

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde  
Geschäftsführende Direktorin: Prof. Dr. H. Korbmacher-Steiner  
des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

**Effizienz verschiedener Aktivierungstechniken  
zur Entfernung von Guttapercha- und Sealerresten  
von der Wurzelkanaloberfläche**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin  
Dem Fachbereich der Medizin der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt von:

**Hanna Werner**

aus Waiblingen

Marburg, 2022

Angenommen vom Fachbereich der Medizin der Philipps-Universität Marburg

am: 23.03.2022

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin

Dekan: Prof. Dr. D. Hilfiker-Kleiner

Referent: Priv.-Doz. Dr. M. J. Roggendorf

Korreferent: Prof. Dr. G. Petersilka

**Gewidmet meiner Familie**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Literaturübersicht</b>	<b>6</b>
4.1	Indikationen und Ziele einer Revisionsbehandlung	6
4.2	Instrumente in der Endodontie	9
4.2.1	Handinstrumente	9
4.2.2	Maschinelle Instrumentensysteme	9
4.2.3	Vergleich verschiedener Revisionsysteme bezüglich der Revisionseffizienz	12
4.3	Die wichtigsten Obturationstechniken im Überblick	14
4.4	Verbesserung der Revisionseffizienz	18
4.4.1	Aufbereitungsgröße	18
4.4.2	Lösungsmittel	19
4.4.3	Ultraschall- und Schallaktivierung	22
<b>5</b>	<b>Zielsetzung und Arbeitshypothesen</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Materialien und Methoden</b>	
6.1	Vorbereitung der Proben	27
6.2	Wurzelkanalaufbereitung	28
6.3	Wurzelkanalfüllung	29
6.4	Revisionsschritt 1	31
6.5	Digitalmikroskopische Aufnahme 1	32
6.6	Revisionsschritt 2	34
6.7	Digitalmikroskopische Aufnahmen 2 und Ausmessung	40
6.8	Statistische Analyse	42

<b>7 Ergebnisse</b>	43
7.1 Revisionschritt 1	44
7.2 Revisionschritt 2	46
<b>8 Diskussion</b>	51
8.1 Diskussion der Methodik	51
8.2 Diskussion der Ergebnisse	61
<b>9 Schlussfolgerung</b>	72
<b>10 Zusammenfassung</b>	74
<b>11 Summary</b>	76
<b>12 Literaturverzeichnis</b>	78
<b>13 Anhang</b>	94
<b>14 Danksagung</b>	101
<b>15 Curriculum vitae (entfernt)</b>	102
<b>16 Verzeichnis akademischer Lehrer</b>	103
<b>17 Eidesstattliche Erklärung (entfernt)</b>	104

# 1 Abkürzungsverzeichnis

Abb	Abbildung
ADA	American Dental Association
ANSI	American National Standards Institute
AL	Arbeitslänge
cpm	circulations per minute
°C	Grad Celsius
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund-, Kieferheilkunde
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
ISO	International Organization for Standardization
max	Maximaler Wert
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Milimeter
MW	Mittelwert
MDW	Medianwert
NaCl	Natriumchlorid
NaOCl	Natriumhypochlorit
Ncm	Newtonzentimeter
NiTi	Nickel–Titan
NV	Normalverteilung
s	Sekunde
Tab	Tabelle
U	Umdrehung
U x min <sup>-1</sup>	Umdrehung pro Minute
VDW	Vereinigte Dentalwerke
WF	Wurzelfüllung
z.B.	zum Beispiel
#	ISO-Feilengröße
%	Prozent
.02	taper .02
.04	taper .04

## 2 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungen

Abb. 1: Vorbereitung der Probenzähne	27
Abb. 2: Guttapercha-Stifte .04/#45 des F360-Systems (Koment Dental, Lemgo)	30
Abb. 3: Revisionsschritt 1	31
Abb. 4: Beispielaufnahme eines mittleren Kanalabschnitts einer Wurzelhälfte in 2D-Darstellung	33
Abb. 5: Beispielaufnahme eines mittleren Kanalabschnitts einer Wurzelhälfte in 3D-Darstellung	33
Abb. 6: Revisionsschritt 2	34
Abb. 7: <i>IRRI S</i> -Ultraschallfeile mit entgratetem <i>K-Feilen</i> -Design	35
Abb. 8: <i>CanalBrush</i> , eingespannt im <i>OS30</i> -Winkelstück	36
Abb. 9: <i>SF65</i> -Nickel-Titan-Schallspitze mit goldfarbener TiN-Beschichtung und Längenmarkierungen bei 18, 20 und 22 mm (NiTi-Schallspitze, Komet)	37
Abb. 10: Beispielaufnahme eines Kanalabschnitts nach dem 1. Revisionsschritt	39
Abb. 11: Beispielaufnahme eines Kanalabschnitts nach dem 2. Revisionsschritt und Aktivierung mit <i>SF65</i>	39
Abb. 12: Beispielaufnahme links oben: Extraktionsbereich, rechts oben – links unten: Markierung der Sealerreste. Darstellung unterschiedlicher Helligkeitswerte	40
Abb. 13: Beispielaufnahme eines Kanalabschnitts einer Wurzelhälfte	41
Abb. 14: Beispielaufnahme der errechneten prozentualen Wurzelfüllmaterialreste in dem Kanalabschnitt aus Abbildung 16	42
Abb. 15: Differenz der WF Reste nach den verschiedenen Aktivierungstechniken [%]	43

Abb. 16: WF-Reste koronaler Abschnitt vor Aktivierung	45
Abb. 17: WF-Reste mittlerer Abschnitt vor Aktivierung	45
Abb. 18: WF-Reste apikaler Abschnitt vor Aktivierung	46
Abb. 19: Differenz der WF Reste koronal nach den verschiedenen Aktivierungstechniken [%]	47
Abb. 20: Differenz der WF Reste mittig nach den verschiedenen Aktivierungstechniken [%]	48
Abb. 21: Differenz der WF Reste apikal nach den verschiedenen Aktivierungstechniken [%]	49

## **Tabellen**

Tab. 1: Spülsequenz vor Wurzelkanalfüllung, nach Revisionsschritt 1 und nach Revisionsschritt 2	29
Tab. 2: Inhaltsstoffe Sealer <i>AH Plus Jet</i> -Doppelspritze	30
Tab. 3: Inhaltsstoffe der Guttaperchaspitzen	30
Tab. 4: Versuchsdurchführung innerhalb der Gruppen	38
Tab. 5: Ergebnisse nach Revisionsschritt 1	44
Tab. 6: Mann-Whitney-Test: Differenz koronal nach Aktivierung	47
Tab. 7: Mann-Whitney-Test: Differenz mittig nach Aktivierung	48
Tab. 8: Mann-Whitney-Test: Differenz apikal nach Aktivierung	49
Tab. 9: Ergebnisse des Wilcoxon-Tests	49



### 3 Einleitung

Trotz fortschreitender Entwicklung in der Zahnmedizin ist der Verlust eines Zahnes in funktioneller und ästhetischer Hinsicht noch nicht gleichwertig zu ersetzen. Der Fokus wissenschaftlichen Interesses liegt demnach auf den Therapiemöglichkeiten erkrankter Zähne, um eine Extraktion zu umgehen. Die Wurzelkanalbehandlung bietet bei stark destruierten Zähnen die Möglichkeit eine weiterführende Versorgung des Zahnes zu ermöglichen und dessen Erhalt zu sichern. Die Erfolgsquote der Erhaltung des Zahnes nach erfolgter Wurzelkanalbehandlung liegt nach aktuellem, medizinischen Standard bei 86-98% [144]. Bei Misserfolg der Therapie kann durch eine Revisionsbehandlung die Extraktion als Ultima Ratio vermieden werden. Die Therapie der Wahl ist hier die orthograde Revision, da der chirurgischen retrograden Nachbehandlung einerseits schlechtere Langzeitergebnisse nach 4-6 Jahren sowie postoperative Beschwerden nachgewiesen werden konnten [50,158]. Obligatorisch für eine erfolgreiche Nachbehandlung ist die vollständige Entfernung des Wurzelfüllmaterials um eine rückstandslose Beseitigung persistierender Bakterien zu ermöglichen und einen suffizienten Verbund zum Füllmaterial zu gewährleisten.

Guttapercha ist das am häufigsten verwendete Wurzelfüllkanalmaterial im Praxisalltag. Zahlreiche Studien beschäftigen sich bereits mit dem Einfluss unterschiedlicher Revisionsmethoden auf dessen Entfernbarkeit [4,15,17,98,113]. Demnach führt die Erhöhung der initialen Aufbereitungsgröße nachweislich zu einer deutlich gesteigerten Reinigung der Kanalwandoberfläche und einer damit verbundenen Reduktion der Keimlast [116].

Dies führt jedoch zu einem erhöhten Abtrag von Zahnhartsubstanz und erhöht die Gefahr von Rissen im Dentin durch eine zusätzliche Anwendung von maschinellen Revisionssystemen [157]. Nach aktueller Studienlage konnte keine Variante der Revisionstechniken eine vollständige Entfernung des Wurzelfüllmaterials erreichen [17,53,59,134].

Der Einsatz von Lösungsmittel als Teil der endodontischen Revisionsbehandlung wird in der Literatur noch kontrovers diskutiert. Das Lösungsmittel mit der größten Revisionseffizienz, Chloroform, besitzt zugleich die meisten unerwünschten Nebenwirkungen [7,35,126,170]. Eine qualitativ erfolgreiche Revisionsbehandlung wird bei Anwendung von Chloroform durch eine herabgesetzte Verbundfestigkeit der Adhäsivsysteme am Dentin der Pulpenkammer [35] und ein Verteilen des Füllmaterials an der Kanaloberfläche erschwert [126]. Aus gesundheitlicher Sicht wurde das Lösungsmittel zudem als zellschädigend [7] und potentiell kanzerogen

eingestuft [72,170]. Folglich rückt Eukalyptusöl als kompetente Alternative zunehmend in den Vordergrund [72,94,131].

Es besteht die Notwendigkeit, eine praxisfähige Methode zu etablieren, die zu einer Steigerung der Revisionseffizienz von Guttapercha-Füllungen führt und dabei keine weitere Schwächung der Wurzelsubstanz erforderlich macht. Um diese Effizienz zu prüfen, steht daher die Revision von Guttapercha und *AH Plus* gefüllter Wurzelkanäle durch das vollrotierende *F360-System (Komet Dental)* und anschließender direkten Aktivierung des Lösungsmittels Eukalyptusöl im Mittelpunkt dieser Studie. Hierbei wurden die mechanisch betriebene *CanalBrush (ROEKO, Coltène Whaledent)*, der Ultraschallansatz *IRRI S (VDW)* und der Schallansatz *SF65 (Komet Dental)* für den Vergleich gewählt und auf ihren jeweiligen Revisionseinfluss getestet. Die Aufbereitungsgröße wurde äquivalent zur Erstbehandlung gewählt.

## 4 Literaturübersicht

### 4.1 Indikationen und Ziele einer Revisionsbehandlung

Die Erfolgsquote einer initialen Wurzelkanalbehandlung liegt aktuell bei 86-98% [144]. Dabei wird der Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung mit einer „vollständigen Heilung“ gleichgesetzt. Laut *Stellungnahme der DGZMK (2001)* ist eine vollständige Heilung definiert durch „klinische Symptommfreiheit und radiologisch durchgehend verfolgbarer Parodontalspalt normaler Breite (d. h. radiologisch als knöchern beurteilte Regeneration endodontisch bedingter Läsionen und, falls gegeben, Stillstand ehemals progressiver Resorptionen)“. Der maximale Zeitraum, in dem dieser Zustand erfolgen soll, ist mit 4-5 Jahren angegeben [148].

Die Ursache endodontischer Misserfolge ist dabei sehr vielfältig. Eine der Hauptursachen sind persistierende Bakterien im Kanalsystem nach der Initialbehandlung [43,143]. Mikrobielle Biofilmbildung wird normalerweise an den Wurzelkanalwänden beobachtet, wobei einige Mikrobenarten zudem die Fähigkeit besitzen, in die Dentintubuli einzudringen und dort zu überleben. Hier stößt die rein mechanische Aufbereitung an ihre Grenzen. Diese Erkenntnis unterstreicht die Bedeutung der vollständigen Elimination von Bakterien aus dem Wurzelkanalsystem durch additive Techniken zusätzlich [143].

Auch das Unvermögen eines behandelnden Zahnarztes, alle Kanäle aufzufinden und von entzündlichem Gewebe zu befreien, reduziert den Behandlungserfolg. Vermehrt ist diese Tatsache bei Molaren im Oberkiefer zu beobachten, da hier der zweite mesiobukkale Kanal häufig nicht aufgefunden und demnach nicht aufbereitet wurde. Dabei konnte eine sinkende Langzeitprognose ermittelt werden [174]. In der Studie von Hoen et al. (2002) waren 42% der Misserfolge auf einen unbehandelten Wurzelkanal zurückzuführen, wohingegen mit 65% der größte Anteil einer schlechten Qualität der Obturation geschuldet war [63]. Konnte ein Wurzelkanal nicht bis zum physiologischen Apex gefüllt werden, führt dies nachweislich zu einer schlechteren Prognose des Zahnes. Die Wurzelkanalbehandlung einer zuvor vitalen Pulpa führte in der Studie von Kojima et al. (2004) bei Überstopfung des Wurzelfüllmaterials zu einer Erfolgsrate von 70,8% und bei Unterfüllung in 85,5% der Fälle zum Erfolg [85]. Dabei wurde in einer Studie die ebenfalls den Misserfolg von Wurzelkanalbehandlungen in einer Versuchsgruppe von 130 Wurzelkanälen untersuchte, der Anteil an überstopften Kanälen deutlich geringer (13%) als der an unterfüllten Kanälen (46,9%) eingestuft [2]. Die Fraktur eines Aufbereitungsinstrumentes im Kanal ist nicht direkt am endodontischen

Versagen beteiligt. Entscheidend ist hier, ob der distale Bereich des frakturierten Instruments bereits suffizient von Bakterien und infiziertem Gewebe gereinigt werden konnte [79,142,153]. Bei Abwesenheit einer periradikulären Veränderung oder präoperativen Infektion konnte kein Einfluss des frakturierten Instrumentes auf die Erfolgsprognose des endodontisch behandelten Zahnes festgestellt werden [79,142,153].

Zahlreiche Studien belegen, dass das Vorhandensein einer präoperativen Infektion den wichtigsten prognostischen Einflussfaktor auf den Erfolg darstellt [79,142,153]. Ohne vorausgegangene apikale Parodontitis konnten nach erfolgter nicht-chirurgischer Wurzelkanalbehandlung 92-98% der Patienten als krankheitsfrei eingestuft werden. Bei Vorkommen einer präoperativen apikalen Parodontitis sank die vollständige Abheilung signifikant auf 74-86% [50]. Studien die sich mit der gleichen Thematik befassen konnten bei vorhandener apikaler Entzündung nur bei 68% [143] bzw. 74% [49] eine vollständige Ausheilung feststellen. Die Qualität der Wurzelkanalbehandlung ist maßgeblich für die vollständige apikale Regeneration verantwortlich, da persistierende Bakterien im Kanalsystem im Rückschluss die apikale Infektion fördern [152]. Der Nachweis von Bakterien nach der endodontischen Behandlung korreliert mit dem Vorhandensein einer nicht regenerierten periapikalen Läsion in 79% der Fälle. Demgegenüber steht im Vergleich ein deutlich geringerer Anteil von 28% mit nicht vollständig verheilten apikalen Läsionen bei Absenz von Bakterien [45]. Zudem kann eine Reinfektion des Kanalsystems durch Bakterien von koronal erfolgen. Ursache ist die Infiltration von Mikroorganismen und Substraten, sog. *Mikroleakage*, aufgrund von insuffizienter koronaler Abdichtung. *Tronstad et al. (2000)* untersuchte den Einfluss der Qualität der koronalen Restauration, der Wurzelkanalfüllung und der periapikalen Situation auf die Prognose des Zahnes [161]. Die höchste Erfolgsrate konnten die Gruppen mit technisch hochwertiger Endodontie in Kombination mit einer guten Restauration erzielen (81%). Bei schlechter Restauration sank die Erfolgsrate um 10 %. Dennoch hat die adäquate Wurzelfüllung laut dieser Studie einen höheren Stellenwert als die koronale Restauration im Hinblick auf den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung [161].

Eine endodontische Revisionsbehandlung ist gemäß *Stellungnahme der DGZMK 2004* in folgenden Fällen indiziert [149] :

1. Wurzelkanalbehandelte Zähne mit röntgenologischen Symptomen einer persistierenden oder neu entstandenen, endodontisch bedingten Parodontitis apicalis
2. Wurzelkanalbehandelte Zähne mit klinischen Symptomen einer endodontisch bedingten Parodontitis apicalis
3. Wurzelkanalbehandelte Zähne mit röntgenologisch oder klinisch insuffizienter Wurzelkanalfüllung (z.B. mangelhafte Homogenität der Füllung, nicht behandelte Wurzelkanäle, nicht gefüllte Areale des endodontischen Systems, fragwürdiges und nicht mehr indiziertes Füllmaterial etc.) ohne klinische oder röntgenologische Anzeichen einer Parodontitis apicalis.
4. Wurzelkanalfüllungen mit Exposition zum Mundhöhlenmilieu
5. Wurzelkanalbehandelte Zähne mit progressiv verlaufenden, externen, entzündlichen Resorptionen.

Ziel der Revisionsbehandlung ist die Beseitigung verbliebener Bakterien, um eine vollständige Heilung des erkrankten Zahnes sowie Symptomfreiheit zu ermöglichen. Essentiell ist hierfür die vollständige Entfernung der Wurzelfüllmaterialreste und nekrotischen Gewebes, die als Nische für Bakterienbesiedlung dienen können. Zudem wird angestrebt die Dentintubuli freizulegen und für eine neue Obturation zugänglich zu machen [146].

Die Revision einer Wurzelkanalbehandlung kann konservativ-endodontisch, orthograd, oder chirurgisch-endodontisch, retrograd erfolgen. Laut *Stellungnahme der DGZMK (2004)* stellt die orthograde Revision die präferierte Methode dar. Abweichungen sind bei unverbesserlicher Situation nach bereits erfolgter konservativer Revision oder Unzugänglichkeit in das endodontische System möglich [149]. 2-4 Jahre postoperativ kann die chirurgische Therapie mit 77,8% eine höhere Erfolgsrate gegenüber der konservativen Methode mit 70,9% aufweisen. Die Langzeitprognose verschiebt das Ergebnis jedoch zugunsten der orthograden endodontischen Behandlung; hier erfolgte die Ausheilung nach über 6 Jahren in 83% der Fälle, während bei der retrograden Variante die Quote auf 62,9% sank [158]. Vergleichbare Werte wurden in der Studie von *Friedman et al. (2004)* ermittelt [50]. Bei Patienten mit chirurgischer Nachbehandlung konnten zudem vermehrt postoperative Beschwerden verzeichnet werden; ein weiterer Grund die Wahl der Therapie gut abzuwägen [87]. Letztlich sollte die Entscheidung für jeden Patienten

individuell auch in Abhängigkeit von Revisionsrisiken, Behandlungskosten und in klarer Abstimmung mit dem Patienten getroffen werden [87].

## **4.2 Instrumente in der Endodontie**

### **4.2.1 Handinstrumente**

Nachdem Edward Maynard 1834 das erste Aufbereitungsinstrument entwickelt hatte, galten bis Mitte der 1990er Jahre Handinstrumente aus Edelstahl als Standard in der Endodontie. Aufgrund von Kanalverlagerungen und Obliterationsgefahr bei Verwendung eben jener Instrumente stieg zunehmend der Bedarf nach neuen Techniken. Eine ausschlaggebende Entwicklung in der Zahnmedizin war letztendlich die Einführung von Instrumenten aus Nickel-Titan (NiTi), wodurch eine deutlich bessere Aufbereitungsqualität erzielt werden konnte [51]. Diese Qualitätssteigerung wird durch die besonderen physikalischen Materialeigenschaften von NiTi ermöglicht, die zu 56m% aus Nickel und 44m% aus Titan bestehen und im Vergleich zu Edelstahllegierungen ein 5-fach geringeres Elastizitätsmodul besitzen [156,166]. Durch seine Pseudoelastizität, bei der es innerhalb des Werkstoffes zur Phasenumwandlung kommt, ist es NiTi-Instrumenten möglich nach ihrer Entlastung durch ihre innere Spannung in die Ursprungsform zurückzukehren (sog. „Memory-Effekt“). Diese reversible Deformation vereinfacht auch die Aufbereitung von stark gekrümmten Kanälen [90]. Im Vergleich zu Edelstahlfeilen haben NiTi-Instrumente zudem eine 3-fach höhere Flexibilität und sind somit auch resistenter gegenüber Frakturen [155,166]. Dies ermöglicht eine optimale Anpassung an die Wurzelkanalmorphologie und führt zu einer formhaltenden Aufbereitung und nur selten zur Verlegung des Kanalverlaufs im geringen Umfang [122]. Bei Verwendung von NiTi-Instrumenten konnte auch bei unerfahrenen Behandlern ein Erfolg mit gut erhaltener Kanalgeometrie verzeichnet werden [10,147].

