur Kontrollgruppe mit orthograde Guttaperchafüllung ließen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Auch bei Betrachtung des maximalen Randspaltes ließen sich signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen feststellen. So zeigte die retrograde Füllung mit Biodentine™ bei retrograder Präparation mit Unterschnitt den geringsten mittleren maximalen Randspalt (BI-U: 9,71 µm), dieser war signifikant geringer als die Ergebnisse der Gruppen mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung bei beiden Präparationsarten (KT-P; KT-U). Bei Betrachtung der Untersuchungsgruppen mit paralleler retrograder Präparation zeigte wiederum die retrograde Füllung mit Pro Root™ MTA (MT-P: 10,12 µm) den geringsten mittleren maximalen Randspalt. Dieser war ebenfalls im Vergleich zu den Untersuchungsgruppen mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung bei beiden Präparationsarten (KT-P; KT-U) signifikant geringer. Ebenso zeigten die Untersuchungsgruppen mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung bei beiden Präparationsarten (KT-P; KT-U) eine signifikant höhere mittlere maximale Randspaltbildung als die Kontrollgruppe mit orthograde Guttaperchafüllung (GU). Bei Betrachtung des Anteils an Luft an der Kavitätenfläche zeigte die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA Füllung bei paralleler Präparation die geringsten Anteile (MT-P: 0,31%), die Ergebnisse waren signifikant geringer als die der Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung bei paralleler Präparation (KT-P). Bei retrograder Präparation mit Unterschnitt

zeigte ebenso die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA Füllung den geringsten Anteil an Luft (MT-U: 1,04%). Die mit dieser Untersuchungsmethode ermittelten Werte lassen sich nur bedingt mit Ergebnissen anderer Studien vergleichen, da in der Literatur hierzu bisher keine ähnlichen Untersuchungen existieren. Die überlegenen Ergebnisse der Versuchsgruppe der mit Unterschnitt präparierten retrograden Kavität bezüglich des Anteils an imperfektem Rand und der Homogenität sind möglicherweise auf einen größeren Kavitätendurchschnitt zurückzuführen. Dieser entsteht möglicherweise durch den Versuch der Präparation eines Unterschnittes mittels Lateralbewegungen der Schallspitze. Durch den daraus resultierenden größeren Kavitätendurchmesser könnte folglich das Einbringen sowie die Adaptation des Füllungsmaterials in die retrograde Kavität erleichtert werden. Warum jedoch als einziger Parameter der mittlere maximale Randspalt der retrograden Kavitäten mit Unterschnitt gegenüber dem der parallel präparierten retrograden Kavitäten nicht überlegen ist, bleibt unklar und sollte daher Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein. Trotz der guten Resultate der Untersuchungsgruppe mit Kavität mit Unterschnitt bleibt als Folge des Vorgehens, welches möglicherweise mit in lateraler Dimension erhöhtem Zahnhartsubstanzabtrag einhergeht, ein zunehmend dünnerer zirkulärer Dentinwall, welcher laut Studien ein erhöhtes Risiko der Rissbildung birgt und somit als möglicher Nachteil zu nennen ist (Abedi et al., 1995; Wallace, 2006). Durch die vorliegende Studie kann außerdem gezeigt werden, dass die Präparation eines Unterschnittes bei retrograden Kavitäten keinen negativen Einfluss auf die Adaptation eines retrograden Füllungsmaterials hat, der Bereich mit Unterschnitt erschwert nicht das Einbringen des Füllungsmaterials und folglich nicht die Qualität der retrograden Füllung. In einer Studie wurde durch einen Farbstoffpenetrationstest bestätigt, dass das Kavitätendesign grundsätzlich einen Einfluss auf die Dichtigkeit retrograder Füllungen, in diesem Fall Amalgam, hat. Hier zeigte sich eine trichterförmige retrograde Präparation der klassischen Klasse-I-Kavitätenpräparation überlegen, beide zeigten gegenüber einer Slot-Kavität signifikant bessere Ergebnisse (Agarawal et al., 2013). Eine Studie, die zwar unterschiedliche Arten der Kavitätenpräparation, nicht jedoch unterschiedliche Kavitätendesigns miteinander vergleicht, konnte keinen signifikanten Unterschied aufzeigen (Mandava et al., 2015). In der Literatur finden sich keine Untersuchungen zum Einfluss des Designs retrograder Kavitäten, die mittels Schallspitzen präpariert wurden, auf das Adaptationsverhalten und die Homogenität retrograder Füllungsmaterialien, weshalb hier eine weiterführende Untersuchung empfohlen wird. Durch die vorliegende Studie kann jedoch gezeigt werden, dass keine allgemeine Aussage über die Randständigkeit und Homogenität retrograder Füllungsmaterialien getroffen werden kann, sondern dass

auch die Kavitätenkonfiguration einen signifikanten Einfluss haben kann und daher bestimmte Füllungsmaterialien nur bei bestimmter Präparation verwendet werden sollten. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie legen nahe, dass retrograde Pro Root™ MTA Füllungen von der Art der Präparation unabhängig gute Ergebnisse liefern, eine erhöhte Abhängigkeit von der retrograden Präparation zeigen hingegen die Füllungsmaterialien Super-EBA® und Biodentine™, ebenso wie Ketac™ fil Plus Aplicap™.

### **5. 2. 3 Einfluss der Kavitätestiefe auf die Randständigkeit und Homogenität retrograder Füllungsmaterialien**

Bei Betrachtung des Einflusses der Kavitätestiefe ließen sich signifikante Unterschiede innerhalb der Versuchsgruppen mit gleichem Füllungsmaterial sowie zwischen den Materialien feststellen. Den geringsten Anteil an imperfektem Rand zeigte die Untersuchungsgruppe mit retrograder Super-EBA®-Füllung auf koronaler Schnitthöhe (SE-K: 1,14%), signifikante Unterschiede waren gegenüber der Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ (KT-K) feststellbar. Bezüglich des maximalen Randspaltes zeigte die Untersuchungsgruppe mit retrograder Super-EBA® Füllung auf intermediärer Schnitthöhe das beste Ergebnis (SE-I: 8,16 µm), dieses war signifikant geringer als das der Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung auf koronaler Schnitthöhe (KT-K). Den geringsten Anteil an Lufteinschlüssen zeigte die Untersuchungsgruppe mit retrograder Pro Root™ MTA Füllung auf intermediärer Schnitthöhe (MT-I: 0,26%), auch hier war eine Signifikanz zur Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung auf koronaler Schnitthöhe (KT-K) feststellbar. Die Untersuchung retrograder Füllungen auf unterschiedlichen Ebenen ist sinnvoll, da die alleinige Betrachtung der Adaptation im apikalen Bereich nicht indikativ für den koronalen Bereich ist (Stabholz et al., 1985). Diese Annahme kann durch die vorliegende Studie bestätigt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungsgruppen auf koronaler Schnitthöhe ermöglichen eine Beurteilung der Qualität retrograder Füllungen in der Tiefe der Kavität. Beeinflussende Faktoren hierfür können die Stopfbarkeit des Füllungsmaterials sowie die Größe der Kavität sein. Durch standardisierte Kavitäten und Verarbeitung der Materialien nach Herstellerangaben sollen in der vorliegenden Studie mögliche Fehlerquellen ausgeschlossen werden. Trotzdem zeigten die Materialien signifikant unterschiedliche Ergebnisse. So zeigt die Untersuchungsgruppe mit Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung auf koronaler Schnitthöhe (KT-K) signifikant schlechtere Ergebnisse bezüglich des Anteils an Luft sowie dem maximalen Randspalt gegenüber allen anderen Untersuchungsgruppen auf koronaler Schnitthöhe. Bei der Untersuchung des Anteils an imperfektem Rand schneidet Ketac™ fil Plus Aplicap™ signifikant schlechter ab als

alle anderen Materialien, ausgenommen Biodentine™. Zwischen allen weiteren Materialien finden sich auf koronaler Schnitthöhe keine signifikanten Unterschiede. Das beste Ergebnis bezüglich des Anteils an imperfektem Rand zeigt die Untersuchungsgruppe mit retrograder Super-EBA® Füllung (SE-K: 1,14%), bezüglich des maximalen Randspaltes die Untersuchungsgruppe mit orthograder Guttaperchafüllung (GU-K: 13,10µm) und bezüglich des Anteils an Luft die Untersuchungsgruppe mit Pro Root™ MTA Füllung (MT-K: 0,54%). Das vergleichsweise schlechte Abschneiden von Biodentine™ auf koronaler Schnitthöhe kann möglicherweise mit der von Caron beschriebenen, relativ schlechten Verarbeitbarkeit, welche die Stopfbarkeit negativ beeinflussen würde, interpretiert werden (Caron et al., 2014). Die eingeschränkte Verarbeitbarkeit des Materials ist möglicherweise auf das zugunsten des Pulvers verschobene Mischungsverhältnis zurückzuführen, welches durch die der Flüssigkeit beigefügten wasserlöslichen Polymere ermöglicht wird (Grech et al. 2013). Weiterhin ist durch das der Flüssigkeit beigefügte Calciumchlorid, welches als Accelerator wirkt, eine schnellere Aushärtung des Materials bedingt, da diese jedoch mit 12 Minuten angegeben wird, ist wahrscheinlich nicht von einer Einschränkung im Rahmen der Füllungslegung auszugehen (Mandava et al., 2015; Rajasekharan et al., 2018). Als mögliche Erklärung für das schlechte Abschneiden der Untersuchungsgruppe mit retrograder Ketac™ fil Plus Aplicap™ Füllung, trotz der Tatsache das dieses Material chemisch an Dentin haftet, kann wiederum dessen Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit in der ersten Phase des Aushärtens genannt werden (Vasudev et al., 2003). Die Beeinflussung durch Feuchtigkeit bedingt durch wasserpermeable Zahnhartsubstanzen findet entlang des gesamten Bereiches hin zu der retrograden Kavität statt und sollte daher überall den gleichen negativen Einfluss haben. Dennoch nimmt die Qualität der retrograden Füllung mit Ketac™ fil Plus Aplicap™ von apikal nach koronal ab. Möglicherweise ist dies mit der innerhalb von 2-3 Minuten relativ raschen initiale Aushärtung, die möglicherweise die Stopfbarkeit des Materials beeinträchtigt, erklärbar (Sidhu und Nicholson, 2016). Die im Vergleich zu anderen retrograden Füllmaterialien schlechte Randständigkeit von Ketac™ fil Plus Aplicap™, von der auszugehen ist, dass sie indirekt das Abdichtungsvermögen beeinflusst, ist in Übereinstimmung mit Dichtigkeitsuntersuchungen anderer Autoren (Jain et al., 2016; Shetty S, Hiremath G, Yeli, 2017). Ein möglicher Nachteil der Untersuchung des apikalen Bereiches ist es, dass dieser dem Lagerungsmedien ausgesetzt ist (Stabholz et al., 1985). Da jedoch angenommen werden muss, dass auch in-vivo eine Beeinflussung des apikalen Bereiches der retrograden Füllung nach deren Legung durch Gewebeflüssigkeiten und Blut stattfindet, ist eine Untersuchung zweckmäßig. Andere Studien zur marginalen

Adaptation im apikalen Bereich, die jedoch andere Methodiken verwendeten, konnten keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Adaptation verschiedener Füllungsmaterialien feststellen. So untersuchten Oliveira et al. die marginale Adaptation von Pro Root™ MTA, IRM®, Amalgam, Super-EBA® und Resilon oberflächlich mittels eines Rasterelektronenmikroskopes, dabei konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden (Oliveira et al., 2013). Ebenfalls in einer Rasterelektronenmikroskopischen Studie, die sich jedoch auch in der Methodik zur vorliegenden Studie unterscheidet, zeigten Soundappan et al., dass zwischen MTA und Biodentine™ auf 1mm Höhe vom Apex kein signifikanter Unterschied bezüglich des Adaptationsverhaltens herrscht, auf 2 mm Höhe jedoch MTA gegenüber Biodentine™ signifikant bessere abdichtet (Soundappan et al., 2014). Diese Erkenntnisse entsprechen nur teilweise den Ergebnissen der vorliegenden Studie, hier konnte in allen getesteten Kategorien auf allen Schnitthöhen kein signifikanter Unterschied zwischen beiden genannten Materialien festgestellt werden, obwohl Biodentine™ die schlechteren Ergebnisse zeigte. Möglicherweise ist dies durch die erhöhte Löslichkeit von Biodentine im Vergleich zu MTA, die auf den Anteil an wasserlöslichem Polycarboxylat in der Flüssigkeit zurückgeführt wird, bedingt. (Rajasekharan et al. 2018).

## 6. Zusammenfassung

Ziel der Untersuchung war es, von verschiedenen retrograden Füllungsmaterialien (Super-EBA<sup>®</sup>, Biodentine<sup>™</sup>, Pro Root<sup>™</sup> MTA, Ketac<sup>™</sup> fil Plus Aplicap<sup>™</sup>) in verschiedenen konfigurierten retrograden Kavitäten (parallel und mit Unterschnitt) auf unterschiedlichen Schnitthöhen der retrograden Kavität (apikal, in der Mitte, koronal) das Adaptationsverhalten sowie die Homogenität zu ermitteln und anschließend miteinander zu vergleichen.