### **4.2.2 Maschinelle Instrumentensysteme**

Zunächst wurden maschinelle NiTi-Systeme mit U-förmigem Querschnitt eingeführt. Die Führungsflächen an den Schneidekanten sind bei diesen Instrumenten ungeschliffen und haben einen neutralen Schneidewinkel, sog. „radial lands“. Dieses Design ermöglicht dem Instrument eine optimale Zentrierung im Kanal und reduziert die Kanalverlegung signifikant [108,139]. Durch die große Kontaktfläche zwischen Kanalwand und Instrument ist der Einsatz in der *Crown-down-pressure-*

less-Technik nötig [102,109]. Hierbei wird der Kanal sukzessive durch die Verwendung von schrittweise kleineren Instrumentengrößen mit variierender Konizität bis zur Arbeitslänge aufbereitet. Zu diesen NiTi-Systemen der ersten Generation zählt zum Beispiel das *ProFile*-System (Dentsply). Durch das passive Abscheren des Wurzelkanalodontins ist die Schneideleistung dieser NiTi-Systeme jedoch kritisch zu betrachten [117]. Mit den nachfolgenden aktiv schneidenden NiTi-Systemen konnte eine gute Abtragleistung und eine effizientere Wurzelkanalaufbereitung erzielt werden [117]. Durch ihren negativen Schneidewinkel wird die Reibung im Kanal reduziert [23]. Allerdings führt die aktiv schneidende Arbeitsweise aufgrund der entfallenen Führungsflächen zu einer Dezentrierung [70]. Es folgten Systeme, die durch Designänderungen diesen Effekt auszugleichen versuchten. 1999 war die *Crown-down-pressureless*-Technik die präferierte Aufbereitungstechnik. Demnach wurde das zu dieser Zeit eingeführte *RaCe*-System (FKG Dentaire) im Instrumentenaufbau entsprechend dieser Technik angepasst. Ein *RaCe*-Instrument setzt sich aus speziellen Schneiden und einer nicht schneidenden abgerundeten Spitze zusammen. *RaCe* steht für „Reamer with Alternating Cutting Edges“. Wie schon der Name beschreibt enthalten die Schneiden alternierende, gewundene und gerade Abschnitte. Dies verhindert eine Verschraubung des Instruments im Kanal und eine bessere Einhaltung des ursprünglichen Kanalverlaufs [129]. Durch die stumpfe Spitze konnte die Gefahr einer Stufenbildung im Kanal reduziert werden. Zusätzlich ist die Oberfläche der *RaCe*-Feilen durch ein elektro-chemisches Verfahren poliert worden, wodurch sie widerstandsfähiger gegenüber Abrieb und Ermüdungsbrüchen wurden und die Schneidfähigkeit erhöht werden konnte [111,128]. Darauf folgten Systeme, bei denen der Schneidekantenwinkel innerhalb des Instruments verändert wurde. Hierzu zählen *FlexMaster* (VDW), *AlphaKite* (Komet) und *Revo-S* (Micro-Mega). Bei dem *FlexMaster*-System führte z.B. die Konvexierung der klassischen Geometrie zu einem verringerten Einschraubeffekt, allerdings bei gleichzeitiger Reduktion der Schneidleistung. Zudem wurde die Stabilität auf Kosten der Flexibilität verstärkt, wodurch höhere Abweichungen vom originalen Kanalverlauf nachgewiesen werden konnten [145]. Eine andere Variante stellt das *ProTaper*-System (Dentsply) dar. Die verschiedenen Konizitäten in einem Instrument, führen hier zu einem Kompromiss zwischen Flexibilität, Spanraum und Zentrierung [117].

Das *Mtwo*-System (VDW) ist das erste Feilensystem, das die *Single-Length* Technik zur Aufbereitung nutzte. Bei dieser Technik werden alle Feilen außer der *Introfile*, die zur koronalen Erweiterung dient, bis auf Arbeitslänge eingeführt. Durch den S-förmigen Querschnitt der Feilen besteht nur an 2 Punkten Kontakt zur

Kanalwand und ein großer Spanraum resultierte aus dieser Querschnittsgestaltung. Der Dentinabtrag kann so gegenüber Systemen mit 3 Schneidekanten besser abtransportiert werden [20]. Das System besteht aus 8 Feilen bis ISO 40. Zwar konnte die Feilenanzahl auf 8 Feilen reduziert werden, trotzdem besteht weiterhin der Bedarf einer Verkürzung der Aufbereitungsdauer sowie einer Kostenreduktion. Das *Reciproc*-System (VDW) beschränkt sich auf nur eine Feile für die gesamte Kanalaufbereitung mit ebenfalls S-förmigem Querschnitt. Hierfür stehen 3 Feilendurchmesser zur Verfügung. Der Instrumentenwechsel entfällt und durch die einmalige Anwendung wird keine Sterilisation benötigt. So konnten Kosten und Arbeitsdauer signifikant reduziert werden [20,177]. Zusätzlich wird die Gefahr von Kreuzkontaminationen vermieden da Prionen, die auch durch Sterilisationsverfahren nicht eliminiert werden können, bei Mehrfachgebrauch von Instrumenten von Patient zu Patient übertragen werden [6]. Dieses System arbeitet mit einer oszillierenden Antriebstechnik und einer modifizierten *Balanced-force*-Technik. Hier wird die Feile durch eine große Rotation in Schneidrichtung in den Kanal eingeführt und mit einer kleinen Rotation in Gegenrichtung erfolgt die Freigabe der Feile. Von Nachteil ist, dass hierfür ein spezieller Motor, *VDW Silver Reciproc* (VDW), erforderlich ist. Außerdem wurde bei Einsatz der reziproken Arbeitsweise ein vermehrtes Überpressen von Debris über den Apex hinaus nachgewiesen, die als Nährboden für Bakterien dienen können und einen Misserfolg begünstigen [86]. Des Weiteren führt die Anwendung des *Reciproc*-Systems im Vergleich zu vollrotierenden Systemen vermehrt zu Rissen in der apikalen Dentinwand [22].

Das vollrotierende *F360*-System (Komet Dental) versucht, die Schwachstellen des *Mtwo*-Systems und des *Reciproc*-Systems zu umgehen und stellt so einen Kompromiss zwischen beiden Systemen dar. Es hat keine reziproke, sondern eine vollrotierende Arbeitsweise, wodurch die oben genannten Nachteile vermieden werden sollen. Des Weiteren besitzt es weniger Feilen als das *Mtwo*-System und kann so eine schnellere Arbeitsweise aufgrund des reduzierten Feilenwechsels ermöglichen. Es werden hier nur max. 4 Feilengrößen benötigt, je nachdem, wie groß die Zielgröße des jeweiligen Wurzelkanals sein soll. In der Regel genügen laut Herstellerangaben sogar nur 2 Feilen für die fertige Aufbereitung [67]. Die Feilen sind von ISO 25 bis ISO 55 in 10er-Schritten, sowie in den vier verschiedenen Längen von 21 mm, 25 mm oder 31 mm erhältlich. Der Doppel-S-Querschnitt ist laut Herstellerangaben schärfer als bei konventionellen Feilen mit S-förmigem Querschnitt. Die daraus resultierende schnellere Abnutzung ist vernachlässigbar, da die Feilen zur Einmalverwendung konzipiert wurden, so dass dieser Faktor bei der Einwegverwendung nicht relevant ist. Außerdem weist das *F360*-System den für die S-



Feilen typischen verbesserten Transport von Debris oder Wurzelfüllmaterial aus dem Kanal auf [65]. In einigen Studien wurde das *F360*-System bereits mit dem *Mtwo*-System und *Reciproc*-System bezüglich der Aufbereitungseffizienz verglichen. Die Verwendung des *F360*-Systems konnte gegenüber dem *Mtwo*-System eine sichere und signifikant schnellere Arbeitsweise bei der Aufbereitung von gekrümmten Wurzelkanälen aufzeigen, wenn auch mehr Zeit benötigt wurde als bei dem *Reciproc*-System [19]. Auch bei geraden Wurzelkanälen konnte das *F360*-System die Aufbereitungsdauer im Vergleich zum *Mtwo*-System reduzieren [19,21,121]. Außerdem konnte der ursprüngliche Kanalverlauf bei S-förmigen Kanälen verglichen mit dem *Reciproc*-System besser erhalten werden [127]. In der Studie von *Rubio J et al. (2017)* wurden 10 rotierende und reziproke Systeme, unter anderem *F360* und *Reciproc*, anhand von 300 Versuchszähnen die instrumentierten Bereiche und Erhalt der Kanalanatomie verglichen. In Bezug auf die Erhaltung der Wurzelkanalanatomie bei geraden, runden Kanälen erzielten alle Systeme der Studie ähnliche Ergebnisse [121]. Durch die vollrotierende Arbeitsweise konnte mit dem *F360*-System eine deutlich geringere Anzahl an überpresstem Material gegenüber reziproken Systemen [19] nachgewiesen werden. Ursprünglich wurden die vorgestellten NiTi-Systeme zur Wurzelkanalaufbereitung entwickelt. Heutzutage werden die genannten NiTi-Instrumente jedoch ebenfalls zur Revision von Wurzelkanalfüllungen verwendet.

#### **4.2.3 Vergleich der Revisionsysteme bezüglich der Revisions-effizienz**

Verschiedene Studien vergleichen die Reinigungseffizienz von Handinstrumenten (z.B. *Hedströmfeilen*) gegenüber NiTi-Systemen der ersten Generation (z.B. *Pro-File*, *Quantec*, usw.) mit „radial lands“. Die Verwendung von Handinstrumenten konnte eine signifikant bessere Reinigung der Kanalwand erzielen, da die Systeme der ersten Generation aufgrund fehlender Schneideleistung die Verteilung der Guttaperchafüllung an den Kanalwänden begünstigt [16]. Die schlechte Reinigungseffizienz der Systeme der ersten Generation lässt sich durch ihr zuvor genanntes Instrumentendesign erklären. Sie benötigen unter den NiTi-Systemen die längste Revisionszeit bei gleicher Umdrehungszahl, da durch ihre Führungsflächen nur kleine Guttaperchalinkremente abgetragen werden können. Die aktiv schneidenden NiTi-Systeme führen zu einer Verdrillung des ganzen Guttapercha-Stiftes um das Instrument und folglich zu einer schnelleren Entfernbarekeit dessen [69]. Zudem kommt es durch die aktiven NiTi-Systeme mit negativem Schneidewinkel (z.B.

*ProTaper*) durch erzeugte Friktionswärme zur Plastifizierung der Guttapercha und dadurch Lösen des Guttaperchastiftes aus dem Kanal. Das Ergebnis war eine effektivere Revisionseffizienz gegenüber der Verwendung von Handinstrumenten [54,59,69].

*Alves et al. (2016)* verglichen die aktiven NiTi-Systeme bezüglich Revisionsdauer und verbliebenem Füllungsmaterial untereinander. Das rotierende *Mtwo*-System konnte hier bessere Ergebnisse in der Reinigungseffizienz von gekrümmten Kanälen erzielen als die *Reciproc*-Feilen. Es konnten 96% des Kanals von Füllungsresten befreit werden, im Gegensatz zu 89% durch das *Reciproc*-System. Außerdem war die benötigte Revisionsdauer bei Verwendung der *Mtwo*-Instrumente kürzer [4]. In der Studie von *Rödig et al. (2014)*, die ebenfalls gekrümmten Wurzelkanäle untersuchten, kam es zu keinem signifikanten Unterschied hinsichtlich der Revisionseffizienz unter den verschiedenen Techniken. Hier wurden das *Reciproc*-System, das *ProTaper*-System und die *Hedströmfeilen* gegenübergestellt. Die *Hedströmfeilen* zeigten sich dabei als die sichersten Instrumente vor den maschinellen Systemen. Das rotierende *ProTaper*-System führte in 3 von 20 Versuchszähnen zu Perforationen und in beiden NiTi-Systemen kam es zu einer Instrumentenfraktur [114]. Bei der Revision von Guttapercha mit *AH26* gefüllten, geraden Wurzelkanälen konnte in der Studie von *Koçak et al. (2016)* reziproke Systeme (*WaveOne*, *Reciproc*) gegenüber dem rotierendem System (*ProTaper*) ein besseres Revisionsergebnis erzielen [84]. *Rios et al. (2014)* ermittelten jedoch keinen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Arbeitsweisen bei einem vergleichbaren Versuch [113]. Demnach lässt sich bezüglich der Revisionszeit und Reinigungseffizienz nach aktuellem Stand der Wissenschaft kein eindeutiges Ergebnis finden.

Wie bereits beschrieben, wurde bei der reziproken Arbeitsweise während der Kanalaufbereitung ein vermehrtes apikales Überpressen von Debris beobachtet. Dieser Nährboden für Bakterien kann eine apikale Infektion fördern und zu einem Revisionsmisserfolg führen [86]. Bei dem Vergleich des vollrotierenden mit dem reziproken System bezüglich der Extrusion von Debris über den Apex während der Revision, lassen sich gegenteilige Ergebnisse finden [36,91].

Die Studie von *Kesim et al. (2017)* verglich das *Mtwo*-System, *Reciproc*-System, *ProTaper* Universal System und die *Hedströmfeilen* hinsichtlich ihrer Revisionseffizienz bei mit Guttapercha überstopften Versuchszähnen. Die Revisionseffizienz von *Mtwo*- und *Hedströmfeilen* lag bei 30%, gefolgt vom *ProTaper*-System mit 20%. Die schlechteste Revisionseffizienz erreichte die Anwendung des *Reciproc*-Systems mit 10%. Dabei wurde die Revision als erfolgreich bewertet wenn kein

Füllmaterial an den externen Wurzelflächen und in dem umliegenden Glasfläschchen, welches die periapikale Umgebung simuliert, zu finden war. Die geringfügig besseren Ergebnisse für *Mtwo*- und *Hedströmfeilen* wurden von den Autoren durch die weniger aggressive Arbeitsweise mit geringerer Druckerwartung begründet, die bei apikalen Schäden von Vorteil sind. Insgesamt waren die Ergebnisse aber für alle Systeme nicht zufriedenstellend [80].

Ein weiterer Einfluss auf die Revidierbarkeit wird durch das unterschiedliche Alter der Wurzelkanalfüllung vermutet. *Duarte et al. (2010)* verglichen die Revisionseffizienz von Guttapercha und dem auf Zinkoxid-Eugenol basierendem Sealer *Endofill* aus dem Kanal in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer, wobei 2 Wochen und 6 Jahre der Simulation frisch gelegter und alter Wurzelkanalfüllungen diente [37]. Die Versuchszähne wurden in Kochsalz getränkter Gaze eingebettet und diese alle 2 Wochen erneuert. Dabei wurden die Wurzelkanalfüllungen der beiden Lagerungszeiträume mit *K*-Feilen oder rotierendem *ProTaper*-System revidiert. Die Auswertung ergab keine signifikanten Unterschiede bezüglich der verbliebenen Füllungsreste zwischen den 2 Versuchsgruppen. Betrachtet man ausschließlich die Lagerungsdauer, so konnten im mittleren Kanalabschnitt der Wurzeln mit nicht gealtertem Füllmaterial am meisten Rückstände gemessen werden. Dies wurde durch die höhere Haftkraft zwischen Sealer und Guttapercha und der besseren Haftung an der Dentinwand erklärt [37].

Abschließend lässt sich bei dem Vergleich des reziproken Systems, der vollrotierenden Instrumente und der aktiven NiTi-Systeme bezüglich ihrer Revisionseffizienz von Guttapercha aus dem Kanal kein eindeutiges Ergebnis feststellen.

Zur Revisionseffizienz des *F360*-Systems sind keine experimentellen Studien vorhanden.

### **4.3 Die wichtigsten Obturationstechniken im Überblick**

Grundsätzlich lassen sich Warm- und Kaltfülltechniken unterscheiden. Zu den wichtigsten Warmfülltechniken gehören die vertikale bzw. laterale Kondensation, die trägerbasierte thermoplastische Technik (*Thermafil*), die thermomechanische Technik (*McSpadden Compactor*) und die thermische Injektionstechnik (*Obtura*). Die Einstifttechnik (*Single-Cone-Technik*) und die laterale Kondensation sind die am häufigsten verbreiteten Kaltfülltechniken.

## Warmfülltechniken

Bei allen Warmfülltechniken wird die Guttapercha erhitzt und somit thermoplastisch verformt. Die dadurch reduzierte Viskosität erhöht die Fließfähigkeit der Guttapercha, wodurch auch Seitenkanäle des 3D-Kanalsystems mit Guttapercha gefüllt werden können [38]. Somit kann ein größerer Teil des Kanalsystems mit Wurzelfüllmaterial verschlossen werden, als dies mit einer starren Guttapercha bei Verwendung einer Kaltfülltechnik der Fall wäre [30,78]. Durch das Erhitzen der Guttapercha und Einführen in den Wurzelkanal kommt es zu einem Temperaturanstieg an der Wurzelkanaloberfläche, der von koronal nach apikal abnimmt [89,169]. Knochengewebe reagiert ab einer Erwärmung um mehr als 10°C empfindlich, ab einer Temperatur von 60°C kommt es zur Unterbrechung des Blutflusses und zur Nekrose des Knochengewebes [44]. Bei einem starken Temperaturanstieg kann es somit zu einer irreversiblen Schädigung des umliegenden Knochens und Zahnhalteapparats kommen. Es wurden in verschiedenen Studien unterschiedliche Temperaturanstiege bei Verwendung einer Warmfülltechnik gemessen, die von vernachlässigbaren Werten [8,118] bis zu kritischen Werten reichen [61,89]. In der Studie von *Barkhordar et al. (1990)* führte die Anwendung von Sealer zu einem reduzierten Temperaturanstieg am Apex [8]. *Lee et al. (1998)* konnte ohne Verwendung von Sealer und je nach angewandter Warmfülltechnik 6,99°C bis zu 21,43°C Temperaturanstieg in den Versuchsgruppen messen [89], wobei es bei allen unteren Frontzähnen zu einem Temperaturanstieg von über 10°C kam [89]. In der Studie von *Romero et al. (2000)*, mit der Verwendung von Sealer, wurde vergleichsweise nur eine Erwärmung um 1°C am Apex erzeugt [118]. Die Verwendung von Sealer nimmt bei der Warmfülltechnik daher einen besonderen Stellenwert ein, da zudem die Fließfähigkeit der Guttapercha in die Seitenkanäle erhöht wird und eine bessere Abdichtung erreicht wird [38]. Die erhöhte Fließfähigkeit des Materials erfordert jedoch Erfahrung bei der Anwendung und erschwert die Kontrolle über die Arbeitslänge [33], es besteht daher die Gefahr der Extrusion von Sealer und Guttapercha über den Apex [107]. Eine Schrumpfung des Wurzelfüllmaterials nach Abkühlung der Guttapercha und daraus entstehende Hohlräume kann durch die Anwendung eines Verdichtungsinstrumentes, sog. *Plugger*, vorgebeugt werden [100]. Die Warmfülltechniken unterscheiden sich vor allem in Erwärmungsgrad der Guttapercha, der Einbringtechnik und dem Guttaperchaträger. Bei der warmen, vertikalen Kondensationstechnik wird zunächst ein angepasster Masterpoint mit Sealer auf Arbeitslänge eingeführt und anschließend mit einem erhitzten Instrument bis zu 3-4 mm vom Apex entfernt abgeschmolzen [33]. Das

Kanalsystem wird dann mit nachfolgendem Kernmaterial gefüllt. Die nachträgliche Entfernung der apikalen Schicht ist danach schwer möglich. Bei dieser Technik können auch feinste Seitenkanäle mit Sealer gefüllt werden [38]. Eine Modifikation ist die *Continuous Wave-Technik*, hier wird nach Einbringen des Masterpoints dieser bis auf die apikalen 5-7 mm durch Kontakt mit einem erhitzten Instrument entfernt. Anschließend erfolgt die gleiche Rückwärtsfüllung des Kanals mit weiterem Kernmaterial [33]. Die warme laterale Kondensationstechnik verläuft analog der kalten Version mit dem Unterschied, dass hier ein erhitztes Kondensationsinstrument zur lateralen Kompaktion der einzelnen Stifte verwendet wird. Im Vergleich zur vertikalen Variante ist hier eine gute Kontrolle der Arbeitslänge möglich [33]. Eine weitere Variante stellt die *Trägerbasierte Thermoplastische Technik* durch *Thermafil-*, *Successfil-* und *Simplifill-*Systeme dar. Der mit Guttapercha ummantelte Trägerstift wird an der Spitze in einem speziellen Ofen zunächst erhitzt und anschließend in den mit Sealer beschichteten Kanal eingeführt. Anschließend erfolgt die koronale Abtrennung des Trägerendes [33]. Diese Technik führt zu einer schnellen und guten Obturation [30,33]. Es besteht jedoch die Gefahr der Extrusion von Sealer und GP über den Apex [107], zudem ist keine sichere Arbeitslängenkontrolle möglich und es kann zum Ablösen des GP vom Trägerstift vor erfolgter Obturation kommen [33].