Die Untersuchung erfolgte an 135 menschlichen, einwurzigen und einkanaligen Zähnen. Die Lagerung der kariesfreien Zähne erfolgte nach der Extraktion in physiologischer Kochsalzlösung. Alle Versuchszähne wurden auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze von ihrer Krone getrennt, danach wurde der Wurzelkanal dargestellt. Es erfolgte eine dem klinischen Workflow entsprechende endodontische Therapie, anschließend wurde die Wurzelspitze um 3 mm reduziert. Die retrograde Präparation erfolgte mittels zweier unterschiedlicher Schallspitzen, woraus unterschiedliche retrograde Kavitäten resultieren (parallel, mit Unterschnitt). Die retrograde Präparation erfolgte drucklos und dem Verlauf des Wurzelkanalsystems folgend mindestens 3mm tief. Anschließend erfolgte die standardisierte retrograde Füllungslegung. Abschließend wurden die Proben histologisch aufbereitet und auf jeweils 1mm, 2mm und 3mm Höhe der retrograden Füllung getrennt, auf Objektträger geklebt und nach erfolgtem Schliff und Politur lichtmikroskopisch untersucht. Die Gruppen 1, 2 und 3 stellten die Vergleichsgruppen dar, wobei hier eine orthograde Guttaperchafüllung evaluiert wurde. Die Gruppen setzten sich wie folgt zusammen: Gruppe 1: orthograde Guttaperchafüllung, apikaler Schnitt (GU-A1), Gruppe 2: orthograde Guttaperchafüllung, intermediärer Schnitt (GU-I1), Gruppe 3: orthograde Guttaperchafüllung, koronaler Schnitt, Gruppe 4: retrograde Super-EBA<sup>®</sup>-Füllung mit paralleler Präparation und apikaler Schnitfführung (SE-A1), Gruppe 5: retrograde Super-EBA<sup>®</sup>-Füllung mit paralleler Präparation und intermediärer Schnitfführung (SE-I1), Gruppe 6: retrograde Super-EBA<sup>®</sup>-Füllung mit paralleler Präparation und koronaler Schnitfführung (SE-K1), Gruppe 7: retrograde Super-EBA<sup>®</sup>-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und apikaler Schnitfführung (SE-A2), Gruppe 8: retrograde Super-EBA<sup>®</sup>-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und intermediärer Schnitfführung (SE-I2), Gruppe 9: retrograde Super-EBA<sup>®</sup>-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und koronaler Schnitfführung (SE-K2), Gruppe 10: retrograde Biodentine<sup>™</sup>-Füllung mit paralleler Präparation und apikaler Schnitfführung (BI-A1), Gruppe 11: retrograde Biodentine<sup>™</sup>-Füllung mit paralleler Präparation und intermediärer Schnitfführung (BI-I1), Gruppe 12: retrograde Biodentine<sup>™</sup>-Füllung mit paralleler Präparation und

koronaler Schnittführung (BI-K1), Gruppe 13: retrograde Biodentine™-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und apikaler Schnittführung (BI-A2), Gruppe 14: retrograde Biodentine™-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und intermediärer Schnittführung (BI-I2), Gruppe 15: retrograde Biodentine™-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und koronaler Schnittführung (BI-K2), Gruppe 16: retrograde Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung mit paralleler Präparation und apikaler Schnittführung (KT-A1), Gruppe 17: retrograde Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung mit paralleler Präparation und intermediärer Schnittführung (KT-I1), Gruppe 18: retrograde Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung mit paralleler Präparation und koronaler Schnittführung (KT-K1), Gruppe 19: retrograde Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und apikaler Schnittführung (KT-A2), Gruppe 20: retrograde Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und intermediärer Schnittführung (KT-I2), Gruppe 21: retrograde Ketac™ fil Plus Aplicap™-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und koronaler Schnittführung (KT-K2), Gruppe 22: retrograde Pro Root™ MTA-Füllung mit paralleler Präparation und apikaler Schnittführung (MT-A1), Gruppe 23: retrograde Pro Root™ MTA Füllung mit paralleler Präparation und intermediärer Schnittführung (MT-I1), Gruppe 24: retrograde Pro Root™ MTA-Füllung mit paralleler Präparation und koronaler Schnittführung (MT-K1); Gruppe 25: retrograde Pro Root™ MTA-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und apikaler Schnittführung (MT-A2), Gruppe 26: retrograde Pro Root™ MTA-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und intermediärer Schnittführung (MT-I2) und Gruppe 27: retrograde Pro Root™ MTA-Füllung mit Präparation mit Unterschnitt und koronaler Schnittführung (MT-K2). Mithilfe einer Bildanalysesoftware wurden die Proben daraufhin auf ihren Anteil an imperfektem Rand, den maximalen Randspalt sowie den Anteil an Lufteinschlüssen pro Kavitätenfläche untersucht. Der Einfluss der Präparation hatte einen signifikanten Einfluss auf die Adaptation und die Homogenität der retrograden Füllungsmaterialien. Ebenso hatten die Wahl des Füllungsmaterials sowie die Schnitthöhe einen signifikanten Einfluss auf Adaptation und Homogenität. Weil diese Ergebnisse klinisch relevant sind, ist eine Verifizierung im Rahmen eines klinischen Settings wünschenswert.

## 7. Literaturverzeichnis

- Abedi H R, van Mierlo B L, Wilder-Smith P, Torabinejad M (1995): Effects of ultrasonic root-end cavity preparation on the root apex. In: *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 80 (2), S. 207–213.
- Adamo H L, Buruiana R, Schertzer L, Boylan R J (1999): A comparison of MTA, Super-EBA, composite and amalgam as root-end filling materials using a bacterial microleakage model. In: *Int Endod J* 32 (3), S. 197–203.
- Agarawal V, Nayak U.S. D, Sharma M, Reddy Y.G., Singla M, Nanda Z (2013): Comparative evaluation of different retrograde cavity designs of amalgam for assessment of micro-leakage by dye penetration method - An in vitro study. In: *Endodontology*, S. 91–99.
- al-Ajam A D, McGregor A J (1993): Comparison of the sealing capabilities of Ketac-silver and extra high copper alloy amalgam when used as retrograde root canal filling. In: *Journal of endodontics* 19 (7), S. 353–356.
- Aqrabawi J (2000): Sealing ability of amalgam, super EBA cement, and MTA when used as retrograde filling materials. In: *Br Dent J* 188 (05), S. 266–268.
- Baek S-H, Lee W C, Setzer F C, Kim S (2010): Periapical bone regeneration after endodontic microsurgery with three different root-end filling materials. Amalgam, SuperEBA, and mineral trioxide aggregate (Abstract). In: *Journal of endodontics* 36 (8), S. 1323–1325.
- Barkhordar R A, Pelzner R B, Stark M M (1989): Use of glass ionomers as retrofilling materials. In: *Oral surgery, oral medicine, and oral pathology* 67 (6), S. 734–739.
- Benz K, Markovic L, Jordan R A, Novacek C, Jackowski J (2017): In vitro evaluation of the apical seal of two different retrograde filling materials. In: *Australian endodontic journal : the journal of the Australian Society of Endodontology Inc* 43 (1), S. 29–33.
- Bodrumlu E (2008): Biocompatibility of retrograde root filling materials. A review. In: *Australian endodontic journal : the journal of the Australian Society of Endodontology Inc* 34 (1), S. 30–35.
- Bohsali K, Pertot W-J, Hosseini B, Camps J (1998): Sealing ability of super EBA and Dyract as rootend fillings: a study in vitro. In: *International Endodontic Journal* 31 (5), S. 338–342.
- Bondra D L, Hartwell G R, MacPherson M G, Portell F R (1989): Leakage in vitro with IRM, high copper amalgam, and EBA cement as retrofilling materials. In: *Journal of endodontics* 15 (4), S. 157–160.
- Câmara A C, de Albuquerque M M, Aguiar C M, de Barros Correia A C R (2009): In vitro antimicrobial activity of 0.5%, 1%, and 2.5% sodium hypochlorite in root canals instrumented with the ProTaper Universal system. In: *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 108 (2), S. 55-61.
- Camilleri J, Montesin F E, Brady K, Sweeney R, Curtis R V, Ford T R P (2005): The constitution of mineral trioxide aggregate. In: *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials* 21 (4), S. 297–303.
- Caron G, Azérad J, Faure, M O, Machtou P, Boucher Y (2014): Use of a new retrograde filling material (Biodentine) for endodontic surgery. Two case reports. In: *International journal of oral science* 6 (4), S. 250–253.
- Carr G B (1992): Microscopes in endodontics. In: *Journal of the California Dental Association* 20 (11), S. 55–61.