Auch bei der *thermomechanischen Technik (McSpadden Compactor)* kann es zur Extrusion von Füllmaterial über den Apex und vorzeitigem, ungewünschtem Ablösen des Materials vom Träger kommen [33]. Hier wird der Masterstift mit Sealer bestückt und in den Kanal eingeführt [33]. Nach erfolgter Kompaktion mit Handinstrumenten erfolgt die Verdichtung mit einem rotierenden Instrument (5.000–10.000 U), welches mit erwärmtem Guttapercha vorbeschichtet ist [33]. Durch den flüssigen Zustand und die erzeugte Reibung zur Kanalwand kann das GP und der Sealer auch Irregularitäten der Kanalwand ausfüllen [33].

Bei der *plastifizierten Guttapercha-Injektionstechnik* wird das Kernmaterial zunächst erhitzt und anschließend in erweichter Form in den Kanal injiziert. *Obtura* und *BeeFill (VDW)* bedienen diese Technik. Nachteilig kann auch hier eine Extrusion des Materials, sowie eine Schrumpfung der Füllung nach Abkühlung erfolgen [33].

### **Kaltfülltechniken**

Bei der kalten, lateralen Kondensationstechnik wird ein auf Arbeitslänge angepasster Masterpoint zusammen mit Sealer in den Kanal eingebracht und mittels

eines Kondensationsinstruments, sog. *Spreader*, seitlich kompaktiert [33]. Anschließend werden weitere Stifte des Kernmaterials von geringerer Größe eingeführt und lateral kondensiert bis zur vollständigen Füllung des Kanals [33]. Diese Kondensationstechnik wird allgemein gelehrt und führt zu guten Ergebnissen [33,55,106]. Es kann jedoch technikbedingt zu einer inhomogenen Füllung mit sealerfreien Bereichen kommen [33,52,176]. Zudem ist diese Verfahrensmethode sehr techniksensitiv [33].

Eine weitere Kaltfülltechnik ist die *Single-Cone-Technik*. Hier wird ein genau auf die Aufbereitungsgröße angepasster Masterpoint zusammen mit einem Sealer in den Kanal geführt und koronal bis auf den Kanaleingang abgeschmolzen [33]. Der hohe Sealeranteil dieser Technik begünstigt Dimensionsänderungen der Wurzelkanalfüllung und kann so, je nach Wahl des Sealers, die Qualität der Wurzelkanalfüllung beeinflussen. Kommt es zu einer Schrumpfung des Sealers können Porositäten in der Wurzelfüllung und folglich undichte Bereiche entstehen [104]. Die Technik führt zu einer nachweislich hohen Fläche an mit Sealer bedeckter Kanalwand im Vergleich zur lateralen Kondensationstechnik [175]. Bei einem Vergleich der Wurzelfüllqualität der beiden kalten Fülltechniken, ist die aktuelle Studienlage nicht eindeutig [106,110,154]. Die Studie von *Figueiredo et al. (2020)* kam zu keinen signifikanten Unterschieden in der Obturationsqualität und apikalen Extrusion von Sealer bei beiden Techniken [48]. Auch in Hinblick auf die Heilung der apikalen Parodontitis bei wurzelgefüllten Frontzähnen zeigen Studien vergleichbare Ergebnisse nach Anwendung der Einstifttechnik und kalten lateralen Kondensationstechnik [34,48]. Nach 12 Monaten lag die Erfolgsrate der Heilung der apikalen Parodontitis zwischen 73% und 78%, unabhängig von der gewählten Obturationstechnik [34]. Die Heilungsrate wurde nur durch den periapikalen Status zu Beginn der Versuche beeinflusst. Den geringen Einfluss der Wurzelfülltechnik auf den Erfolg der Heilung oder das Auftreten von postoperativen Schmerzen in den ersten 24 h konnte auch bei dem Vergleich von kalten mit warmen Fülltechniken belegt werden [77,107].

Vergleicht man die Warmfülltechniken mit den Kaltfülltechniken in Hinblick auf die Wurzelfüllqualität lassen sich widersprüchliche Ergebnisse finden [30,55,78,154]. Eine klare Empfehlung einer Technik ist somit nicht möglich und sollte individuell abhängig von der anatomischen Situation und Erfahrung des Behandlers gewählt werden. Die schnelle und einfache Umsetzung der *Single-Cone-Technik* konnte im klinischen Alltag überzeugen, sodass 49% der Zahnärzte im europäischen Raum diese Technik aktuell anwenden [33].

## 4.4 Aktuelle Studienlage zur Verbesserung der Revisionseffizienz

Durch die Entwicklung von NiTi-Systemen lässt sich heute eine höhere Reinigungseffizienz erzielen, als durch die zuvor verwendeten Handinstrumente aus Edelstahl und NiTi-Feilen. Jedoch konnte bislang kein Instrument gefunden werden, das eine vollständige Reinigung der Kanalwände nach der Revision ermöglicht [17,37,53,59,60,133,134,178]. Besonders im apikalen Abschnitt des Wurzelkanalsystems verblieben nach Revision der größte Anteil an Wurzelkanalfüllmaterialresten [37,47,53,62,73,134].

### 4.4.1 Aufbereitungsgröße

Eine Kanalvergrößerung über die initiale Aufbereitungsgröße im Rahmen der Revisionsbehandlung konnte die Füllungsresiduen nachweislich auch im apikalen Kanalbereich signifikant reduzieren. *Hassanloo et al. (2007)* konnte dies erstmals in seiner Studie belegen [62]. In dieser wurden die Versuchszähne mit *Epiphany* und *Resilon* oder Guttapercha mit *AH Plus* gefüllt und anschließend mit oder ohne Zusatz von Chloroform als Lösungsmittel revidiert. Nach 8 Wochen wurden die Zähne auf die ursprüngliche Aufbereitungsgröße von .04/#45 revidiert und auf Füllungsreste untersucht. Anschließend erfolgte die Vergrößerung auf .02/#55. Für beide Materialien konnten nach dem 2. Revisionsschritt mit oder ohne Chloroform deutlich geringere Füllungsreste ermittelt werden, wobei Chloroform als Lösungsmittel die Rückstände zusätzlich reduzierte [62]. In der Nachfolgestudie von *Rogendorf et al. (2010)* wurde ermittelt, dass dieses sog. „*root canal enlargement*“ bei einer Verwendung von 2 Größen über die ursprüngliche Aufbereitungsgröße hinaus die höchste Reinigungseffizienz aufweist. Schrittweise wurden hier mit *ActivGP* oder *GuttaFlow* gefüllte Wurzelkanäle über die ursprüngliche Aufbereitungsgröße von .04/#40 revidiert und nach jedem Revisionsschritt ausgewertet. Es verblieben nach einer Vergrößerung um 2 ISO-Größen 0,3% Materialreste im Kanal bei zuvor 2-4% Restbetrag nach dem ersten Revisionsschritt [116]. *Rüth (2014)* untersuchte Unterschiede in der Entfernbarkeit konventioneller Sealer im Vergleich zu adhäsiven Sealern bei Vergrößerung des Kanals während der Revision von .04/#40 auf .04/#50. Verglichen wurden *AH Plus*, *Apexit Plus*, *Hybrid Root SEAL* und *GuttaFlow* in Kombination mit *GuttaFlow*-Primer. Die These, dass eine Vergrößerung des Kanals um 2 Größen zu einer signifikanten Reduktion der Füllungsreste führt, konnte auch hier bestätigt werden. *GuttaFlow* zeigte mit 18 % die geringsten Rückstände im apikalen Drittel, dicht gefolgt von *Apexit Plus* mit 19% und *AH Plus* mit 27%. Der adhäsive Sealer *Hybrid Root SEAL* war bei gleicher

Aufbereitungsgröße weniger effizient zu entfernen als die konventionellen Sealer. Es verblieben im apikalen Drittel 31% des Sealers zurück. Bei diesem adhäsiven Sealer wurde die apikale Erweiterung um 2 Größen als nicht ausreichend bewertet [124]. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist der vermehrte Abtrag an Dentin, welcher zu einer Schwächung der Zahnhartsubstanz führt. Zudem besteht bei jeder Anwendung der maschinellen Systeme die Gefahr einer Mikrorissbildung im Dentin und folglich zur Verschlechterung der Prognose des Zahnes [138,157]. In der Dissertation von *Vosen (2013)* wurden verschiedene maschinelle Systeme bezüglich entstehender Dentinrisse während der Aufbereitung untersucht. Die Risszunahme bei schrittweiser Erhöhung der Aufbereitungsgröße war bei allen Feilensystemen signifikant [165]. Des Weiteren konnten die Defekte an der Kanalwand in einer anderen Studie im Rahmen einer Nachbehandlung signifikant häufiger nachgewiesen werden als dies bei der Erstbehandlung der Fall war [137]. In der Studie von *Wilcox et al. (1997)* wurden 34 Versuchszähne nach einer Revisionsbehandlung auf entstandene vertikale Wurzelfrakturen untersucht [173]. Zunächst wurden die Wurzelkanäle mit einer Kanalbreite von 20% der gesamten Wurzelbreite aufbereitet und obturiert. Bei der anschließenden Revision wurden die Kanalwandoberflächen auf vertikale Frakturlinien untersucht. Es folgte eine schrittweise Vergrößerung des Kanaldurchmessers auf 30% von der gesamten Wurzelbreite, 40% und 50%. 5 Wurzeln frakturierten bei 40% und 7 bei 50%. Alle restlichen Versuchszähne ohne nachweisbare vertikale Wurzelfrakturen wiesen Risslinien in der Kanalwand auf. Diese Studie verdeutlicht die Zunahme der Frakturgefahr mit Vergrößerung des Wurzelkanaldurchmessers [173].

#### **4.4.2 Lösungsmittel**

Der Einsatz von organischem Lösungsmittel während der Nachbehandlung soll die Löslichkeit der Füllmaterialien verbessern und dadurch eine leichtere Entfernung von Rückständen ohne zusätzliche Schwächung des Zahnes ermöglichen [131,170]. Es existieren diverse vergleichbare Arbeiten, in denen ein Lösungsmittel während der Revisionsbehandlung verwendet wurde [13,130,131,170,172]. Chloroform ist nach aktueller Studienlage das effizienteste Lösungsmittel zur Entfernung von Guttaperchafüllungen [13,130,131,170,172]. In zahlreichen Studien konnten durch die Anwendung von Chloroform für die Revisionsbehandlung signifikant weniger Materialreste in den behandelten Wurzelkanälen nachgewiesen werden [13,131]. Es verblieben deutlich weniger Materialreste im Kanal als in der Kontrollgruppe ohne Lösungsmittel [13,130,131,170,172]. Zudem konnte durch die



Verwendung von Chloroform eine Verkürzung der Revisionsdauer gemessen werden [172]. Zusätzlich zur besten Löslichkeit von Wurzelkanalfüllmaterialien scheint Chloroform in tieferen Dentinschichten eine antibakterielle Wirkung zu besitzen [40]. Es konnte eine signifikante Reduktion von *E. faecalis* im Kanal bei Verwendung von Chloroform als Lösungsmittel während der Revision nachgewiesen werden. Es gab in 11 von 17 der Versuchszähne keinen Nachweis von *E. faecalis*, im Gegensatz zur Kontrollgruppe mit Salzlösung bei dem in 17 von 17 Testzähnen *E. faecalis* nachgewiesen wurde [40]. Dies stellt einen wichtigen Vorteil in Hinsicht auf die vollständige Ausheilung des apikalen Parodonts dar, wie die Studie von *Gomes BP et al. (2008)* beweist, in der *E. faecalis* als am häufigsten vorkommende Bakterienart in endodontisch behandelten Zähnen im Zusammenhang mit sistierender apikaler Parodontitis nachgewiesen wurde [56]. Dies stellt einen wichtigen Vorteil in Hinsicht auf die vollständige Ausheilung des apikalen Parodonts dar, denn *Gomes BP et al. (2008)* konnte *E. faecalis* als am häufigsten vorkommende Bakterienart in endodontisch behandelten Zähnen im Zusammenhang mit sistierender apikaler Parodontitis nachweisen [56].

Ferner führt die Anwendung von Chloroform während der Revision zu einer Reduktion der Verbundfestigkeit von Adhäsivsystemen am Dentin der Pulpenkammer [35]. Zudem stand in vorherigen Studien zur Diskussion, ob der Erweichungseffekt von Chloroform auf Guttapercha eine unbeabsichtigte Verteilung von GP an den Kanalwänden zur Folge hat. Dies führt zu einem Verschmieren an der gesamten Kanaloberfläche, wobei die Verdunstung des Chloroforms dann den Niederschlag an der Wurzelkanaloberfläche zurücklässt [59,126]. Der so gebildete dünne Film aus Füllmaterialien kann die Anpassung des nachfolgenden Füllmaterials an den Kanalwänden beeinträchtigen [59,126]. Dabei wurde dieser Effekt bei der Verwendung von Chloroform stärker beobachtet als bei Eukalyptusöl, welches sich durch die erhöhte Löslichkeit von GP durch Chloroform erklären lässt [64]. Die Verwendung von Chloroform kann somit die Qualität einer restaurativen Versorgung negativ beeinflussen, eine Reinfektion des Kanalsystems von koronal begünstigen und wie oben angeführt zu einem endodontischen Misserfolg führen [159]. Des Weiteren führt die aggressive und schnellere Lösungswirkung von Chloroform zu einer Verflüssigung des Polyisopren-Anteils im Guttapercha. Erweichtes Füllmaterial kann leichter über das *Foramen apicale* überpresst werden. Dieser Effekt wurde bei der Verwendung von Chloroform stärker nachgewiesen als bei einem Vergleichslösungsmittel, hier Orangenöl und Terpentinöl [81]. Als Folge von extrudierten Debris-, Guttapercha-, Sealer- oder Geweberesten können bei Patienten *flare-ups* in Form von akuten Exazerbationen auftreten [81]. Zur Vermeidung der

unerwünschten Effekte von Chloroform, durch die Einstufung als potentielles Karzinogen [72,170] und dessen zellschädigende Wirkung [7,162], hat Chloroform immer weniger Bedeutung und es wird verstärkt nach geeigneten Alternativen gesucht.

*Hülsmann et al. (2004)* ermittelten die Revisionseffizienz verschiedener rotierender NiTi-Systeme mit oder ohne Hilfe von Eukalyptusöl. Die Verwendung von Eukalyptusöl konnte die Entfernung der Guttapercha-Füllung und das Erreichen der Arbeitslänge beschleunigen [69]. Auch in der Studie von *Hunter et al. (1991)* stellte Eukalyptusöl eine adäquate Alternative zu Chloroform dar. Hier wurde die benötigte Zeit gemessen, die erforderlich war, um 10 mm Tiefe mit einer Handfeile zu erreichen nachdem 1 ml des Lösungsmittels hinzugefügt worden war [72]. Gegenüber Chloroform konnte bei der Anwendung von Eukalyptusöl ausschließlich in Kombination mit *Single Bond 2* eine Reduktion der Haftkraft des Adhäsivsystems zum Pulpakammerdentin ermittelt werden. Der Haftverbund der Adhäsivsysteme *Clearfil SE Bond (CSE)* und *Adper Easy One (AEO)* wurde nicht beeinflusst [35]. Besonders hervorzuheben ist, dass bei Eukalyptusöl als Lösungsmittel die wenigsten unerwünschten Nebenwirkungen beobachtet wurden [131] und antibakterielle, entzündungshemmende Eigenschaften nachgewiesen werden konnten [94]. *Magalhaes et al. (2007)* verglichen Xylol, Orangenöl, Eukalyptusöl, Chloroform und destilliertes Wasser hinsichtlich ihrer Löslichkeit von GP im Kanal. Die Einwirkzeit betrug 2, 5 oder 10 min. Befanden sich die Lösungsmittel 2 min im Kanal konnten keine Unterschiede zwischen den Lösungsmitteln festgestellt werden. Alle konnten die gleiche Menge an Guttapercha aus dem Kanal lösen. Bei Verwendung von Aqua dest. wurde keine Wirkung auf GP nachgewiesen. Chloroform, Orangenöl und Eukalyptusöl zeigten auch bei längerer Einwirkzeit von 5 min und 10 min keine signifikanten Unterschiede [94]. Bei dem Vergleich verschiedener Sealer bezüglich ihrer Entfernbarekeit mittels organischer Lösungsmittel gibt es nach aktueller Studienlage kein eindeutiges Ergebnis. *Bayram et al. (2015)* verglichen Chloroform, *Endosolv-E* und Eukalyptusöl auf die Entfernbarekeit verschiedener Sealer aus dem Wurzelkanal. Dabei betrug die Einwirkzeit 2, 5 oder 10 min. Chloroform war bis auf *RealSeal SE* am effektivsten bezüglich der Löslichkeit aller verwendeter Sealer, unabhängig davon welche Einwirkzeit gewählt wurde [13]. In der Studie von *Martos et al. (2011)* konnte Xylol gefolgt von Chloroform alle Sealer am effizientesten lösen. Orangenöl und Eukalyptusöl wiesen bei 2-minütiger Anwendung jedoch die gleiche Effizienz auf wie Chloroform [97].

Konträr zu dem bisher genannten gibt es Studien die keine Verbesserung der Reinigungseffizienz durch Verwendung von Lösungsmittel während der Revision

feststellen konnten, sowohl bei der Verwendung von Chloroform [5,126] als auch von Eukalyptusöl [24,83].

#### 4.4.3 Ultraschall- und Schallaktivierung

Ultraschall- und Schallgeräte gewinnen in der Endodontologie zunehmend an Bedeutung. Ultraschallgeräte arbeiten entweder mit piezoelektrischen Effekten oder auf der Basis von Magnetostriktion. Ihr Frequenzbereich liegt zwischen 25 und 30 kHz [163]. Es entstehen charakteristische Schwingungsknoten und entgegengerichtete Schwingungsbäuche entlang der Feile [167,168]. Man unterscheidet die ultraschallaktivierte Instrumentierung (UI: *ultrasonic irrigation*) von der passiven Variante der ultraschallaktivierten Spülung (nachfolgend PUI: *passive ultrasonic irrigation*) [163]. Bei der UI erfolgt simultan zur Spülung eine Instrumentierung des Wurzelkanals, indem die Feile bewusst mit der Kanalwand in Kontakt gebracht wird [163]. Bei der PUI wird das Instrument ohne Kontakt zur Kanalwand freischwingbar in den flüssigkeitsgefüllten Kanal eingebracht. Dadurch können ungewünschter Abrieb sowie Formveränderungen der Kanalwand, im Gegensatz zur aktiven Variante, vermieden werden. Zudem konnte eine effizientere Beseitigung von Pulpagewebe bzw. Smear Layer (=Schmierschicht) aus dem Kanal nachgewiesen werden [163]. Die Energie wird bei beiden Varianten in Ultraschallwellen umgewandelt und führt zu akustischen Mikroströmungen und Kavitation in der Spüllösung, vorausgesetzt, die Ultraschallspitze kann frei im Kanallumen schwingen [93,119].

Dies erklärt die besseren Ergebnisse bei Verwendung der passiven Variante. Um diese Bewegungsfreiheit zu erreichen, ist eine vorherige mechanische Instrumentierung zur Entfernung von Wurzelkanalfüllmaterial bzw. Wurzelkanalgewebe nötig [1,95,119]. Da sich die größte Amplitude an der Instrumentenspitze zeigt, sollte der Abstand zur Arbeitslänge gut gewählt werden. So ist bekannt, dass der Reinigungseffekt mit größerem Abstand zum Apex hin abnimmt. Ein maximaler Reinigungseffekt konnte 3 mm von der Ultraschallspitze entfernt und seitlich neben der Feile erreicht werden [95].

Schallaktivierte Geräte schwingen in einem Frequenzbereich von 1000-6000 Hz. In der Flüssigkeit kommt es durch die Energie zu einem Schwingungsknoten an der Spülspitzenbasis und an der Spitze zu einem Schwingungsbauch [163]. Eine große Anzahl von Studien sprechen der PUI eine bessere Reinigungseffizienz während der Wurzelkanalaufbereitung zu [57,99,105]. Dies lässt sich durch die niedrigere Frequenz und daraus resultierende geringere Strömungsgeschwindig-

keit bei Schallaktivierung erklären [163]. Ein genauer Vergleich ist jedoch von der Feilengeometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Spülspitzen abhängig [92]. Der positive Effekt der passiven ultraschall- bzw. schallaktivierten Spülung zur Entfernung organischer Materialreste, Debris und Mikroorganismen aus dem Wurzelkanal, konnte bereits ausreichend bewiesen werden [29,101,125]. Hierbei wird durch die schnelle und andauernde Bewegung der Spüllösung der Kontakt zur Kanaloberfläche vergrößert und somit zugleich dessen positiver Effekt durch seine chemischen und physikalischen Eigenschaften. Außerdem erwartet man durch die Ultraschall- und Schallaktivierung ein leichteres Eindringen der Spüllösung in schwer erreichbare Abschnitte wie z.B. das apikale Kanaldrittel. Verschiedene Studien belegen auch eine effizientere Kanalreinigung durch die zusätzliche Verwendung von passiver Schall- und Ultraschallaktivierung während einer Revisionsbehandlung [15,58,98,171].

Die direkte Schall- und Ultraschallaktivierung von Lösungsmittel zur Verbesserung der Revisionseffizienz ist experimentell nicht ausreichend untersucht. In der Studie von *Cavenago et al. (2014)* wurde nachgewiesen, dass durch die zusätzliche PUI und vorherige Verwendung von Lösungsmittel nach mechanischer Revision mehr Wurzelfüllmaterial entfernt werden konnte als ohne [27]. Dabei wurde zunächst die Aufbereitungsgröße von ISO 25 .04 auf ISO 40 .04 vergrößert und Xylol zur Lösung der Guttapercha und der *AH Plus*-Reste in den Kanal gegeben. Nach anschließender Kanaltrocknung erfolgte die PUI mit 2.5% NaOCl. Eine direkte Aktivierung des Lösungsmittels erfolgte nicht [27]. *Trevisan et al. (2017)* untersuchten den Effekt der direkten Aktivierung von Lösungsmittel auf die Entfernbareit verschiedener Sealer im Kanal [160]. Hier wurde in der Versuchsgruppe mit *AH Plus* und in der Vergleichsgruppe mit *Endofill* gefüllt. Anschließend erfolgte die Unterteilung in jeweils 2 Gruppen, mit der Verwendung von Orangenöl als Lösungsmittel in einer Gruppe und Eukalytusöl in der anderen. Diese Gruppen wurden wiederum in 7 Untergruppen unterteilt in denen unterschiedliche Aktivierungsdauer des Lösungsmittels getestet wurden. Bei einer Gruppe wurde die Aktivierung unterlassen und stattdessen eine 5-minütige Einwirkzeit des Lösungsmittels gewählt. Die Aktivierung erfolgte durch einen piezoelektrisch-betriebenen Ultraschall mit adaptierter *K-Feile* ISO 15. Zur Auswertung wurde die Differenz zwischen dem initialen und dem finalen Gewicht des Sealers ermittelt. Unabhängig von der Verwendung der Lösungsmittel, konnte *Endofill* deutlich besser entfernt werden als *AH Plus*. Weder die unterschiedlichen Aktivierungszeiten, noch die Wahl des Lösungsmittels beeinflussten das Auswertungsergebnis von mit *AH Plus* gefüllten Kanälen signifikant [160]. *Muller et al. (2013)* ermittelten die Wirkung von ultraschallaktiviertem

*Endosolv R* als Lösungsmittel von Guttapercha mit *AH Plus* gefüllten Versuchszähnen gegenüber der Vergleichsgruppe mit ultraschallaktiviertem destilliertem Wasser. Zuvor wurden die wurzelgefüllten Zähne mit dem *ProTaper-Universal*-System revidiert und die initiale Aufbereitungsgröße von ISO 35 auf ISO 50 vergrößert. Die anschließende Aktivierung von *Endosolv R* bzw. der Kontrollgruppe ergab keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Effizienz beider Gruppen und der Anwendung der Lösungsmittel ohne Ultraschall [103].

*Kleye (2014)* revidierte zunächst die Versuchszähne in einem ersten Revisions-schritt mit 2 verschiedenen Revisionssystemen einmal mit und einmal ohne Eukalyptusöl. Im zweiten Revisions-schritt erfolgte die Aktivierung des Lösungsmittels entweder mittels *Endovator* oder mittels Aktivierung von NaCl durch das *EndoExpress-System*. Die Verwendung der unterschiedlichen Revisionssysteme hatte einen starken Einfluss auf den Erfolg der Ultraschallaktivierung des Lösungsmittels. So erzielte die Verwendung des *RaCe*-Systems den gesamten Kanal betrachtet ein deutlich schlechteres Ergebnis (mit 20,8% bedeckter Kanaloberfläche) gegenüber der Verwendung des *Mtwo*-Systems (mit 9,7% bedeckter Kanaloberfläche). In den Versuchsgruppen ohne Lösungsmittel wurde ein Endergebnis von 9,2% bei der Verwendung des *Mtwo-Systems* und von 7,1% bei der Verwendung des *RaCe-Systems* erreicht [83].

## 5 Zielsetzung und Arbeitshypothesen

Ziel dieser In-vitro-Studie war es, eine praxistaugliche und effiziente Methode zu ermitteln, die gegenüber vorangegangenen Studien eine Therapiealternative zur Vergrößerung der ursprünglichen Aufbereitungsgröße darstellt. Dabei sollte das *F360*-System unter Beibehaltung der ursprünglichen Aufbereitungsgröße auf seine Revisionseffizienz überprüft werden. Bislang war dieses System ausschließlich für die initiale maschinelle Wurzelkanalbehandlung indiziert. Dafür wurden die Versuchszähne nach dem ersten Revisionsschritt durch das *F360*-System mit dem Digitalmikroskop *VHX Keyence 5000* auf Guttapercha- und Sealerreste untersucht.

Zudem sollten drei verschiedene Aktivierungstechniken untereinander und gegenüber der alleinigen Verwendung von Eukalyptusöl bezüglich ihres Nutzens zur zusätzlichen Entfernung von Füllungsresten in einem 2. Revisionsschritt verglichen werden. Im Vergleich wurden eine Schallspitze, die *SF65* im *SONICflex*-Handstück, ein Ultraschallansatz, die *IRRI S* im *OS30-WK*, und ein mechanisch betriebenes Instrument, die *CanalBrush* im *EndoPilot*, verwendet.

Um eine Aussage treffen zu können, ob eine signifikante Verbesserung erzielt werden konnte, wurden die ermittelten Wurzelfüllmaterialreste nach den erfolgten Aktivierungstechniken mit den Werten nach dem ersten Revisionsschritt verglichen und die Differenz ermittelt.

Zusammengefasst sind folgende Ziele dieser Studie:

1. Die Überprüfung des *F360*-Systems auf seine Revisionseffizienz
2. Die Bewertung des Effekts von Eukalyptusöl mit oder ohne Aktivierung nach erfolgter Revision
3. Die Ermittlung der effizientesten unter den genannten Aktivierungstechniken und die Abwägung von deren Nutzen für die Behandlung
4. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse als minimalinvasive Alternative gegenüber der intentionellen Erhöhung der Instrumentierungsgröße

Dabei wurden die folgenden **Arbeitshypothesen** aufgestellt:

**Arbeitshypothese 1**

Die Revisionstechniken zeigen signifikante Unterschiede hinsichtlich der Reinigungseffizienz.

**Arbeitshypothese 2**

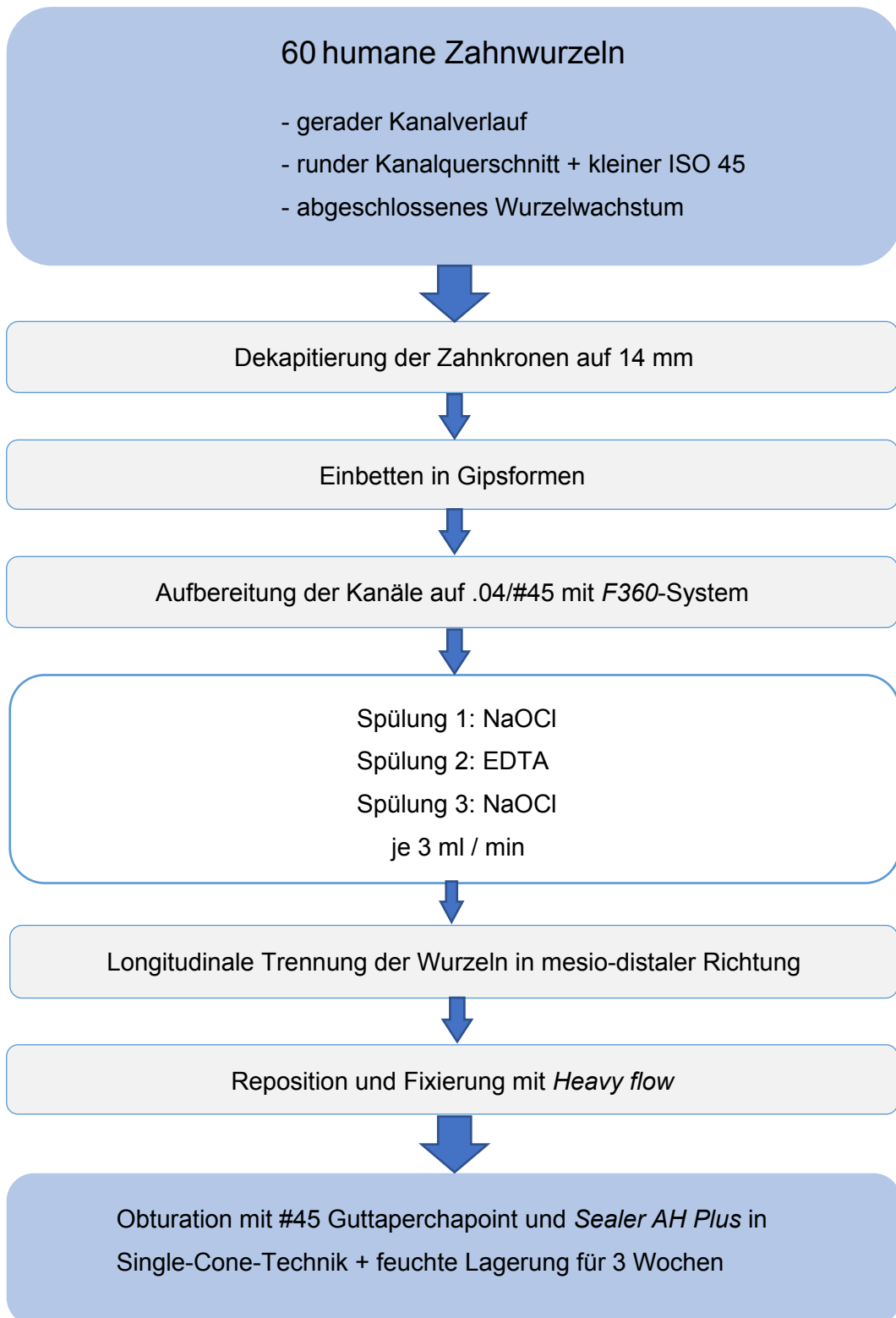
Die zusätzliche Aktivierung von Lösungsmittel in einem zweiten Revisions-schritt zeigt eine signifikante Verbesserung der Revisionseffizienz.

**Arbeitshypothese 3**

Die Aktivierung von Lösungsmittel bewirkt in allen Techniken eine Steigerung der Revisionseffizienz im Vergleich zur Verwendung des Lösungsmittels ohne Aktivierung.

## 6 Material und Methoden

### 6.1 Vorbereitung der Proben



**Abbildung 1:** Vorbereitung der Probenzähne



Für die *In-vitro*-Studie wurden 60 humane, extrahierte Zähne verwendet, die zuvor in isotonischer Natriumchloridlösung (0,9%) (Universitätsklinikum Marburg, im folgenden NaCl) gelagert waren. Es wurden ausschließlich Wurzeln von Prämolaren, Molaren und Frontzähne ausgewählt, die folgenden Kriterien entsprachen:

- permanente Zähne
- abgeschlossenes Wurzelwachstum
- keine bereits erfolgte Wurzelkanalbehandlung
- runder Kanalquerschnitt
- Kanalquerschnitt geringer als ISO 45
- gerader Kanalverlauf
- Wurzellänge mindestens 14 mm

Die ausgewählten Zähne wurden zunächst mittels *Handscaler* (Carl Martin GmbH, Solingen) gründlich von anhaftenden Geweberesten und Konkrementen befreit und in isotonischer NaCl-Lösung gelagert. Danach erfolgte die Trepanation der Zähne durch einen Diamantbohrer mittlerer Körnung (Komet Dental, Gebr. Braseler GmbH & Co. KG, Lemgo) in einem roten Winkelstück (KaVo, Biberbach). Die Kanäle wurden mit *C-Pilot*-Feilen der Größen ISO 06 bis ISO 15 (VDW GmbH, München) auf Gängigkeit geprüft und Zähne mit ovalem Querschnitt, verzweigten Kanalöffnungen oder mehrzähligen Wurzelkanälen entfernt. Bei den Molaren erfolgte die Separation der einzelnen Wurzeln mittels diamantierter Trennscheibe ISO 100 (Komet Dental) und Handstück (KaVo). Um die Arbeitslänge von 13 mm für jeden Zahn standardisiert festzulegen, wurde nun eine C-Feile ISO 15 (VDW GmbH) bis zur sichtbaren apikalen Penetration geschoben und anschließend durch 1 mm verkürzt. Daraufhin erfolgte eine koronale Kürzung aller Zähne auf eine entsprechende Gesamtlänge von exakt 14 mm mittels *Trimmer HS 88* (Wassermann GmbH, Hamburg). Anschließend wurden alle Wurzelaußenflächen mit *Aislar* (Heraeus Kulzer GmbH, Hanau) isoliert und in vertikaler Lage in einer Silikonform (Xenos, Marburg) positioniert. Diese wurde daraufhin mit Modellhartgips ausgegossen, sodass die unteren 2/3 des Zahnes gefasst waren.

## **6.2 Wurzelkanalaufbereitung**

Nach Anlegen eines initialen Gleitpfades mit *K*-Feilen bis ISO 20 (VDW GmbH), erfolgte die Aufbereitung mit dem *F360-System* (Komet Dental) gemäß Herstellerangaben mit einem *Endomotor* (*Endo-it professional*, VDW) bei 300 UPM und 180

gcm. Es wurde dabei die *Crown-Down-Technik* bis auf ISO 04/#45, bei Einhaltung der Arbeitslänge von 13 mm, angewandt. Hierbei wurde nach jeder Instrumenten-größe mit einer *C-Feile* ISO 15 rekapituliert und regelmäßig mit *Aqua bidest* (= destilliertem Wasser) (Universitätsklinikum Marburg) gespült. Bei der Kanalinstrumentierung wurde besonderen Wert auf den Erhalt der runden Kanal Anatomie gelegt. Anschließend wurde durch erneutes Vorschieben einer *C-Feile* ISO 15 (VDW) über das Foramen physiologicum der Verlauf des Wurzelkanals durch einen Minenbleistift (Staedtler Mars GmbH & Co. KG, Nürnberg) an der Wurzelaußenfläche in mesio-distaler Richtung gekennzeichnet. Dies diente der besseren Orientierung um mit einer diamantierten Trennscheibe (Komet Dental) der Größe ISO 065 in mesio-distaler Richtung in der Kanalmitte Sollbruchstellen zu schaffen. Daraufhin konnten die Zahnwurzeln durch ein Skalpell (B.Braun, Tuttlingen) separiert werden umso später nach Durchführung der Versuche verbliebenes Füllungsmaterial beurteilen zu können. Zur Versuchsdurchführung mussten die Zahnhälften jedoch zunächst wieder reponiert werden. Dies wurde direkt im Anschluss mit fließfähigem, universellen Nano-Hybrid-Füllungsmaterial (*Heavy Flow*, Ivoclar Vivadent) und mit Hilfe der hergestellten Gipsform durchgeführt. Die Lichthärtung erfolgte je 40 sec mit einer Polymerisationslampe (*Elipar*, 3M Espe, Neuss). Abschließend wurden die Zähne mit einem formkongruenten Guttaperchastift .04/#45 (Komet Dental) in 2 Ebenen geröntgt und bei sichtbaren Forminkongruenzen ausgemustert und durch neue Zähne ersetzt.

### 6.3 Wurzelkanalfüllung

Zu Beginn musste die bei der Aufbereitung und Trennung entstandene Schmier-schicht entfernt werden. Dabei wurde folgendes Spülprotokoll eingehalten:

**Tabelle 1:** Spülsequenz vor Wurzelkanalfüllung, nach Revisionsschritt 1 und nach Revisionsschritt 2

Spüllösung	Spülvolumen	Spülzeit
Natriumhypochlorit 3%	3 ml	1 min
EDTA 17% (Ethylendiamintetraessigsäure)	3 ml	1 min
Natriumhypochlorit 3%	3 ml	1 min

Dann wurde jeder Zahn mit Papierspitzen .04/#45 (Komet Dental) gründlich getrocknet und in der passenden Gipsform positioniert. Die Wurzelkanalfüllung aller 60 Zähne, erfolgte einheitlich mit je einem Guttaperchastift .04/#45 und dem Sealer

*AH Plus Jet* (Dentsply DeTrey, Konstanz) in *Single-Cone-Technik*. *AH Plus Jet* ist ein Wurzelkanalfüllungsmaterial auf Epoxid-Amin-Polymer-Basis. Eine Doppelspritze enthält zu je gleichen Anteilen der Paste A und der Paste B mit folgenden Inhaltsstoffen:

**Tabelle 2:** Inhaltsstoffe Sealer *AH Plus Jet*-Doppelkartuschenspritzen

Paste A	Paste B
Bisphenol-A-Epoxidharz, Calciumwolframat, Zirkoniumoxid, Aerosil, Eisenoxid	Aminoadamantan, Dibenzyl-Diamin, Tricyclodecan-Diamin, Calciumwolframat, Zirkoniumoxid, Aerosil, Silikonöl

**Tabelle 3:** Inhaltsstoffe der Guttaperchaspitzen

Guttaperchaspitzen
Guttapercha, Zinkoxid, Bariumsulfat, Wachsen, Kunststoffe, Farbstoffe



**Abbildung 2:** Guttapercha-Stifte .04/#45 des *F360*-Systems (Komet Dental, Lemgo)

Die Guttaperchaspitzen (Abb. 2) setzen sich aus Guttapercha, Zinkoxid, Bariumsulfat, Wachsen, Kunststoffen und Farbstoffen zusammen, wobei Guttapercha der Milchsaft einer tropischen Baumart (*Palaquium gutta*) in Südostasien und Südafrika ist. Initial wurden die Kanalwände mittels eines *Lentulos ISO 25* (VDW) in einem grünen Winkelstück (Kavo) maschinell gleichmäßig dünn mit Sealer beschickt und anschließend durch einen mit Sealer ummantelten Guttaperchastift

gefüllt. Hierbei lag besonderes Augenmerk auf der Klemmpassung („tug back“) und der exakten Arbeitslänge des Guttaperchastifts. Mit einem erhitzten *Heidemannspatel* (Aesculap, Tuttlingen) erfolgte dann die Abtrennung der Gutta-perchaspitzen bis zum Kanaleingang und anschließend die gering vertikale Kompaktion mittels *Plugger* (Aesculap). Um die klinische Situation zu simulieren und eine ausreichende Festigkeit des Sealers zu gewährleisten wurde, nach der Säuberung der Kanalwände von Sealerresten durch ein Schaumstoffpellet *Pele Tim* (Voco GmbH, Cuxhaven), die Kanäleingänge mit *Telio CS Inlay* (Ivoclar Vivadent) verschlossen und im Anschluss 3 Wochen feucht gelagert (37°C /100% Luftfeuchtigkeit). Zuvor wurden die Versuchszähne röntgenologisch auf Homogenität und Qualität der Wurzelfüllung überprüft und gegebenenfalls ersetzt.