- Chailertvanitkul P, Saunders W P, Saunders E M, MacKenzie D (1998): Polymicrobial coronal leakage of super EBA root-end fillings following two methods of root-end preparation. In: *Int Endod J* 31 (5), S. 348–353.
- Chohan H, Dewan H, Annapoorna B M, Manjunath M K (2015): Comparative evaluation of sealing ability of glass ionomer-resin continuum as root-end filling: materials. An in vitro study. In: *Journal of International Society of Preventive & Community Dentistry* 5 (6), S. 488–493.
- Chong B S, Owadally I D, Pitt Ford T R, Wilson R F (1994): Cytotoxicity of potential retrograde root-filling materials. In: *Dent Traumatol* 10 (3), S. 129–133.
- Chong B S, Pitt Ford T R, Hudson M B (2003): A prospective clinical study of Mineral Trioxide Aggregate and IRM when used as root-end filling materials in endodontic surgery. In: *Int Endod J* 36 (8), S. 520–526.
- Christiansen R, Kirkevang L-L, Hørsted-Bindslev P, Wenzel A (2009): Randomized clinical trial of root-end resection followed by root-end filling with mineral trioxide aggregate or smoothing of the orthograde gutta-percha root filling--1-year follow-up. In: *International Endodontic Journal* 42 (2), S. 105–114.
- Crisp S, Pringuer M A, Wardleworth D, Wilson A D (1974): Reactions in glass ionomer cements. II. An infrared spectroscopic study. In: *Journal of dental research* 53 (6), S. 1414–1419.
- Croitoru I C, CrăiȚoiu Ș, Petcu C M, Mihăilescu O A, Pascu R M, Bobic A G, Agop Forna D, CrăiȚoiu M M (2016): Clinical, imagistic and histopathological study of chronic apical periodontitis. In: *Romanian journal of morphology and embryology = Revue roumaine de morphologie et embryologie* 57 (2 Suppl), S. 719–728.
- Darvell B W, Wu R C T (2011): "MTA"-an Hydraulic Silicate Cement. Review update and setting reaction. In: *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials* 27 (5), S. 407–422.
- de Vasconcelos B C, Bernardes R A, Duarte M A H, Bramante C M, de Moraes I G (2011): Apical sealing of root canal fillings performed with five different endodontic sealers. Analysis by fluid filtration. In: *J. Appl. Oral Sci.* 19 (4), S. 324–328.
- Devale M R, Mahesh M C, Bhandary S (2017): Effect of Instrumentation Length and Instrumentation Systems. Hand Versus Rotary Files on Apical Crack Formation - An In vitro Study. In: *Journal of clinical and diagnostic research : JCDR* 11 (1), S. 15-18.
- Donath K, Breuner G. (1982): A method for the study of undecalcified bones and teeth with attached soft tissues. The Säge-Schliff (sawing and grinding) technique. In: *Journal of oral pathology* 11 (4), S. 318–326.
- Dorn S O, Gartner A H (1990): Retrograde filling materials. A retrospective success-failure study of amalgam, EBA, and IRM. In: *Journal of endodontics* 16 (8), S. 391–393.
- Farrar J N (1884): Radical and Heroic Treatment of Alveolar Abscess by Amputation of Roots of Teeth, With Description and Application of the Cantalever Crown 26 (3), S. 135–139.
- Ferris D M, Baumgartner J C (2004): Perforation repair comparing two types of mineral trioxide aggregate (Abstract). In: *Journal of endodontics* 30 (6), S. 422–424.
- Fong C D (1993): A sonic instrument for retrograde preparation. In: *Journal of endodontics* 19 (7), S. 374–375.