#### 6.4 Revisionschritt 1

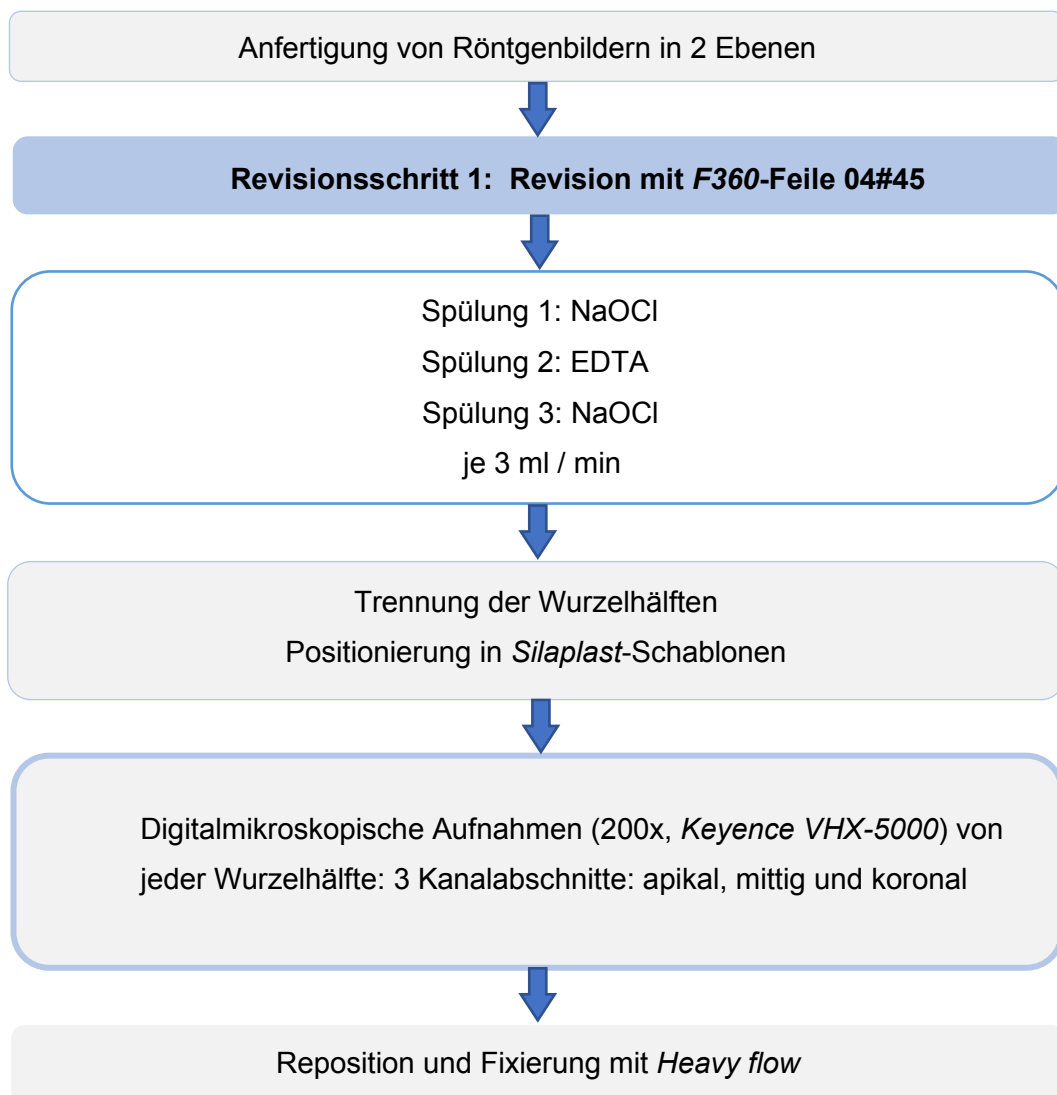
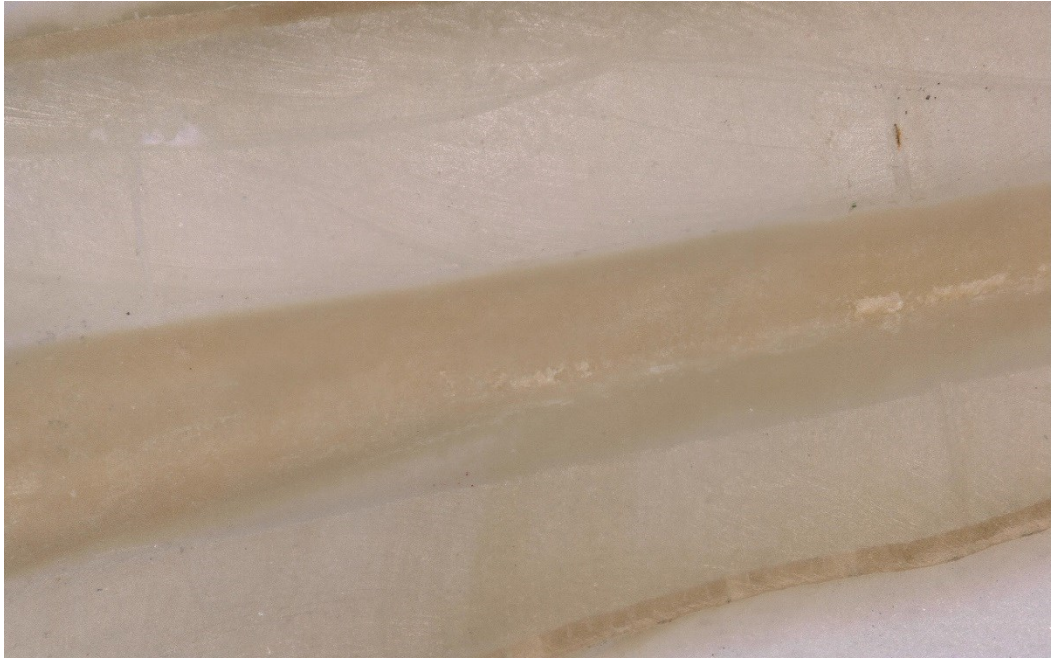


Abbildung 3: Revisionschritt 1

Nachdem der *Telio CS Inlay*-Verschluss entfernt wurde, konnte die Revision der Wurzelkanalfüllung durch das bereits verwendete *F360*-Feilensystem mit einem *VDW.Silver* Endomotor durchgeführt werden. Hierbei kam im Gegensatz zur Aufbereitung nur die Feile der Größe ISO 45 zur Anwendung. Als Einstellung wurde eine Umdrehung von  $500 \text{ U} \times \text{min}^{-1}$  bei einem Drehmoment von  $100 \text{ g cm}$  gewählt. Um gelöstes Material zu beseitigen und eine Verblockung zu vermeiden, wurde während der Reinstrumentierung mit 3%igem NaOCl gespült. Nachdem die volle Arbeitslänge erreicht war und kein Obturationsmaterial mehr bei voller Arbeitslänge aus dem Kanal entfernt werden konnte, wurde abschließend eine Wechselspülung mit NaOCl und EDTA, entsprechend dem Spülprotokoll Tab. 1 durchgeführt. Zur Trocknung der Kanäle wurden Papierspitzen .04/#45 verwendet. Während der gesamten Revision wurde besonders beachtet, dass die Instrumentierung zu keiner Vergrößerung des Kanalquerschnittes führte. Bei ersten Abnutzungerscheinungen der *F360*-Feile wurde diese erneuert. Zur Lagerung der Zähne wurde ein mit NaOCl befeuchtetes Schaumstoffpellet in das Dappenglas hinzugefügt.

## **6.5 Digitalmikroskopische Aufnahme 1**

Alle 60 Zähne wurden durch Entfernung des Komposits an ihrer mesio-distalen Trennstelle in ihre 2 Hälften zerlegt. Jede Hälfte wurde nun in horizontaler Lage nebeneinander in einer Repositionsschablone aus *Silaplast* (Detax, Ettlingen) fixiert. Dies erfolgte unter einem Lichtmikroskop (Leica Zoom-System *Z6 Apo*, Leica, Wetzlar) für eine bestmögliche Einsicht auf alle Kanalwände einer Wurzelhälfte in der weiteren Versuchsdurchführung. Außerdem wurden unter dem Lichtmikroskop mit Hilfe eines Lineals jeweils eine Wurzelhälfte in je 3 Kanalabschnitte zu je 3 mm eingeteilt und mit einem Skalpell Markierungen gesetzt. Daraus erfolgte vom Foramen physiologicum ausgehend, ein apikaler Abschnitt, ein mittlerer Abschnitt und ein koronaler Abschnitt zu je 3 mm. Dem entsprach auch die spätere Einteilung der Aufnahmen in die linke Wurzelhälfte A und die rechte Wurzelhälfte B, in je eine apikale, mittlere und koronale Aufnahme in 3 dimensionaler und 2 dimensionaler Ausführung (Abb. 4 und 5).



**Abbildung 4:** Beispielaufnahme eines mittleren Kanalabschnitts einer Wurzelhälfte in 2D-Darstellung



**Abbildung 5:** Beispielaufnahme eines mittleren Kanalabschnitts einer Wurzelhälfte in 3D-Darstellung

Um im weiteren Versuchsablauf alle Sealerreste eines Kanalabschnittes exakt bestimmen zu können, wurden die Aufnahmen jedes Kanalabschnitts einzeln durch das Digitalmikroskop in 200facher Vergrößerung durchgeführt. Die Aufnahmebereiche konnten dabei für jeden Kanalabschnitt manuell festgelegt werden. Abschließend wurden die Wurzelhälften wieder mit Hilfe der Gipsformen und *Heavy Flow* exakt reponiert und in den Gipsformen positioniert.

## 6.6 Revisionschritt 2

Die 60 Zähne wurden nun randomisiert in 4 Gruppen zu je 15 Zähnen eingeteilt, die jeweils anderen Aktivierungstechniken unterzogen wurden.

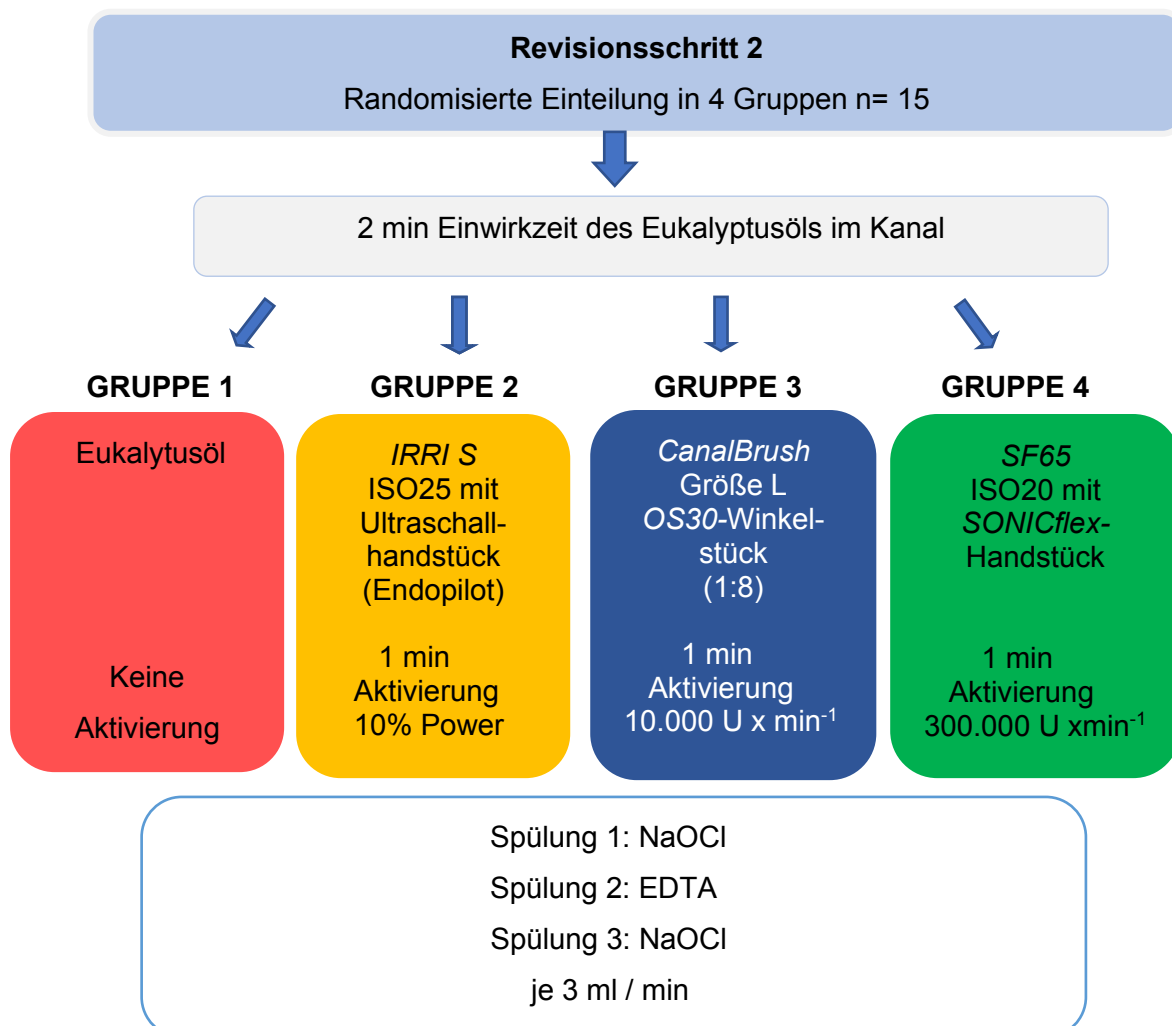
Es ergab sich folgende Gruppenzuordnung:

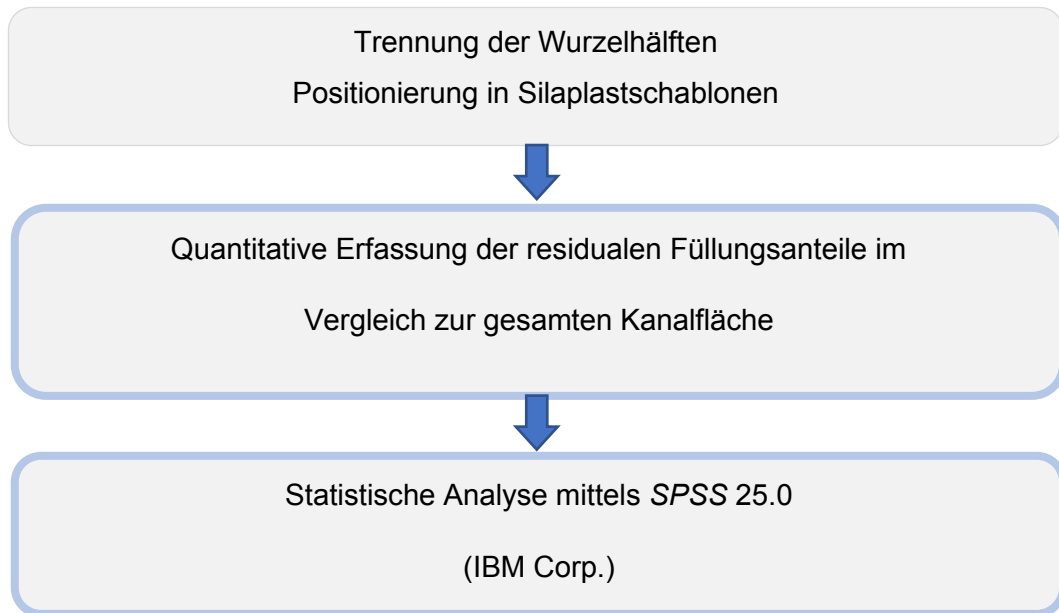
Gruppe 1: Eukalyptusöl (Abb 9)

Gruppe 2: Eukalyptusöl mit *IRRI S* im *EndoPilot* (Abb 10)

Gruppe 3: Eukalyptusöl mit *CanalBrush* im OS 30-Winkelstück (Abb 11)

Gruppe 4: Eukalyptusöl mit *SF65* im *SONICflex*-Handstück (Abb 12)





**Abbildung 6:** Revisionsschritt 2

### Verwendete Materialien zur Aktivierung



**Abbildung 7:** IRRI S-Ultraschallfeile mit entgratetem K-Feilen-Design



Die *IRRI S-Feile* (VDW) ist eine Ultraschallfeile für passive ultraschallgestützte Spülung mit geglättetem Draht. Durch sie soll, gemäß Herstellerangaben, durch ultraschallbedingte Effekte wie Mikroströmung und Bläschenbildung durch Kavitation die Schmierschicht entfernt werden und eine Spülaktivierung ohne Dentinabtrag erfolgen. Die *IRRI S* ist in den Längen 21 mm und 25 mm mit je der Größe ISO 25 erhältlich [68].



**Abbildung 8:** *CanalBrush*, eingespannt im OS30-Winkelstück

Die *CanalBrush* (ROEKO, Coltène Whaledent, Langenau) ist ein flexibles Mikrobürstchen aus Polypropylen (Abb. 10). Laut Gebrauchsanweisung kann sie manuell oder maschinell verwendet werden, wobei die Verwendung im Winkelstück mit maximal  $600 \text{ U/min}^{-1}$  als effizienter beschrieben wird. Die *CanalBrush* ist ein Einzelprodukt, dass bei Kontakt mit den Wurzelkanalwänden verdreht und als verbraucht gilt. Verwendung findet sie zum Lösen von Dentinspäne, Belägen und Verunreinigungen im Kanal. Es sind folgende Größen vorhanden: S = .04/#25, M = .04/#30, L = .04/#35. Hier wurde Größe "L" verwendet.

Die *SF65-Feile* (Komet Dental) ist eine hochflexible NiTi-Spitze mit Titan-Nitrid-Oberflächenbeschichtung (Abb. 9). Um ungewollten Abtrag an der Kanalwand zu vermeiden, hat sie keine Verzahnung und die Instrumentenspitze ist nicht schneidend. Laut Herstellerangaben wird bei dieser schallaktivierten Spülung durch Mikroströmungen und schallaktivierte Bewegung die Wirkung der Spüllösung erhöht. Pulpareste, Bakterien, Schmierschichten und Dentinspäne im Kanal sollen so entfernt werden. Die *SF65* hat eine Größe von ISO 20 [66].



**Abbildung 9:** SF65-Nickel-Titan-Schallspitze mit goldfarbener TiN-Beschichtung und Längenmarkierungen bei 18, 20 und 22 mm (Komet Dental, Lemgo)

### **Durchführung der Versuche**

Bei allen Gruppen wurde zunächst 2 min lang Eukalyptusöl als Lösungsmittel in den Kanal gegeben. Während dieser Zeit war der Kanal durchgehend und vollständig mit Eukalyptusöl bedeckt. Die verwendete Menge an Lösungsmittel wurde nicht kontrolliert. In Gruppe 1 wurde das Eukalyptusöl für 1 weitere Minute im Kanal belassen. In Gruppe 2 erfolgte exakt nach Ablauf der 2 min die Aktivierung des Lösungsmittels mit einer *IRRI S*-Feile im *EndoPilot* (Schumböhm) mit Ansatz (Satelec Acteon) gemäß Herstellerangaben (Programmeinstellung: Power 10%, Laufzeit 30 s). Nach 30 s Aktivierung wurde der Kanal erneut vollständig mit Eukalyptusöl gefüllt und durch weitere 30 s aktiviert. Die gesamte Aktivierungszeit betrug demnach 1 min. In Gruppe 3 wurde die Aktivierung mittels *CanalBrush* im OS30-Winkelstück (Umsetzung 1:8) mit  $10.000 \text{ U} \times \text{min}^{-1}$  durchgeführt. Nach jedem Zahn wurde eine neue *CanalBrush* verwendet, um eventuellen Formveränderungen nach der Verwendung vorzubeugen. In Gruppe 4 wurde das Lösungsmittel im Kanal mit einer *SF 65* im *SONICflex*-Handstück (*LUX 2000L*, KaVo) bei  $300.000 \text{ U} \times \text{min}^{-1}$  aktiviert. Anschließend wurde ebenfalls analog zu Gruppe 2 vorgegangen. Bei allen Gruppen wurden exakt nach Ablauf der 3 min eine Wechselfspülung mit NaOCl und EDTA gemäß dem Spülprotokoll Tab. 1 durchgeführt. Abschließend

erfolgte die absolute Trocknung der Kanäle mit Papierspitzen .04/#45 und die Lagerung nach bereits oben beschriebener Weise. Um eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen, wurde jedes Instrument bis auf Arbeitslänge eingeführt und eine Amplitude um 2-3 mm kürzer als die Arbeitslänge festgelegt. Bei Abnutzungserscheinungen wurde das Instrument sofort ausgetauscht. Besonderes Augenmerk lag auf der richtigen Handhabung der Instrumente, die einen Abrieb an den Kanalwänden und damit einhergehende Veränderungen der Kanal Anatomie verhindern sollte. Das weitere Vorgehen entsprach dem von Gruppe 2.