- Gagliani M, Taschieri S, Molinari R (1998): Ultrasonic root-end preparation. Influence of cutting angle on the apical seal (Abstract). In: *Journal of endodontics* 24 (11), S. 726–730.
- Garip H, Garip Y, Oruçoğlu H, Hatipoğlu S (2011): Effect of the angle of apical resection on apical leakage, measured with a computerized fluid filtration device. In: *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 111 (3), S. 50-55.
- Gilheany P A, Figdor D, Tyas M J (1994): Apical dentin permeability and microleakage associated with root end resection and retrograde filling. In: *Journal of endodontics* 20 (1), S. 22–26.
- Gondim, E.; Kim, S.; Souza-Filho, F. J. de (2005): An investigation of microleakage from root-end fillings in ultrasonic retrograde cavities with or without finishing. A quantitative analysis. In: *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 99 (6), S. 755–760.
- Gondim E, de Gomes B P, Ferraz C C, Teixeira F B, Souza-Filho F J (2002): Effect of sonic and ultrasonic retrograde cavity preparation on the integrity of root apices of freshly extracted human teeth. Scanning electron microscopy analysis (Abstract). In: *Journal of endodontics* 28 (9), S. 646–650.
- Gray G J, Hatton J F, Holtzmann D J, Jenkins D B, Nielsen C J (2000): Quality of root-end preparations using ultrasonic and rotary instrumentation in cadavers (Abstract). In: *Journal of endodontics* 26 (5), S. 281–283.
- Grech, L.; Mallia, B.; Camilleri, J. (2013): Investigation of the physical properties of tricalcium silicate cement-based root-end filling materials. In: *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials* 29 (2), S. 20-28.
- Gundam S, Patil J, Venigalla B S, Yadanaparti S, Maddu R, Gurram S R (2014): Comparison of marginal adaptation of mineral trioxide aggregate, glass ionomer cement and intermediate restorative material as root-end filling materials, using scanning electron microscope. An in vitro study. In: *Journal of Conservative Dentistry : JCD* 17 (6), S. 566–570.
- Gupta P K, Garg G, Kalita C, Saikia A, Srinivasa T S, Satish G (2015): Evaluation of Sealing Ability of Biodentine as Retrograde Filling Material by Using two Different Manipulation Methods. An In Vitro Study. In: *Journal of international oral health : JIOH* 7 (7), S. 111–114.
- Han L, Okiji T. (2011): Uptake of calcium and silicon released from calcium silicate-based endodontic materials into root canal dentine. In: *International Endodontic Journal* 44 (12), S. 1081–1087.
- Hellwig E, Klimek J, Attin T (2013): Einführung in die Zahnerhaltung. Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie. 6. überarb. Aufl. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag. S. 195-281.
- Hindlekar A, Raghavendra S S (2014): Comparative evaluation of sealing ability of three root-end filling materials - an in vitro study. In: *International Journal of Dental Clinics* 6 (4), S. 4 –7.
- Holt G M, Dumsha T C (2000): Leakage of amalgam, composite, and Super-EBA, compared with a new retrofill material. Bone cement (Abstract). In: *Journal of endodontics* 26 (1), S. 29–31.
- Jain A, Ponnappa K C, Yadav P, Rao Y, Relhan N, Gupta P, Choubey A, Bhardwaj S (2016): Comparison of the Root End Sealing Ability of Four Different Retrograde Filling Materials in Teeth with Root Apices Resected at Different Angles - An Invitro Study. In: *Journal of clinical and diagnostic research : JCDR* 10 (1), S. 14-17.

- Jesslén P, Zetterqvist L, Heimdahl A (1995): Long-term results of amalgam versus glass ionomer cement as apical sealant after apicectomy. In: *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 79 (1), S. 101–103.
- Kacarska M (2017): Clinical Evaluation of Root End Resection Bevel in Periapical Surgery. In: *Prilozi (Makedonska akademija na naukite i umetnostite. Oddelenie za medicinski nauki)* 38 (1), S. 113–118.
- Takehashi S, Stanley H R, Fitzgerald R J (1965): The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. In: *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 20 (3), S. 340–349.
- Kang J S, Rhim E M, Huh S Y, Ahn S J, Kim D S, Kim S Y, Park S H (2012): The effects of humidity and serum on the surface microhardness and morphology of five retrograde filling materials. In: *Scanning* 34 (4), S. 207–214.
- Karlovic Z, Pezelj-Ribaric S, Miletic I, Jukic S, Grgurevic J, Anic I (2005): Erbium:YAG laser versus ultrasonic in preparation of root-end cavities. In: *Journal of endodontics* 31 (11), S. 821–823.
- Karunakaran J V, Abraham C S, Kaneesh Karthik A, Jayaprakash N (2017): Successful Nonsurgical Management of Periapical Lesions of Endodontic Origin. A Conservative Orthograde Approach. In: *Journal of pharmacy & bioallied sciences* 9 (Suppl 1), S. 246-251.
- Kashefinejad M, Harandi A, Eram S, Bijani A (2016): Comparison of Single Visit Post Endodontic Pain Using Mtwo Rotary and Hand K-File Instruments. A Randomized Clinical Trial. In: *Journal of Dentistry (Tehran, Iran)* 13 (1), S. 10–17.
- Keklikoglu N, Akinci S. (2013): Comparison of three different techniques for histological tooth preparation. In: *Folia histochemica et cytobiologica* 51 (4), S. 286–291.
- Kim S, Kratchman S. (2006): Modern endodontic surgery concepts and practice. A review. In: *Journal of endodontics* 32 (7), S. 601–623.
- Kirkevang, L.-L., Ørstavik, D., Hörsted-Bindslev, P., Wenzel, A (2000): Periapical status and quality of root fillings and coronal restorations in a Danish population. In: *Int Endod J* 33, S. 509–515.
- Koçak M M, Koçak S, Aktuna S, Görücü J, Yaman S D (2011): Sealing ability of retrofilling materials following various root-end cavity preparation techniques. In: *Lasers in medical science* 26 (4), S. 427–431.
- Kunkel M, Allroggen S, Appel C, Bargholz C, Biffar R, Boehme P, Engel P, Esser W, Fedderwitz J, Frank M, Georgi M, Heurich T, Kopp I, Kreusser B, Reichert T E, Sanner F, Singer R, Staehle H J, Terheyden H, Wagner W, Wahl G, Weingart D, Werkmeister R, Hülsmann M (2007): Leitlinie Wurzelspitzenresektion. In: *Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie : MKG* 11 (5), S. 251–257.
- Lloyd, A.; Jaunberzins, A.; Dummer, P. M.; Bryant, S. (1996): Root-end cavity preparation using the MicroMega Sonic Retro-prep Tip. SEM analysis (Abstract). In: *Int Endod J* 29 (5), S. 295–301.
- Lloyd A, Gutmann J, Dummer P, Newcombe R (1997): Microleakage of Diaket and amalgam in root-end cavities prepared using MicroMega sonic retro-prep tips. In: *Int Endod J* 30 (3), S. 196–204.
- Lupi-Pegurier, L.; Bertrand, M-F; Muller-Bolla, M.; Rocca, J. P.; Bolla, M. (2002): Periapical status, prevalence and quality of endodontic treatment in an adult French population. In: *Int Endod J* 35 (8), S. 690–697.

- Mandava P, Bolla N, Thumu J, Vemuri S, Chukka S (2015): Microleakage evaluation around retrograde filling materials prepared using conventional and ultrasonic techniques. In: *Journal of clinical and diagnostic research : JCDR* 9 (2), S 43-46.
- Manjunatha M, Kini A, Sudhakar V, Sunil K V C, Hiremath V K, Shah A (2013): Smear Layer Evaluation on Root Canal Preparation with Manual and Rotary Techniques using EDTA as an Irrigant. A Scanning Electron Microscopy Study. In: *Journal of international oral health : JIOH* 5 (1), S. 66–78.
- Marczuk-Kolada G, Łuczaj-Cepowicz E, Pawińska M, Hołownia A (2017): Evaluation of the cytotoxicity of selected conventional glass ionomer cements on human gingival fibroblasts. In: *Advances in clinical and experimental medicine : official organ Wrocław Medical University* 26 (7), S. 1041–1045.
- Marxkors R, Meiners H, Geis-Gerstorfer J (Hg.) (2008): *Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde. Vom Defekt zur Restauration.* Univeritätlinikum Tübingen. 6. Aufl. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag. S. 239-243.
- Matloff I R, Jensen J R, Singer L, Tabibi A (1982): A comparison of methods used in root canal sealability studies. In: *Oral surgery, oral medicine, and oral pathology* 53 (2), S. 203–208.
- Meryon S D (1984): The effect of zinc on the biocompatibility of dental amalgams in vitro. In: *Biomaterials* 5 (5), S. 293–297.
- Miles D A, Anderson R W, Pashley D H (1994): Evaluation of the bond strength of dentin bonding agents used to seal resected root apices. In: *Journal of endodontics* 20 (11), S. 538–541.
- Mjör I A, Smith M R, Ferrari M, Mannocci F (2001): The structure of dentine in the apical region of human teeth. In: *International Endodontic Journal* 34 (5), S. 346–353.
- Mohammadi Z (2008): Sodium hypochlorite in endodontics. An update review. In: *International Dental Journal* 58 (6), S. 329–341.
- Nair P N R (1998): New perspectives on radicular cysts. Do they heal? In: *Int Endod J* 31 (3), S. 155–160.
- Nair P N R, Pajarola G, Schroeder H E (1996): Types and incidence of human periapical lesions obtained with extracted teeth. In: *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 81 (1), S. 93–102.
- Oliveira H F, Gonçalves Alencar A H, Poli Figueiredo J A, Guedes O A, de Almeida Decurcio D, Estrella C (2013): Evaluation of marginal adaptation of root-end filling materials using scanning electron microscopy. In: *Iranian endodontic journal* 8 (4), S. 182–186.
- Otani K, Sugaya T, Tomita M, Hasegawa Y, Miyaji H, Tenkumo T, Tanaka S, Motoki Y, Takanawa Y, Kawanami M (2011): Healing of experimental apical periodontitis after apicoectomy using different sealing materials on the resected root end. In: *Dent. Mater. J.* 30 (4), S. 485–492.
- Oynick J, Oynick T. (1978): A study of a new material for retrograde fillings. In: *Journal of endodontics* 4 (7), S. 203–206.
- Ozbas H, Yaltrik M, Bilgic B, Issever H (2003): Reactions of connective tissue to compomers, composite and amalgam root-end filling materials. In: *Int Endod J* 36 (4), S. 281–287.
- Pawar A M, Kokate S R, Shah R A (2013): Management of a large periapical lesion using Biodentine™ as retrograde restoration with eighteen months evident follow up (Case Report). In: *Journal of Conservative Dentistry : JCD* 16 (6), S. 573–575.

- Peters C I, Peters O A, Barbakow F (2001): An in vitro study comparing root-end cavities prepared by diamond-coated and stainless steel ultrasonic retrotips. In: *Int Endod J* 34 (2), S. 142–148.
- Post L K, Lima F G, Xavier C B, Demarco F F, Gerhardt-Oliveira M (2010): Sealing ability of MTA and amalgam in different root-end preparations and resection bevel angles. An in vitro evaluation using marginal dye leakage. In: *Brazilian dental journal* 21 (5), S. 416–419.
- Rajasekharan, S.; Martens, L. C.; Cauwels, R. G. E. C.; Anthonappa, R. P. (2018): Biodentine™ material characteristics and clinical applications. A 3 year literature review and update. In: *European archives of paediatric dentistry : official journal of the European Academy of Paediatric Dentistry*. S. 1-22.
- Reddy J M, Latha P, Gowda B, Manvikar V, Vijayalaxmi DB, Ponangi KC (2014): Smear layer and debris removal using manual Ni-Ti files compared with rotary Protaper Ni-Ti files. - An In-Vitro SEM study. In: *Journal of international oral health : JIOH* 6 (1), S. 89–94.
- Rhim E M, Huh S Y, Ahn S J, Abbott P V, Kim E C, Park S H (2012): Comparison of the microhardness and morphology of five different retrograde filling materials in aqueous and dry conditions. In: *Scanning* 34 (6), S. 359–366.
- Ricucci D, Pascon E A, Pitt Ford T R, Langeland K (2006): Epithelium and bacteria in periapical lesions. In: *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 101 (2), S. 239–249.
- Rodríguez-Martos R, Torres-Lagares D, Castellanos-Cosano L, Serrera-Figallo, M A, Segura-Egea J J, Gutierrez-Perez, J L (2012): Evaluation of apical preparations performed with ultrasonic diamond and stainless steel tips at different intensities using a scanning electron microscope in endodontic surgery. In: *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal* 17 (6), S.988-993.
- Rosa, R. A.; Santini, M. F.; Heiden, K.; Só, B. B.; Kuga, M. C.; Pereira, J. R.; Só, M. V. R. (2014): SEM evaluation of the interface between filling and root-end filling materials. In: *Scanning* 36 (2), S. 252–257.
- Rousselle S, Wicks J. (2008): Preparation of medical devices for evaluation. In: *Toxicologic pathology* 36 (1), S. 81–84.
- Rud, J.; Munksgaard, E. C.; Andreasen, J. O.; Rud, V.; Asmussen, E. (1991): Retrograde root filling with composite and a dentin-bonding agent. In: *Endodontics & dental traumatology* 7 (3), S. 118–125.
- Saatchi M, Shadmer E, Talebi S M, Nazeri M (2013): A Prospective Clinical Study on Blood Mercury Levels Following Endodontic Root-end Surgery with Amalgam. In: *Iranian endodontic journal* 8 (3), S. 85–88.
- Schroeder H E (2000): *Orale Strukturbiologie. Entwicklungsgeschichte, Struktur und Funktion normaler Hart- und Weichgewebe der Mundhöhle und des Kiefergelenks*. 5., unveränd. Aufl. Stuttgart [u.a.]: Thieme. S. 72-79.
- Schultz C B, Westhauser P, Nideröst B, Klaus W G (2005): Retrograde Obturation mit MTA-Zement und Super-EBA bei der Wurzelspitzenresektion  
Abdichtungsvermögen von MTA und Super-EBA im Farbpenetrationsversuch. In: *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin = Revue mensuelle suisse d'odontostomatologie = Rivista mensile svizzera di odontologia e stomatologia* 115 (5), S. 442–454.