**Tabelle 4:** Versuchsdurchführung innerhalb der Gruppen

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
<b>Passive Einwirkzeit des Eukalyptusöls</b>	3 min	2 min	2 min	2 min
<b>Aktivierungszeit des Eukalyptusöls</b>	keine	<b>30 s &gt;</b> Erneuerung des Eukalyptusöls <b>&gt; 30 s</b>	<b>30 s &gt;</b> Erneuerung des Eukalyptusöls <b>&gt; 30 s</b>	<b>30 s &gt;</b> Erneuerung des Eukalyptusöls <b>&gt; 30 s</b>
<b>Aktivierungsansatz</b>	entfällt	<i>IRRIS</i> -Feile Größe ISO 25	<i>CanalBrush</i> Größe L	<i>SF 65</i> Größe ISO 20
<b>Einstellung</b>	entfällt	<i>EndoPilot</i> (Schumbrohm) mit Ansatz (Sa-telec Acteon)	<i>OS°30</i> -Win- kelstück (1:8)	<i>SONICflex-Handstück</i> ( <i>LUX 2000L</i> , KaVo)
	entfällt	10 % Power	10.000 U x min <sup>-1</sup>	300.000 U x min <sup>-1</sup>



**Abbildung 10:** Beispielaufnahme eines Kanalabschnitts nach dem 1. Revisions-schritt in 200x Vergrößerung



**Abbildung 11:** Beispielaufnahme eines Kanalabschnitts nach dem 2. Revisions-schritt und Aktivierung mit *SF65* in 200x Vergrößerung

## 6.7 Digitalmikroskopische Aufnahmen 2 und Flächenmessung

Nach erneuter Trennung jedes Zahnes in seine 2 Wurzelhälften und Positionierung in die bereits verwendete *Silaplast*-Schablone, erfolgte von jedem Kanalabschnitt jeder Wurzelhälfte erneut eine Aufnahme durch das Digitalmikroskop *VHX 5000* in 200facher Vergrößerung in 3 D- und 2 D-Ausführung. Hierbei konnten die äquivalenten Aufnahmebereiche des jeweiligen Kanalabschnittes durch die zuvor gesetzten Markierungen und Fixation in der Schablone verwendet werden. Dadurch konnte ein genauer Vergleich vor und nach der Aktivierung hergestellt werden. Durch die dazugehörige Software wurde nun für jeden Kanalabschnitt der auszumessende Kanal manuell extrahiert und automatisch alle Wurzelfüllmaterialreste durch Helligkeitswerte markiert (Abb. 12). Die durch manuelle Extraktion markierte Gesamtfläche des Kanals entsprach bis auf vernachlässigbare Mikrometer nach 1. und 2. Revisionschritt dem gleichen Wert. Bei markierten Bereichen bei denen es sich nicht um Wurzelfüllmaterialreste handelte z.B. Dentinartefakte wurde die Markierung manuell entfernt.



**Abbildung 12:** Beispielaufnahme in 200x Vergrößerung

links oben: Extraktionsbereich, rechts oben – links unten:

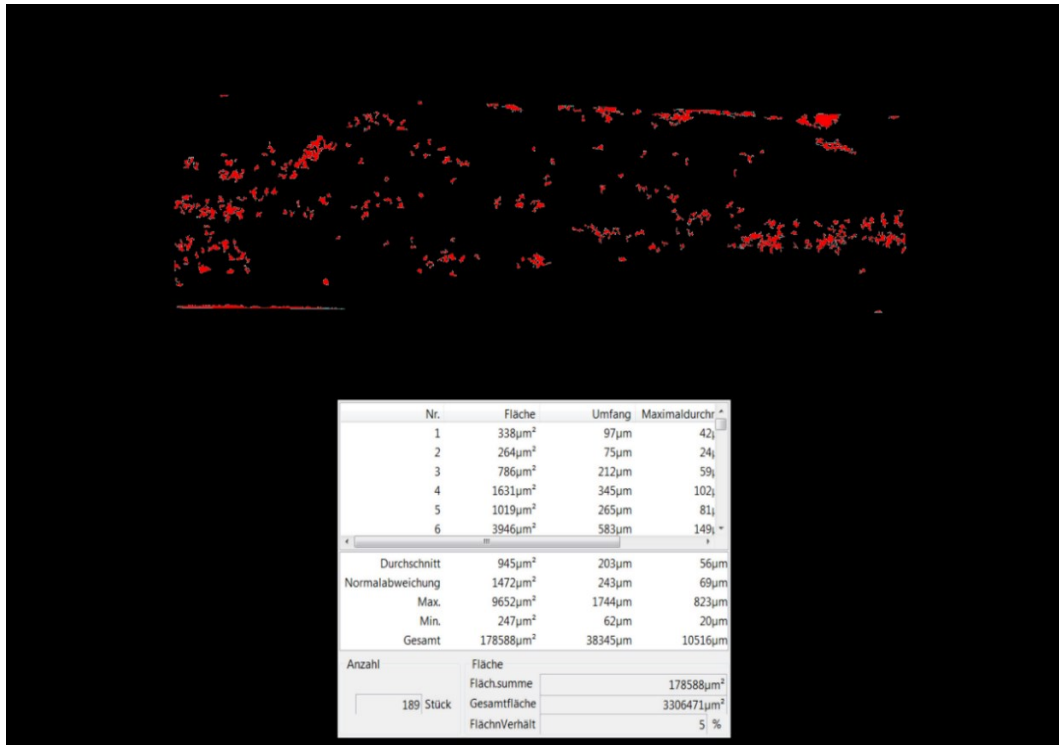
Markierung der Sealereste. Darstellung unterschiedlicher Helligkeitswerte



Da der Anteil der Guttapercharesten zu vernachlässigen war, wurden alle Wurzelkanalfüllungsreste zusammengefasst. Daraus wurde automatisch das prozentuale Flächenverhältnis zwischen der markierten Kanalgesamtläche und der Flächen-summe aller Wurzelkanalfüllreste ermittelt (Abb.13 und 14). Diese Kalkulation erfolgte für jeden Kanalabschnitt jeder Wurzelhälfte vor und nach der Aktivierung. Die ermittelten Flächenverhältnisse jedes Kanalabschnittes wurden in einer *Excel*-Tabelle dokumentiert und für die statistische Auswertung gespeichert.



**Abbildung 13:** Beispielaufnahme eines Kanalabschnitts einer Wurzelhälfte in 200x Vergrößerung



**Abbildung 14:** Beispielaufnahme der errechneten prozentualen Wurzelfüllmaterialreste in dem Kanalabschnitt aus Abbildung 13

## 6.8 Statistische Analyse

Die erhobenen Daten wurden mittels SPSS 25.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) statistisch analysiert. Aufgrund der geringen Stichprobengrößen von 15 Versuchszähnen pro Gruppe wurden die Ergebnisse anhand des Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. War der ermittelte p-Wert kleiner als das Signifikanzniveau von 5 %, wurde die Nullhypothese einer Normalverteilung ausgeschlossen. Zunächst wurde eine deskriptive Statistik erstellt und anschließend die gewonnenen Werte anhand statistischer Tests (induktive Statistik) analysiert.

Zur weiteren Auswertung wurden folgende nicht-parametrischen Tests gewählt:

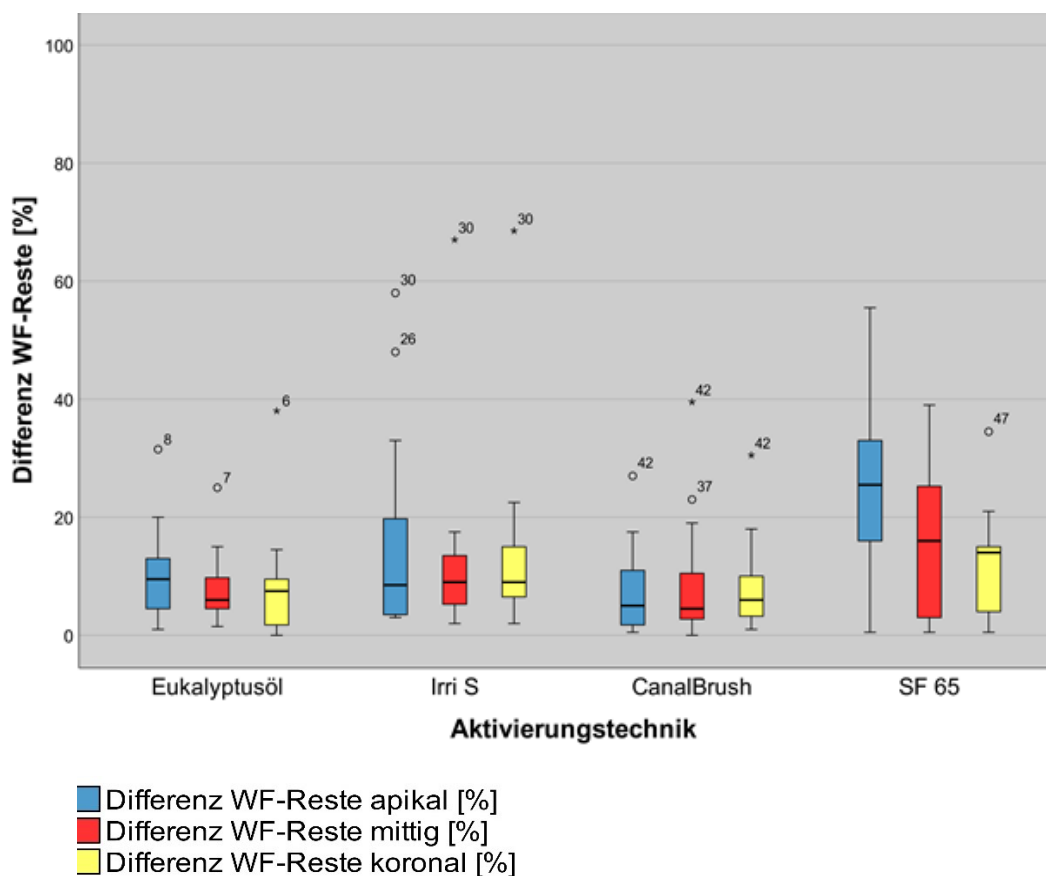
- Kruskal-Wallis-Test
- Wilcoxon-Test
- Mann-Whitney-Test
- Friedman-Test

Das Signifikanzniveau wurde auf  $p = 0,05$  festgelegt

## 7 Ergebnisse

Die Auswertung der verbliebenen Füllungsreste erfolgte separat für jeden Kanalabschnitt nach dem Revisionsschritt 1 und 2. Die Wurzelfüllmaterialreste wurden prozentual zur gesamten Kanalwandoberfläche für jeden Kanalabschnitt angegeben.

Zur Übersicht sind die ermittelten deskriptiven Daten in der Tabellen 1-4 (siehe Anhang) aufgezeigt. Anhand der ermittelten Medianwerte zeigt sich in jedem Kanalabschnitt und in jeder der 4 Gruppen eine Abnahme der Füllungsresiduen nach dem Revisionsschritt 2 im Vergleich zu dem Ergebnis nach dem Revisionsschritt 1 (siehe Anhang Bloxpot-Diagramme).



**Abbildung 15:** Differenz der WF Reste nach den verschiedenen Aktivierungstechniken [%]

In allen Gruppen wurden im apikalen Kanalabschnitt die höchsten Medianwerte an Materialresten festgestellt, vor (Wurzelfüllmaterialreste von 36,5 % bis 42,5 %) und nach erfolgter Aktivierungstechnik (15 bis 33,5 %). Vergleicht man die Medianwerte der zusätzlich durch die Aktivierungstechnik entfernten Materialreste zwischen den Gruppen, konnte in Gruppe 4 durch Aktivierung mit der SF65-Spitze



signifikant mehr Kanaloberfläche von Materialrückständen befreit werden (apikal: 25,5 %, mittig: 16 %, koronal: 14 %). In Gruppe 3 (*CanalBrush*) konnten bei Betrachtung der Medianwerte die schlechtesten Ergebnisse erzielt werden (apikal: 5 %, mittig: 4,5 %, koronal: 6). Anhand eines Boxplot-Diagramms wurde dieser Sachverhalt visuell dargestellt.

## 7.1 Revisions-schritt 1

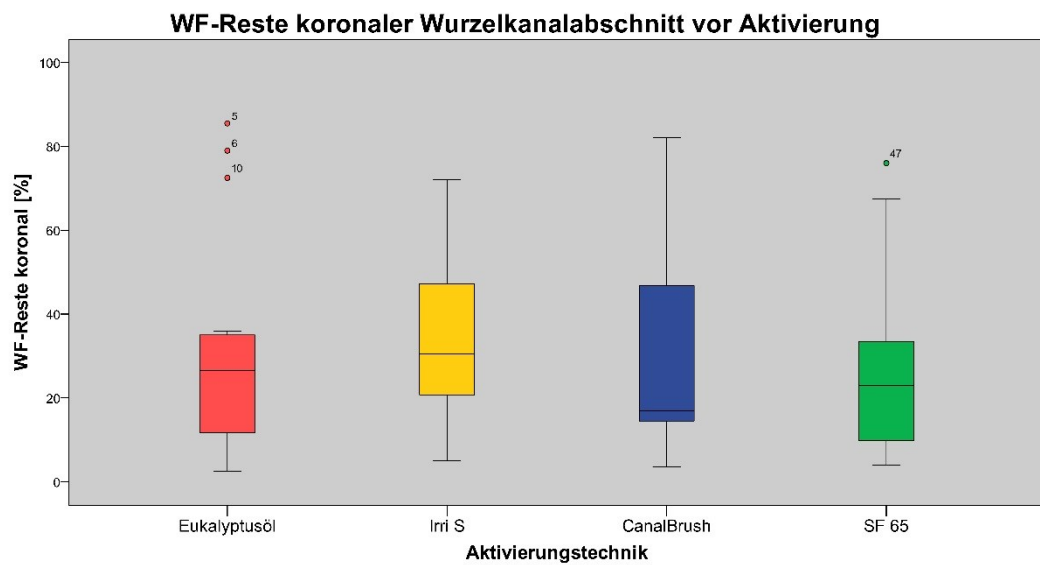
**Tabelle 5:** Ergebnisse nach Revisions-schritt 1

	Ab-schnitt	Mittel-wert (%)	SD (%)	Median-wert (%)	Min. (%)	Max. (%)	IQ (%)	p-Wert (NV)
<b>Gruppe 1</b>	koronal	30,73	27,47	26,50	2,50	85,50	30,00	0,016
	mittig	33,03	22,43	30,50	3,50	82,50	24,50	0,423
	apikal	38,10	19,18	36,50	3,50	85,00	21,00	0,580
<b>Gruppe 2</b>	koronal	36,30	21,87	30,50	5,00	72,00	32,00	0,242
	mittig	34,90	20,24	26,00	3,00	68,00	34,50	0,073
	apikal	41,63	19,97	42,50	13,00	71,00	38,00	0,298
<b>Gruppe 3</b>	koronal	31,80	23,50	17,00	3,50	82,00	36,50	0,059
	mittig	31,33	16,81	26,00	8,50	60,50	24,00	0,242
	apikal	41,43	17,08	38,00	6,50	76,50	22,00	0,981
<b>Gruppe 4</b>	koronal	27,37	21,85	23,00	4,00	76,00	25,00	0,046
	mittig	28,20	22,39	20,50	1,00	67,50	46,00	0,123
	apikal	39,83	19,48	40,50	1,00	66,00	30,50	0,307

(SD= Standardabweichung, IQ= Interquartilbereich, p-Wert = Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert bei einem Signifikanzniveau von 5%)

### Koronaler Kanalabschnitt

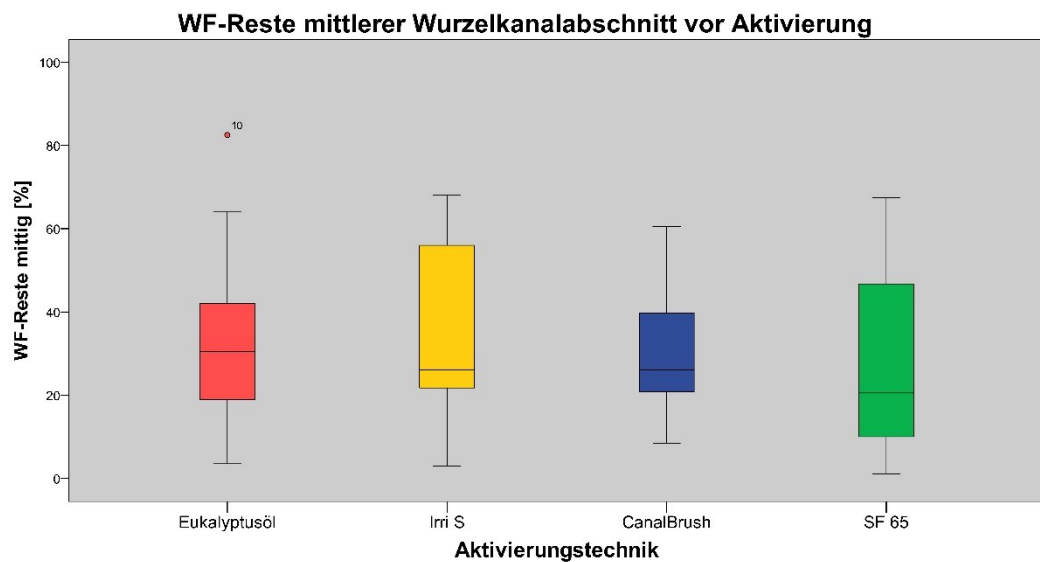
Es konnten im Durchschnitt 17 bis 30,5 % (+/- 21,85 bis 27,47 %) an bedeckter Kanaloberfläche ermittelt werden.



**Abbildung 16:** WF-Reste koronaler Abschnitt vor Aktivierung

### Mittlerer Kanalabschnitt

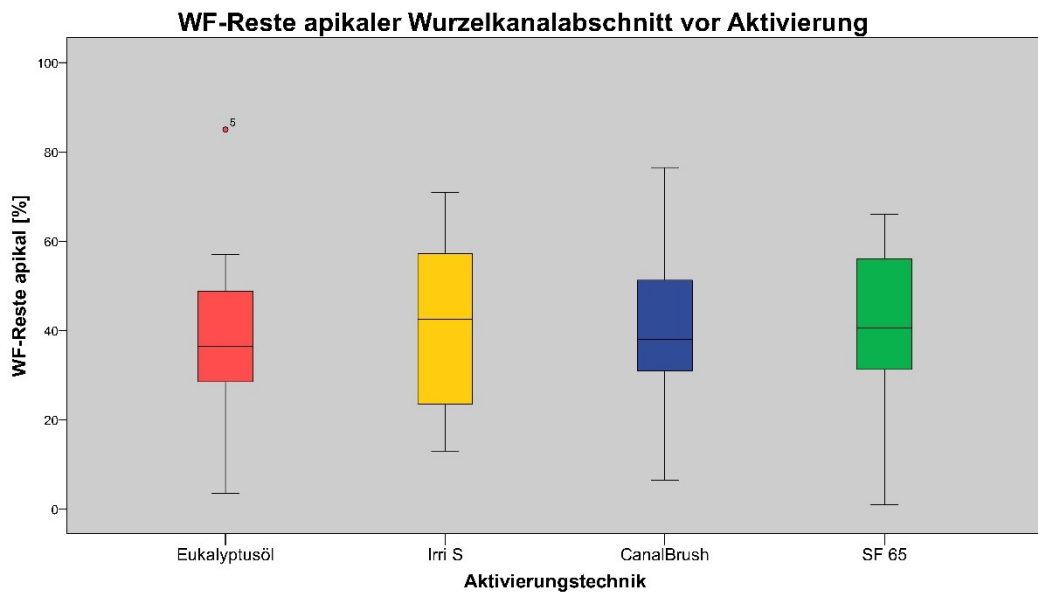
Der Medianwert lag zwischen einer Spanne von 20,5 bis 30,5 % (+/- 16,81 bis 22,43 %) an verbliebenem Wurzelfüllmaterial.