- Schwartz S A, Alexander J B (1988): A comparison of leakage between silver-glass ionomer cement and amalgam retrofillings. In: *Journal of endodontics* 14 (8), S. 385–391.
- Secilmis A, Dilber E, Gokmen F, Ozturk N, Telatar T (2011): Effects of storage solutions on mineral contents of dentin. In: *Journal of Dental Sciences* 6 (4), S. 189–194.
- Selimović-Dragaš M, Huseinbegović A, Kobašlija S, Hatibović-Kofman S (2012): A comparison of the in vitro cytotoxicity of conventional and resin modified glass ionomer cements. In: *Bosnian journal of basic medical sciences* 12 (4), S. 273–278.
- Shetty S, Hiremath G, Yeli M (2017): A comparative evaluation of sealing ability of four root end filling materials using fluid filtration method. An in vitro study. In: *Journal of Conservative Dentistry : JCD* 20 (5), S. 307–310.
- Sidhu S K, Nicholson J W (2016): A Review of Glass-Ionomer Cements for Clinical Dentistry. In: *Journal of functional biomaterials* 7 (3).
- Silva G A B, Moreira A, Alves J B (2011): Histological processing of teeth and periodontal tissues for light microscopy analysis. In: *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)* 689, S. 19–36.
- Simon J H (1980): Incidence of periapical cysts in relation to the root canal. In: *Journal of endodontics* 6 (11), S. 845–848.
- Siqueira, J. F.; Rôças, I. N.; Favieri, A.; Lima, K. C. (2000): Chemomechanical reduction of the bacterial population in the root canal after instrumentation and irrigation with 1%, 2.5%, and 5.25% sodium hypochlorite (Abstract). In: *Journal of endodontics* 26 (6), S. 331–334.
- Siqueira J F, Rôças I N (2008): Clinical implications and microbiology of bacterial persistence after treatment procedures. In: *Journal of endodontics* 34 (11), 1291-1301.
- Skoner J R, Wallace J A, Fochtman F, Moore P A, Zullo T, Hoffman D (1996): Blood mercury levels with amalgam retroseals (Abstract). A longitudinal study. In: *Journal of endodontics* 22 (3), S. 140–141.
- Song M, Jung I-Y, Lee S.J, Lee C-Y, Kim E (2011): Prognostic factors for clinical outcomes in endodontic microsurgery (Abstract). A retrospective study. In: *Journal of endodontics* 37 (7), S. 927–933.
- Song M, Kim S G, Lee S-J, Kim B, Kim E (2013): Prognostic factors of clinical outcomes in endodontic microsurgery (Abstract). A prospective study. In: *Journal of endodontics* 39 (12), S. 1491–1497.
- Sonntag D, Guntermann A, Kim S K, Stachniss V (2003): Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students (Abstract). In: *Int Endod J* 36 (4), S. 246–255.
- Soundappan S, Jothi L S, Sandhya R, Velmurugan N (2014): Biodentine versus Mineral Trioxide Aggregate versus Intermediate Restorative Material for Retrograde Root End Filling. An Invitro Study. In: *Journal of Dentistry (Tehran, Iran)* 11 (2), S. 143–149.
- Stabholz A, Shani J, Friedman S, Abed J (1985): Marginal adaptation of retrograde fillings and its correlation with sealability. In: *Journal of endodontics* 11 (5), S. 218–223.

- Storm B, Eichmiller F C, Tordik P A, Goodell G G (2008): Setting expansion of gray and white mineral trioxide aggregate and Portland cement. In: *Journal of endodontics* 34 (1), S. 80–82.
- Sunde P T, Olsen I, Debelian G J, Tronstad L (2002): Microbiota of periapical lesions refractory to endodontic therapy (Abstract). In: *Journal of endodontics* 28 (4), S. 304–310.
- Sundqvist G (1976): Bacteriological studies of necrotic dental pulps. Dissertation. University of Umeå, Umeå, Schweden. Department of Oral Microbiology.
- Sundqvist G (1994): Taxonomy, ecology, and pathogenicity of the root canal flora. In: *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 78 (4), S. 522–530.
- Szeremeta-Browar T L, VanCura J E, Zaki A E (1985): A comparison of the sealing properties of different retrograde techniques. An autoradiographic study. In: *Oral surgery, oral medicine, and oral pathology* 59 (1), S. 82–87.
- Torabinejad M, Higa R K, McKendry D J, Pitt Ford T R (1994): Dye leakage of four root end filling materials. Effects of blood contamination. In: *Journal of endodontics* 20 (4), S. 159–163.
- Torabinejad M, Hong C U, McDonald F, Pitt Ford T R (1995): Physical and chemical properties of a new root-end filling material (Abstract). In: *Journal of endodontics* 21 (7), S. 349–353.
- Torabinejad M, Pitt Ford T R (1996): Root end filling materials. A review. In: *Dental Traumatology* 12 (4), S. 161.
- Torabinejad M, Rastegar A F, Kettering J D, Pitt Ford T R (1995): Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as a root-end filling material. In: *Journal of endodontics* 21 (3), S. 109–112.
- Torabinejad M, Smith P W, Kettering J D, Pitt Ford T R (1995): Comparative investigation of marginal adaptation of mineral trioxide aggregate and other commonly used root-end filling materials (Abstract). In: *Journal of endodontics* 21 (6), S. 295–299.
- Torabinejad M, Watson T F, Pitt Ford T R (1993): Sealing ability of a mineral trioxide aggregate when used as a root end filling material. In: *Journal of endodontics* 19 (12), S. 591–595.
- Trohorsch D, Münster M, Kaiser L, Lagan A, Haueisen H, Gerhardt-Szép S, Heidemann D (2012): Mineral Trioxid Aggregate, ein endodontischer Reparaturzement - vom Geheimtipp zur Standardtherapie? In: *ZWR* 121 (05), S. 202–212.
- Tronstad L, Trope M, Doering A, Hasselgren G (1983): Sealing ability of dental amalgams as retrograde fillings in endodontic therapy. In: *Journal of endodontics* 9 (12), S. 551–553.
- Trope M, Lost C, Schmitz H J, Friedman S (1996): Healing of apical periodontitis in dogs after apicoectomy and retrofilling with various filling materials. In: *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 81 (2), S. 221–228.
- Vasudev S K, Goel B R, Tyagi S (2003): Root end filling materials. - A review. In: *Endontology* 15, S. 12–18.
- Vertucci F J, Beatty R G (1986): Apical leakage associated with retrofilling techniques. A dye study. In: *Journal of endodontics* 12 (8), S. 331–336.

- Vignaroli P A, Anderson R W, Pashley D H (1995): Longitudinal evaluation of the microleakage of dentin bonding agents used to seal resected root apices (Abstract). In: *Journal of endodontics* 21 (10).
- Villa-Machado P A, Botero-Ramírez X, Tobón-Arroyave S I (2013): Retrospective follow-up assessment of prognostic variables associated with the outcome of periradicular surgery. In: *International Endodontic Journal* 46 (11), S. 1063–1076.
- von Arx T (2011a): Apical surgery. A review of current techniques and outcome. In: *The Saudi dental journal* 23 (1), S. 9–15.
- von Arx T (2011b): Apical surgery. A review of current techniques and outcome. In: *The Saudi dental journal* 23 (1), S. 9–15.
- von Arx T, Hänni S, Jensen S S (2014): 5-year results comparing mineral trioxide aggregate and adhesive resin composite for root-end sealing in apical surgery (Abstract). In: *Journal of endodontics* 40 (8), S. 1077–1081.
- von Arx T, Kurt B (1999): Root-end cavity preparation after apicoectomy using a new type of sonic and diamond-surfaced retrotip. A 1-year follow-up study. In: *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons* 57 (6), S. 656–661.
- Waikakul, A.; Punwutikorn, J. (1991): Clinical study of retrograde filling with gold leaf. Comparison with amalgam. In: *Oral surgery, oral medicine, and oral pathology* 71 (2), S. 228–231.
- Wälivaara, D.-Å.; Abrahamsson, P.; Isaksson, S.; Salata, L. A.; Sennerby, L.; Dahlin, C. (2012): Periapical tissue response after use of intermediate restorative material, gutta-percha, reinforced zinc oxide cement, and mineral trioxide aggregate as retrograde root-end filling materials. A histologic study in dogs. In: *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons* 70 (9), S. 2041–2047.
- Wälivaara D-Å, Abrahamsson P, Fogelin M, Isaksson S (2011): Super-EBA and IRM as root-end fillings in periapical surgery with ultrasonic preparation. A prospective randomized clinical study of 206 consecutive teeth. In: *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 112 (2), S. 258–263.
- Wallace J A (2006): Effect of Waterlase laser retrograde root-end cavity preparation on the integrity of root apices of extracted teeth as demonstrated by light microscopy. In: *Australian endodontic journal : the journal of the Australian Society of Endodontology Inc* 32 (1), S. 35–39.
- Wong W S, Rosenberg P A, Boylan R J, Schulman A (1994): A comparison of the apical seals achieved using retrograde amalgam fillings and the Nd:YAG laser. In: *Journal of endodontics* 20 (12), S. 595–597.
- Wuchenich G, Meadows D, Torabinejad M (1994): A comparison between two root end preparation techniques in human cadavers. In: *Journal of endodontics* 20 (6), S. 279–282.
- Yildirim T, Er K, Taşdemir T, Tahan E, Buruk K, Serper A (2010): Effect of smear layer and root-end cavity thickness on apical sealing ability of MTA as a root-end filling material. A bacterial leakage study. In: *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 109 (1), 67-72.
- Zarei M, Javidi M, Kazemi Z, Afkhami F (2015): In Vitro Evaluation of Apical Sealing Ability of HEROfill® Obturator Versus Cold Lateral Condensation in Curved Root Canals. In: *Journal of Dentistry (Tehran, Iran)* 12 (8), S. 599–606.



## 8. Thesen

1. Die Beurteilung der Randständigkeit und Homogenität mittels Lichtmikroskopie ist eine Möglichkeit der Untersuchung histologischer Präparate retrograder Füllungen.
2. Die Anfertigung mehrerer Querschnitte bedingt dabei einen größeren Informationsgewinn als einmaliges Sektionieren.
3. Das beste Adaptationsverhalten mit einem Anteil an imperfektem Rand von 1,66% und einem mittleren maximalen Randspalt von 17,40 µm sowie die höchste Homogenität mit einem Anteil an Lufteinschlüssen von 0,67% zeigte von allen getesteten Materialien Pro Root™ MTA.
4. Unter den Bedingungen dieser in-vitro Studie sind nicht alle verwendeten Materialien als retrogrades Füllungsmaterial empfehlenswert.
5. Füllungen in retrograden Kavitäten mit Unterschnitt zeigen unabhängig vom verwendeten Material einen signifikant geringeren Anteil imperfekten Rand sowie Anteil an Lufteinschlüssen.
6. Retrograde Füllungen mit Pro Root™ MTA Füllungen liefern von der Art der Präparation weitgehend unabhängig gute Ergebnisse, eine erhöhte Abhängigkeit von der Art der retrograden Präparation zeigen hingegen die Füllungsmaterialien Super-EBA®, Biodentine™ und Ketac™ fil Plus Aplicap™.
7. Unter den Bedingungen einer in-vitro Studie sind nicht alle Kombinationen aus retrograder Präparation und retrogradem Füllungsmaterial empfehlenswert.
8. Die Verwendung verschiedener Kombinationen aus retrograder Präparation und retrograden Füllmaterialien bedingen vermutlich die Reduktion der Randständigkeit und Homogenität retrograder Füllungen.
9. Pro Root™ MTA zeigt unabhängig von der Schnitthöhe in allen gemessenen Kategorien gute Ergebnisse, eine erhöhte Abhängigkeit von der Schnitthöhe zeigen hingegen die Füllungsmaterialien Super-EBA®, Biodentine™ und Ketac™ fil Plus Aplicap™.
10. Die Randständigkeit und Homogenität retrograder Füllungen ist von der Schnitthöhe innerhalb der retrograden Kavität abhängig.

### **9. Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, Henk Fichtel, geboren am 17.05.1993, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte, fremde Hilfe angefertigt habe.

Ich habe mich dabei keiner anderen als der von mir angegebenen Quellen und Hilfen bedient.

Halle (Saale), Juni 2018

Henk Fichtel

## **10. Erklärung über frühere Promotionsversuche**

Hiermit erkläre ich, Henk Fichtel, geboren am 17.05.1993, bisher an keiner in- und/oder ausländischen Medizinischen Fakultät ein Gesuch um eine Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende Arbeit als Dissertation vorgelegt zu haben.

Halle (Saale), Juni 2018

Henk Fichtel

## 11. Danksagung

Meinem Doktorvater, Herrn **Professor Dr. med. dent. habil. Christian R. Gernhardt** (Universitätspoliklinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie) danke ich außerordentlich für die Überlassung dieses interessanten Themas, sein unermüdliches Engagement in allen theoretischen und praktischen Belangen sowie die konstruktive Begleitung bis zur Fertigstellung der Arbeit.

An dieser Stelle auch einen ganz herzlichen Dank an Herrn **Univ.-Prof. Dr. med. dent. Hans-Günter Schaller** (Direktor der Universitätspoliklinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie) für die Unterstützung und die Zulassung zur Promotion an seiner Klinik.

Für die Möglichkeit der histologischen Probenherstellung danke ich Herrn **Univ.-Prof. Dr. Karl-Stefan Delank** (Direktor des Departments für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie) sowie Herrn **Prof. Dr. phil. René Schwesig** (Laborleiter des Forschungslabor für Experimentelle Orthopädie und Sportmedizin des Departments für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie) recht herzlich.

Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Frau **Angela Rosemeier** (Fach MTLA im Forschungslabor für Experimentelle Orthopädie und Sportmedizin) für ihre fachlichen Hinweise sowie ihren unermüdlichen Einsatz.

Meiner **Familie** danke ich ganz besonders herzlich für jegliche Unterstützung.

All meinen **Freunden** sei an dieser Stelle herzlichst gedankt.