**Abbildung 17:** WF-Reste mittlerer Abschnitt vor Aktivierung

### Apikaler Kanalabschnitt

Der höchste Wert an Wurzelfüllmaterial bedeckter Oberfläche lag im apikalen Bereich mit 36,5 bis 42,5 % (+/- 17,08 bis 19,97 %).



**Abbildung 18:** WF-Reste apikaler Abschnitt vor Aktivierung

## 7.2 Revisionschritt 2

Die aus der deskriptiven Statistik erhaltenen Werte bezüglich der Differenz zwischen 1. und 2. Revisionschritt wurden durch die induktive Statistik auf Signifikanz überprüft. Für die Varianzanalyse wurde der nicht parametrische Kruskal-Wallis-Test gewählt. So konnten signifikante Unterschiede bei dem Vergleich der Gruppen zwischen den einzelnen Kanalabschnitten nach Aktivierung ermittelt werden. Die zusätzlich entfernten Wurzelfüllmaterialreste sind ausschließlich im apikalen Kanalabschnitt signifikant abhängig von der verwendeten Aktivierungstechnik ( $p=0,005^*$ ).

Bei einem Vergleich der Medianwerte in den jeweiligen Kanalabschnitten innerhalb einer Gruppe untereinander, wurde der parameterfreie Wilcoxon-Test verwendet. Ein signifikanter Unterschied konnte ausschließlich in Gruppe 4 (SF65) nachgewiesen werden. Die Differenz der Werte nach Aktivierung im apikalen Kanalabschnitt ergab im Vergleich mit dem koronalen Abschnitt ein Signifikanzniveau von  $p=0,018^*$  und im Verhältnis zum mittleren Kanalabschnitt  $p=0,020^*$ . Demnach wurden in dieser Gruppe im apikalen Kanalabschnitt deutlich mehr Wurzelfüllmaterialreste durch die Aktivierung entfernt als in den anderen Bereichen des Wurzelkanals. In den anderen Gruppen konnte kein signifikanter Unterschied diesbezüglich

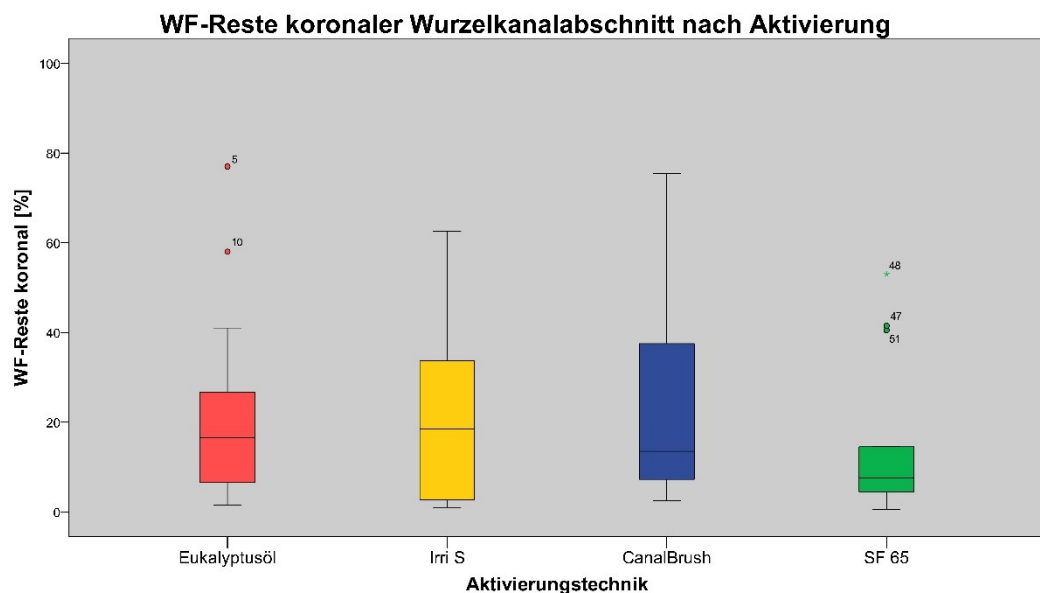
festgestellt werden. Der nicht-parametrische Friedman-Test ergab keine signifikanten Unterschiede.

Bei einer paarweisen Analyse der Medianwerte im apikalen Kanalabschnitt zwischen den einzelnen Gruppen mittels des Mann-Whitney-Test, konnten deutliche Unterschiede zwischen der 4. Gruppe (*SF65*) und 1. Gruppe (keine Aktivierung) aufgezeigt werden ( $p=0,005^*$ ). Einen signifikanten Unterschied ergab auch der Vergleich der 4. Gruppe mit der 3. Gruppe (*CanalBrush*) ( $p=0,001^*$ ).

## Vergleich der Versuchsgruppen

### Koronaler Kanalabschnitt

Es bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Gruppen. (Mann-Whitney-Test,  $p > 0,05$ ).



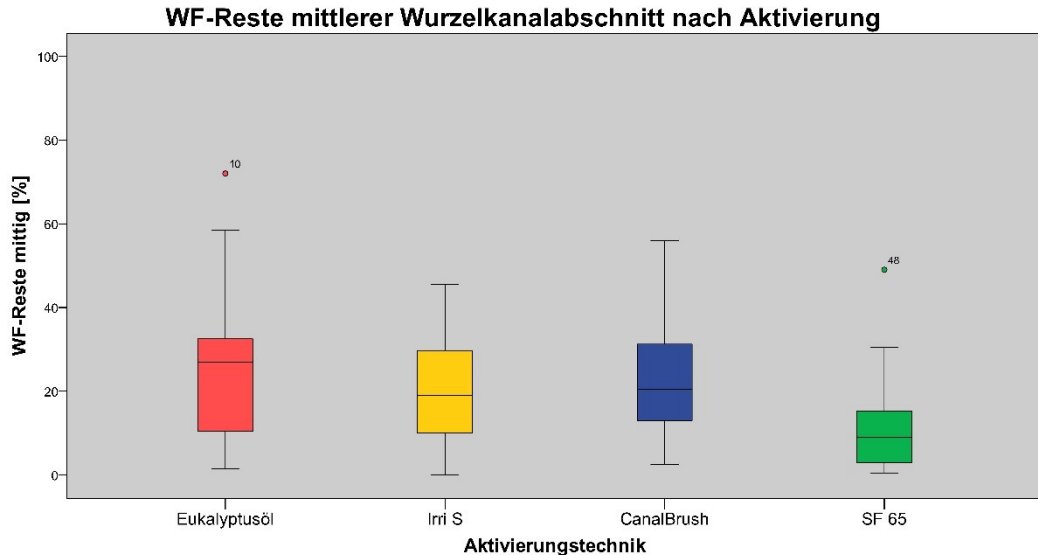
**Abbildung 19:** Differenz der WF Reste koronal nach den verschiedenen Aktivierungstechniken [%]

**Tabelle 6:** Mann-Whitney-Test: Differenz koronal nach Aktivierung

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 1			
Gruppe 2	,101		
Gruppe 3	,663	,101	
Gruppe 4	,124	,917	,253

### Mittlerer Kanalabschnitt

Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen ermittelt werden (Mann-Whitney-Test,  $p > 0,05$ )



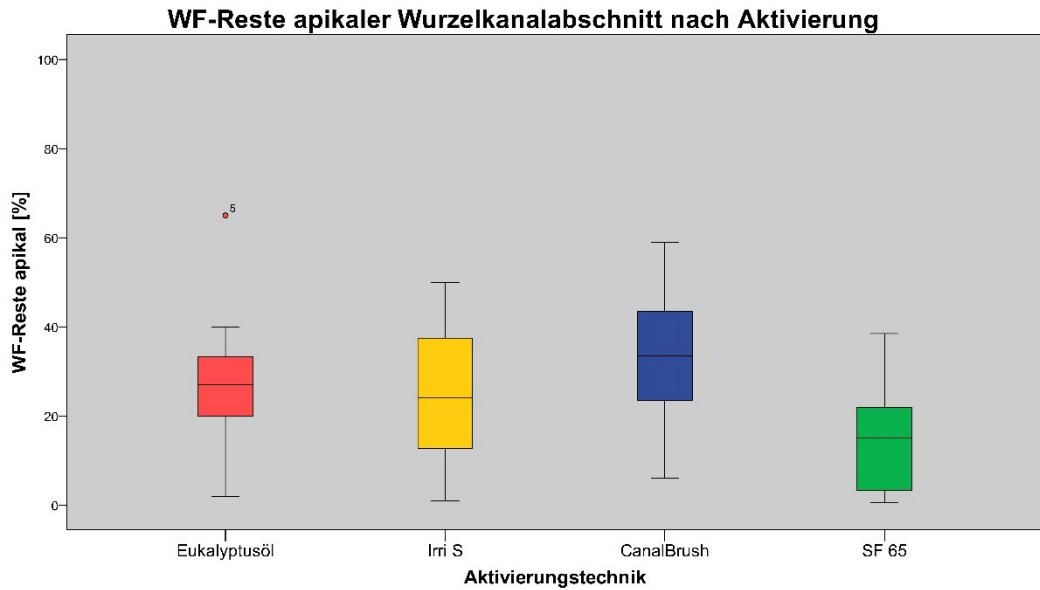
**Abbildung 20:** Differenz der WF Reste mittig nach den verschiedenen Aktivierungstechniken [%]

**Tabelle 7:** Mann-Whitney-Test: Differenz mittig nach Aktivierung

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 1			
Gruppe 2	,350		
Gruppe 3	,589	,205	
Gruppe 4	,135	,443	,198

### Apikaler Kanalabschnitt

In Gruppe 4 (SF65) konnte signifikant mehr Wurzelfüllmaterial durch Aktivierung des Lösungsmittels entfernt werden, als dies in der Vergleichsgruppe in Gruppe 1 ohne Aktivierung des Lösungsmittels erfolgt ist (Mann-Whitney:  $p=0,005^*$ ). So konnte ein Medianwert von 25,50 % erreicht werden, im Vergleich zu Gruppe 1 mit 9,50 %. Das schlechteste Reinigungsergebnis wurde in Gruppe 3 (CanalBrush) mit 5,0 % (Mann-Whitney:  $p=0,001^*$ ) erzielt. Im Vergleich zu Gruppe 2 (IRRIS) konnte kein signifikanter Unterschied ermittelt werden Mann-Whitney ( $p > 0,05$ ).



**Abbildung 21:** Differenz der WF Reste apikal nach den verschiedenen Aktivierungstechniken [%]

**Tabelle 8:** Mann-Whitney-Test: Differenz apikal nach Aktivierung

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 1			
Gruppe 2	,547		
Gruppe 3	,198	,071	
Gruppe 4	,005*	,105	,001*

### Vergleich der Kanalabschnitte innerhalb einer Gruppe

**Tabelle 9:** Ergebnisse des Wilcoxon-Tests

	<i>mittig-koronal</i>	<i>apikal-koronal</i>	<i>apikal-mittig</i>
Gruppe 1	,551	,090	,232
Gruppe 2	,509	,910	,532
Gruppe 3	,932	,348	,506
Gruppe 4	,233	,018*	,020*

*(mittig-koronal* = Differenz der WF-Reste mittig nach Aktivierung in % - Differenz der WF-Reste koronal nach Aktivierung in %

*apikal-koronal* = Differenz der WF-Reste apikal nach Aktivierung in % - Differenz der WF-Reste koronal nach Aktivierung in %

*apikal-mittig* = Differenz der WF-Reste apikal nach Aktivierung in % - Differenz der WF-Reste mittig nach Aktivierung in %)

Ausschließlich in Gruppe 4 (*SF65*) konnte ein deutlicher Unterschied der Ergebnisse innerhalb eines Wurzelkanals ermittelt werden. Im apikalen Abschnitt wurde durch die Aktivierung weitere 25,5 % des Wurzelfüllmaterials gelöst werden. Das Ergebnis ist signifikant unterschiedlich zu dem mittleren Kanalabschnitt mit 16 % (Wilcoxon  $p=0,020^*$ ) und dem koronalen Kanalbereich mit 14 % (Wilcoxon  $p=0,018^*$ ). Zwischen dem mittleren und koronalen Kanalabschnitt lag das Signifikanzniveau über dem Grenzwert (Wilcoxon  $p > 0,05$ ).

## 8 Diskussion

### 8.1 Diskussion der Methodik

#### Auswahl und Vorbereitung der Versuchszähne

Eine unverzichtbare Grundbedingung war die Standardisierung der Versuchsbedingungen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

Nach *Hülsmann et al. (2005)* ermöglicht die Verwendung von künstlichen Wurzelkanälen aus Harz eine hohe Reproduzierbarkeit durch die bestmögliche Standardisierung bezüglich Grad, Lage und Radius der Wurzelkanalkrümmung in drei Ebenen, der „Gewebe“- Härte- und Wurzelkanalbreite. Dem gegenüber zeigten sie auf, dass die Daten über Arbeitszeit und Arbeitssicherheit solcher Studien nicht auf die klinische Situation übertragbar seien. Grund dafür sei der höhere Kraftaufwand, der zur Entfernung von Dentin benötigt würde. Die Mikrohärtigkeit des Dentins liegt in Pulpanähe zwischen 35-40 kg / mm<sup>2</sup>, während die Härte der Harzmaterialien je nach Material zwischen 20-22 kg / mm<sup>2</sup> beträgt. Zudem ist die Größe der Harzspäne ungleich der natürlichen Dentinspäne und führt zu häufigen Verstopfungen im apikalen Wurzelkanalabschnitt und erschwerter Entfernung von Schmutzpartikeln aus dem Kanal [71]. Die Ergebnisse der hier vorliegenden Studie sollten eine praxistaugliche Methode ermitteln, demnach wurden ausschließlich humane permanente Zähne mit abgeschlossenem Wurzelwachstum ohne endodontische Vorbehandlung verwendet.

Für eine weitere Standardisierung wurden ausschließlich Zahnwurzeln mit einem einzelnen Wurzelkanal mit geradem Verlauf und rundem Kanalquerschnitt kleiner als ISO 45 verwendet. Um ungeeignete Zähne von Beginn an auszuschließen, wurden Röntgenaufnahmen in mesio-distaler und oro-vestibulärer Ebene angefertigt. Waren Kanalvariabilitäten oder ein zweiter Wurzelkanal vorhanden, so wurden diese Zähne durch geeignete Exemplare ersetzt. Die röntgenologische Beurteilung der Kanäle in 2-dimensionaler Ausrichtung ist für die Beurteilung eines 3-dimensionalen Kanalsystems jedoch hinsichtlich ihrer Aussagekraft limitiert. Um einen sicheren Ausschluss aller ungeeigneten Zähne zu ermöglichen, wären weitere Maßnahmen zur exakten Beurteilung des Kanalsystems und Erkennen von Inkongruenzen erforderlich gewesen. Dies hätte mittels 3D-Darstellung, etwa Mikro-CT, einen enormen Aufwand bedeutet, so dass darauf zugunsten einer klassischen Röntgendarstellung in 2 Ebenen mit digitalen Röntgenspeicherfolien im HD-Modus



verzichtet wurde, wodurch sich die Messungen mit hinreichender Genauigkeit ermitteln ließen.

Obwohl die Dekapitation der Zähne auf eine Gesamtlänge von 14 mm die klinischen Zustände nicht vollständig reproduziert, konnten so weitere Variablen wie beispielsweise die Zahnkronenanatomie und die Wurzelkanalzugänglichkeit beseitigt werden. Dadurch wurde ein zuverlässigerer Vergleich der Revisionstechniken ermöglicht.

Durch eine spätere randomisierte Verteilung der Zähne auf 4 Gruppen mit einer statistisch relevanten Gruppengröße von  $n=15$  konnte der Einfluss eventuell dennoch vorhandener irregulärere Kanalgeometrien reduziert werden.

### **Wurzelkanalaufbereitung**

Die Aufbereitung der Versuchszähne erfolgte mit dem vollrotierenden maschinellen *F360*-System in Kombination mit einem drehmomentbegrenzten Endomotor. Um gleiche Ausgangsbedingungen für alle Zähne zu schaffen, wurde jeder Wurzelkanal auf .04/#45 bei einer Arbeitslänge von 13 mm aufbereitet.

Diverse Studien konnten zeigen, dass die Verwendung von maschinellen Aufbereitungssystemen ein besseres Einhalten des ursprünglichen Kanalverlaufs ermöglichen und eine vergleichsweise geringere apikale Extrusion erfolgt als bei der Aufbereitung mit Handinstrumenten [14,28]. Die einfache und standardisierte Anwendung der maschinellen Systeme verringerte zusätzlich den Einfluss auf das Ergebnis, welches je nach Erfahrung und Individualität des Behandlers differiert [10]. Zudem konnte das *F360*-System schon in vorangegangenen Studien als Aufbereitungsinstrument überzeugen [18,19,120]. Um Veränderungen der Kanal Anatomie und unterschiedlichen Abtrag an den Kanalwänden zu umgehen, wurde zur Aufbereitung und mechanischen Revision das gleiche Feilensystem verwendet.

Während der Aufbereitung erfolgte die Spülung der Wurzelkanäle mit einer Sequenz bestehend aus NaOCl - EDTA - NaOCl, um entstandene Dentinspäne aus dem Kanal zu entfernen und eine Verblocken zu vermeiden. Anschließend erfolgte die longitudinale Teilung der Wurzelkanäle in mesio-distaler Richtung. Die Teilung wurde bewusst vor der Obturation durchgeführt, um für die Beurteilung der Revisionseffizienz einer zusätzlichen Aktivierungstechnik eine gleiche Ausgangssituation wie vor dem 1. und 2. Revisionsschritt zu schaffen. Zudem konnten so das Ablösen von Füllmaterial während der Teilung vermieden und eventuell entstandene Abweichungen der Kanalform ausgeschlossen werden. Die Reposition der Wurzelhälften wurde mit Hilfe einer Gippschablone und einem dünnfließenden

Kunststoff, *Heavy flow*, durchgeführt. Ziel der Aufbereitung sollten kreisrund aufbereitete Wurzelkanäle mit identischem Durchmesser sein. Dies war unabdingbar, um bei der späteren Revision nicht durch einen ungleichmäßigen Abtrag an Füllmaterial das Ergebnis zu verfälschen. Die Versuchszähne wurden dazu mit einem auf Arbeitslänge angepassten Guttaperchapoint .04/#45 in mesio-distaler und orovestibulärer Richtung geröntgt. Dadurch konnten aufbereitungs- oder teilungsbedingte Materialverluste oder Forminkongruenzen einzelner Abschnitte erkannt und ausgeschlossen werden. Zudem wurde die korrekte Reposition der Wurzelhälften kontrolliert.

### **Das Spülkonzept**

Vor der Obturation sowie nach dem 1. und 2. Revisionschritt, wurde in dieser Studie jeweils ein identisches Spülprotokoll angewendet. Es wurden in der Abfolge mit NaOCl 3 %, EDTA 17 % und erneut NaOCl 3 % je 3 ml jeweils 1 min gespült. Nachfolgend erfolgte eine finale Spülung mit 10 ml destilliertem Wasser, um mögliche Kristallbildungen an der Wurzeloberfläche sowie an Wurzelkanalfüllmaterialresten zu vermeiden. Abschließend wurden alle Kanäle gründlich getrocknet, um alle Rückstände der Spüllösungen zu beseitigen. Neben der Desinfektion des Wurzelkanalsystems, sollten die ausgewählten Spüllösungen insbesondere die entstandene Schmierschicht und Dentinspäne entfernen, da diese den Haftverbund zwischen Wurzelfüllmaterial und der Dentinwand und die spätere Auswertung mit dem Digitalmikroskop erschwert hätten. Ebenso sollte damit eine bestmögliche Simulation der klinischen Situation sichergestellt werden. Zudem sollte der Haftverbund zwischen Sealer und Dentin nicht beeinflusst werden, da eine geringere Haftung vermutlich zu einer leichteren Revidierbarkeit führt und so die Ergebnisse hätte verfälschen können.

*Kamalasanan et al. (2017)* verglichen in ihrer Studie verschiedene, vor der Obturation angewandte Spüllösungen hinsichtlich ihres Einflusses auf die anschließende Adhäsionskraft von *AH Plus Sealer* zum Dentin der Wurzelkanalwand. Die höchsten Werte für die Verbundfestigkeit zwischen Dentin und *AH Plus* wurden nach der Spülung des Kanals durch NaOCl 3 % und EDTA 17 % gemessen. Durch die suffiziente Entfernung der entstandenen Schmierschicht konnte der Sealer in die offenen Dentintubuli eindringen und so eine effektive Mikroretention aufbauen [75,76]. NaOCl ist gemäß der Literatur ausgeprägt antimikrobiell und besitzt die Fähigkeit organische Substanzen aufzulösen [101,150]. Die Spüllösung wird klinisch in verschiedenen Konzentrationen verwendet. Die Konzentrationen von 5,25

%, 2,5 %, und 1,0 % NaOCl-Lösung wurden als äquivalent hinsichtlich ihrer Effizienz beurteilt [11]. Da eine 5,25-prozentige Konzentration die Elastizität und Biegefestigkeit von Dentin herabsetzt, wurde in dieser Studie auf die Anwendung höherer Konzentrationen verzichtet und eine 3-prozentige NaOCl-Lösung verwendet [141]. Als letzte Spüllösung sollte NaOCl kritisch betrachtet werden, da dadurch die Polymerisation von auf Harz basierenden Sealer beeinträchtigt wird, dadurch die Bindungsstärke zum Dentin reduziert wird und ferner zu einer Erhöhung der Mikroleakage führt [42,75,123,151]. Dies könnte zu verfälschten Werten der aktuellen Studie führen. Zudem hat NaOCl keine Wirkung auf den anorganischen Anteil der Dentin- und Schmierschicht. Daher wird die zusätzliche Verwendung von 17-prozentigem EDTA empfohlen. Jedoch sollte EDTA nicht länger als 1 Minute eingebracht werden, da sonst Erosionen und Veränderungen der biomechanischen Eigenschaften des Wurzelkanalwanddentins resultieren [12]. Zudem setzt EDTA die Mikrohärtigkeit des Dentins herab [12].

Die Entfernung möglicher Rückstände der angewandten Spüllösungen sollte demnach gewissenhaft durchgeführt werden und wird durch eine Abschlusspülung mit destilliertem Wasser empfohlen [41,42,88]. Dies wurde in dieser Studie durch eine Spülung mit 10 ml destilliertem Wasser und abschließender Kanaltrocknung sichergestellt.

### **Auswahl der Obturationstechnik**

In dieser Studie sollten die mit verbliebenen Füllungsresten bedeckten Kanalflächen prozentual im Vergleich zur gesamten Kanalwandfläche ermittelt werden. Dies ermöglichte eine Vergleichbarkeit zwischen den Aktivierungstechniken untereinander und der Revisionseffizienz des *F360*-Systems herzustellen. Eine lückenlose Füllung mit einer durchgängig beschichteten Wurzelkanalwand war demnach Grundbedingung für verifizierbare Ergebnisse. Dem Sealer kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu, da er letztendlich für den Haftverbund zum Dentin verantwortlich ist, was wiederum für diese Studie ausschlaggebend war [46]. Für die Obturation wurde der auf Epoxidharz basierende Sealer *AH Plus* in Kombination mit Guttapercha gewählt, was in der *DGZMK* derzeit als Goldstandard gilt. Guttapercha gilt als das am häufigsten verwendete und akzeptierte Wurzelkanalfüllmaterial in der Endodontie. Ergebnisse bezüglich seiner Revidierbarkeit haben demnach eine hohe klinische Relevanz. Die Anforderungen an den Sealer waren einerseits eine optimale Fließfähigkeit, die es erlaubt, sowohl in die Dentintubuli einzudringen, als auch eine Mikroretention zu ermöglichen, jedoch zu keiner apikalen

Extrusion führt. Zudem ermöglicht ein Wurzelkanalsealer mit einer dünnen Filmdicke eine bessere Benetzbarkeit der Oberfläche und somit eine höhere Abdichtungseffizienz. *AH Plus* entspricht bei beiden Anforderungen den Standards von *ANSI/ADA* (2000) [164]. Auch die Löslichkeit von *AH Plus* liegt mit 0,21 % im empfohlenen Bereich. Die Verbindung zwischen Guttapercha und der Dentinwand wird bei *AH Plus* durch die geringe Expansion von 0,4 % (nach 4 Wochen 0,9 %) gewährt [104]. Das hohe Abdichtungspotential von *AH Plus* aufgrund einer guten Haftung zum Dentin, konnte bereits nachgewiesen werden [3,41]. Demnach konnte durch die Auswahl von *AH Plus* als Sealer eine suffiziente Wurzelkanalfüllung erwartet werden.

Alle 60 Versuchszähne dieser Studie wurden mittels Single-Cone-Technik obturirt. Dies steht im Gegensatz zur in vielen Studien in Zusammenhang mit Guttapercha und Sealer verwendeten lateralen Kompaktionstechnik oder Warmfülltechnik. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Verwendung einer kalten oder einer warmen Wurzelkanalfülltechnik keinen Einfluss auf postoperative Schmerzen oder eine Ausheilung apikaler Parodontitiden hat [34,48,77,107]. Daher wurde in dieser Studie der Fokus auf eine im europäischen Raum weit verbreitete Technik gelegt, um für den Praxisalltag anwendbare Ergebnisse zu erhalten. Die am häufigsten verwendeten Obturationsmethoden im klinischen Alltag sind die laterale Kondensationstechnik und die Einstifttechnik [33]. *Facer et al.* (2003) belegten, dass bei der lateralen Kondensationstechnik keine kontinuierliche Sealerschicht zwischen Guttaperchastiften und Wurzelkanalwand zustande kam. Auch sealerfreie Bereiche zwischen den einzelnen Guttaperchastiften waren vorhanden [46]. Das Einbringen des Spreaders in die Wurzelkanalfüllung führt zu sealerfreien Arealen, die bei einem einfachen Nachschieben von Nebestiften auch nachfolgend nichtmehr mit Sealer benetzt werden und somit ausschließlich mit Guttapercha gefüllt sind und Spreaderhohlräume aufweisen, so genannte "spreader tracts" [52]. Guttapercha alleine kann jedoch keine Haftung zum Dentin aufbauen und hinterlässt demnach sealerfreie Abschnitte an der Wurzelkanalwand. Dies würde nach der Revision fälschlicherweise als entferntes Material ausgewertet werden. Zudem wird vermutet, dass die laterale Kondensation der Guttaperchastifte gegen die Kanalwand ein Entweichen der dazwischenliegenden Sealerschicht zur Folge hat [46]. Ein Verdrängen des Sealers durch Anwendung der lateralen Kondensationstechnik würde auch den geringeren Anteil an sealerbedeckten apikalen Kanalwänden in der Studie von *Facer et al.* (2003) erklären. Ursächlich sind die induzierten Kräfte während der lateralen Kondensation, welche im schmalen apikalen Bereich größer sind als im koronalen [46]. Zudem konnten diverse Studien zeigen, dass

mit der Single-Cone-Technik gefüllte Wurzelkanäle im Gegensatz zu solchen mittels lateraler Kompaktionstechnik oder vertikale Kondensationstechnik gefüllten Kanäle, einen deutlich höheren Prozentsatz an sealerbedeckter Oberfläche aufwiesen [136,175]. Eine lückenlose Beschichtung der Kanalwand in allen Kanalabschnitten war hingegen die aktuelle Studie relevant. Folglich wurde die Einstifttechnik als Obturationsmethode ausgewählt.

Um eine homogene Verteilung des Sealers auf die Kanalwände zu gewährleisten wurde in dieser Studie ein *Lentulo* verwendet. Diese Technik konnte in anderen Versuchen als äußerst suffizient nachgewiesen werden, um die Kanalwand vollständig mit Sealer zu beschichten [74,175]. Im Zusammenhang mit der Single-Cone-Technik konnten *Wu et al. (2000)* eine homogen mit Sealer beschichtete Kanalwand erreichen [74,175]. Die Sealerschicht sollte dennoch möglichst dünn gehalten werden, um *Mikroleakage* zu minimieren und eine adäquate Füllung zu erreichen [136]. Hierfür sorgte in dieser Studie ein Guttaperchapoint von .04/#45. Zudem wurde bereits vor der Obturation der Probenzähne mit Hilfe der Masterpointaufnahme erkannt, dass Versuchszähne mit einem als ISO 45 übersteigende Kanalgröße ausgeschlossen werden konnten.

Durch die anschließende röntgenologische Kontrolle in zwei Ebenen, wurden mögliche inhomogene und qualitative Wurzelfüllungen ausgemustert.

### **Lagerungsdauer**

Nach der Obturation wurden die Versuchszähne zur Gewährleistung einer vollständigen Aushärtung des Wurzelfüllmaterials unter intraoralen Bedingungen 3 Wochen feucht gelagert. In der Studie von *Duarte, So et al. (2010)* wurden Versuchszähne mit einer 6 Jahre alten oder einwöchigen Wurzelfüllung revidiert. Anhand des verbliebenen Wurzelfüllmaterials konnten nur im mittleren Kanalabschnitt signifikante Unterschiede gemessen werden. Die Versuchszähne mit der nicht gealterten Wurzelkanalfüllungen wiesen hier im Vergleich mehr Füllungsreste auf, was durch eine altersbedingte sinkende Haftkraft zwischen Sealer und Guttapercha und Sealer und Dentinwand bei den 6 Jahre alten Füllungen erklärt werden kann [37]. Um für den Praxisalltag eine verlässliche Revisionstechnik auch bei starker Verbundkraft zu ermitteln, wurde hier nicht gealtertes Versuchsmaterial mit starkem Adhäsionsvermögen des Wurzelkanalfüllmaterials an der Dentinwand verwendet. Zudem lässt dies einen besseren Vergleich mit der Literatur zu, da viele bereits vorhandene Revisionsstudien eine kürzere Lagerungsdauer gewählt haben. Denn auch wenn in der klinischen Situation Wurzelkanalfüllungen über

einen sehr unterschiedlich langen Zeitraum revidiert werden müssen, binnen Wochen bis Jahren oder Jahrzehnten, abhängig von der Ursache für die Revisionsbehandlung, so stellt eine langfristig liegende Wurzelkanalfüllung in der Simulation dennoch eine weitere Variable dar, die schwer kalkulierbar ist.

### **Revisionsschritt 1**

In vielen Studien wurde bereits die Revisionseffizienz von maschinellen NiTi-Systemen verglichen. Die maschinellen NiTi-Systeme mit aktiven Schneiden konnten bei der Entfernung von Guttapercha und Sealer deutlich bessere Ergebnisse erzielen [54,59,69]. Wie bereits genannt, existieren zahlreiche Studien, die vollrotierende Systeme mit der reziproken Arbeitsweise verglichen, mit teils kontroverserem Ergebnis [85,113,115].

Die *F360*-Feilen (VDW) konnten bereits als Aufbereitungsinstrument überzeugen, auch wenn sie nicht explizit für die Revision von Wurzelfüllmaterialien vorgesehen waren [18,19,120]. In dieser Studie wurde das *F360*-System dennoch als Revisionsinstrument für den Revisionsschritt 1 ausgewählt, da es eine vielversprechende Ergänzung zwischen dem vollrotierenden *Mtwo*-System und dem reziproken *Reciproc*-System darstellt und untersucht werden sollte, ob es als mögliche Alternative zu bereits etablierten Revisionssystemen in Frage kommt. Das *F360*-System ist zudem mit einem herkömmlichen Endomotor anwendbar und somit kostensparend für die Anwendung im Praxisalltag. Ein weiterer Vorteil ist die einheitliche Einstellung aller Feilen auf einen Torque von 180 gcm und eine damit vermeidbare mögliche Fehlerquelle [39]. Zudem sollte durch Verwendung des äquivalenten Feilensystems für Aufbereitung und Revision eine Veränderung des Kanaldurchmessers und eine ungleichmäßige Abtragleistung aufgrund einer differenzierten Feilenanatomie vermieden werden. Damit wurde auch berücksichtigt, dass in vielen Praxen aus finanziellen Gründen nur ein Feilensystem für Aufbereitung und Revision vorhanden ist.

### **Revisionsschritt 2**

Die Verwendung von Lösungsmittel während des Revisionsverfahrens ist umstritten. Chloroform gilt als effizientestes Lösungsmittel bei der Entfernung von Gutta-perchafüllungen [13,130,131,170,172]. Chloroform wurde aufgrund potentiell kancerogener Wirkung im europäischen Raum nicht empfohlen und größtenteils abgelöst. Ergebnisse diesbezüglich besitzen damit nur geringe klinische Relevanz.

Zudem konnte beobachtet werden, dass die Verwendung von Chloroform Gutta-percha aufgrund der verstärkten Löslichkeit auf den Kanalwänden verteilt und zudem als leichtflüchtige Flüssigkeit relativ schnell verdampft, wobei dann die gelösten Wurzelkanalfüllmaterial-Bestandteile sich an der Kanaloberfläche niederschlagen [59,126]. Dies würde die Ergebnisse dieser Studie verfälschen, da die Revisionseffizienz anhand der freien Kanalwand im Vergleich zur gesamten Kanalwand ermittelt wird. Bei Eukalyptusöl trat dieser Effekt in deutlich geringerem Maße auf [64]. In einigen Studien kam es durch die Anwendung von Lösungsmittel zu einem Vermischen der Wurzelfüllmaterialkomponenten. In dieser Studie ist dieser Effekt vernachlässigbar, da die Wurzelfüllmaterialanteile nicht getrennt auf ihre Revisionsfähigkeit überprüft wurden. Denn für eine erfolgreiche Nachbehandlung ist der Anteil des von Wurzelkanalfüllmaterial gereinigter Kanaloberfläche entscheidend. Zudem konnte nach Revisionsschritt 1 in allen Versuchszähnen Gutta-percha vollständig entfernt werden. Aus den genannten Gründen wurde für diese Studie Eukalyptusöl ausgewählt.

Studien, die sich mit der Verwendung von Eukalyptusöl während der Revision befassen, kamen zu konträren Ergebnissen. Sowohl eine verkürzte Revisionszeit [69] und verbesserte Revisionseffizienz [72], als auch ausbleibende Steigerung der Revisionseffizienz wurden beobachtet [24]. Diese Studien befassten sich ausschließlich mit der Verwendung von Eukalyptusöl in Kombination mit maschineller Revision. Die Anwendung von einem nachfolgenden Revisionsschritt wurde bislang experimentell nicht ausreichend untersucht.

Dazu wurde das Lösungsmittel in dieser Studie zunächst 2 min in den Kanal appliziert und anschließend für 1 min aktiviert. Bei einer 2-minütigen Einwirkzeit von Eukalyptusöl konnte in Studien eine vergleichbare Effizienz gegenüber Chloroform nachgewiesen werden [98]. Die gewählten Zeiten der Aktivierung wurden unter Berücksichtigung der klinischen Situation in der Praxis bestimmt. Längere Einwirkzeiten wären für den Praxisalltag zu zeitintensiv. Ein Versuchsprotokoll über 5 min wäre somit nur bedingt praxisrelevant gewesen. Aus diesem Grund wurde der Revisionsschritt 2 auf eine Dauer von 3 min limitiert. Die Aktivierung erfolgte bewusst in einem Revisionsschritt 2 nach bereits erfolgter Revision durch das *F360*-Systems, um den Instrumentenansätzen eine Bewegungsfreiheit und damit eine optimale Umsetzung der erzeugten Energie zu ermöglichen.

Ziel dieser Studie war es, eine umsetzbare Alternative zu finden, die einen vermehrten Abtrag der Zahnhartsubstanz vermeidet und zudem auch praxisorientiert umsetzbar ist. Demnach wurde auf ein „root canal enlargement“, also eine intentionelle Erhöhung der Aufbereitungsgröße des Wurzelkanals, verzichtet und zudem

Instrumente und eine Arbeitsweise gewählt, die keinen Abtrag der Kanalwand zur Folge hat. Die Verwendung von ultraschall- und schallaktivierten Spüllösungen während der Revisionsbehandlungen konnten einen positiven Einfluss auf die Revisionseffizienz aufzeigen [15,58,98,171]. Die direkte Aktivierung von Lösungsmitteln durch Ultraschall- bzw. Schallansätze ist bislang noch nicht ausreichend experimentell belegt. Die Auswahl von ultraschall-, schall- und mechanisch betriebenen Ansätzen in den Versuchsgruppen der aktuellen Studie sollte demnach die vermuteten positiven Eigenschaften auf das Lösungsmittel untersuchen und miteinander vergleichen.

Gruppe 1 bildete die Vergleichsgruppe ohne Aktivierung des Lösungsmittels. Dies ermöglichte eine separate Einschätzung der jeweiligen Aktivierungstechnik bezüglich deren Reinigungseffizienz.

### **Analysemethode**

Die Auswertung erfolgte nach dem 1. und 2. Revisionsschritt unter dem Digitalmikroskop (Keyence VHX-5000, Werkstoffkunde des Universitätsklinikums Köln) bei 200-facher Vergrößerung der Einzelaufnahmen.

In vorangegangenen Studien wurden die Versuche mikroskopisch und radiologisch ausgewertet und verglichen. Die radiologische Auswertung wurde in vielen Studien gewählt, da sie dem im Praxisalltag verwendeten Methode entspricht. Dennoch stellt sie aufgrund der geringen Vergrößerungsmöglichkeit und der begrenzten Auflösung eine weniger geeignete Methode dar [26,37,132]. Die Verwendung eines 2-dimensionalen Bildes zur Beurteilung eines 3-dimensionalen Kanalsystems ist zudem beschränkt. Es zeigte sich, dass die Verwendung eines Mikroskops eine effektivere Auswertung ermöglichte [37,132]. Wurzelkanalabschnitte, die durch eine röntgenologische Beurteilung in 2 Ebenen als rückstandsfrei bewertet wurden, zeigten unter dem Lichtmikroskop noch Wurzelkanalfüllmaterialreste [82]. Durch die hohe Auflösung und gute Kontrastierung können Wurzelfüllmaterialien effizienter ermittelt werden und es kann zudem aufgrund der farbigen Darstellung, über diese Studie hinausgehend, zwischen Sealer- und Guttaperchares-ten unterschieden werden. Zudem zeichnet die Mikroskopie eine einfachere Handhabung und direkte Auswertbarkeit aus. Das verwendete Digitalmikroskop ermöglicht im Gegensatz zum klassischen Lichtmikroskop eine 200-fache Vergrößerung mit exakter Darstellung der Wurzelkanalhälften mit hoher Tiefenschärfe, weil im Rahmen der Aufnahme der Wurzelkanaloberfläche sowohl ein Mapping (entsprechend einer Panoramaaufnahme) als auch ein Focus-Stacking (also eine Erstel-



ung von Bild-Stapeln über den gewünschten Schärferebenenbereich) möglich waren, die automatisch zu einem scharfen Gesamtbild zusammengesetzt wurden. Zudem können durch eine 3D-Darstellung exakt die Kanalgrenzen beurteilt und Artefakte identifiziert werden. Von Nachteil waren die längeren Scanzeiten des Digitalmikroskops gegenüber einer Beurteilung unter dem Lichtmikroskop, die allerdings nur dann gelten, wenn nicht mit dem Lichtmikroskop in mehreren Schärferebenen die Aufnahmen angefertigt werden und zudem keine Mappings erfolgen. Insofern stellt die digitalmikroskopische Aufnahmetechnik eine ideale Methode dar, um innerhalb einer relativ überschaubaren Zeit eine vollständig scharfe Gesamtaufnahme des gewählten Auswahlbereichs zu erhalten. Des Weiteren erfordert die Verwendung eines Mikroskops zur Einsicht in den Wurzelkanal eine Trennung der Wurzel. Hierbei kann es zu Wurzelfüllmaterialverlagerungen und unerwünschtem Abtrag kommen. Um diesen Faktor möglichst gering zu halten, erfolgte die Trennung in dieser Studie bereits vor der Durchführung der Wurzelfüllung.

Eine weitere Variante der Auswertung ist die Mikrofotografie durch eine an ein Lichtmikroskop angebrachte Digitalkamera [26,62]. Die unebene Wurzelkanalfläche machte hier die Anfertigung von 69 Aufnahmen pro Zahn notwendig, um alle Kanalabschnitte scharf abzubilden [124]. Aufgrund der hohen Datenmenge, des Zeitfaktors und der geringeren Vergrößerung, wurde diese Methode nicht gewählt. In vorangegangenen Studien kamen auch CT- [32] oder Mikro-CT-Geräte [25,115,116] zur 3D-Darstellung und Auswertung der revidierten Kanäle zum Einsatz. Das benötigte Auflösungsvermögen des Mikro-CTs ist hoch, führt zu langen Scanzeiten und ermöglicht eine ausschließliche Anwendung bei kleinen Proben. So kamen *Roggendorf et al. (2010)* bei Anwendung dieser Methode, abhängig von der Größe des gewählten Ausschnitts und der gewünschten Auflösung, auf 2 Stunden bei der erforderlichen maximalen Auflösung von 8 µm benötigte Scanzeit pro Zahn [116]. Da in der aktuellen Studie jeder Wurzelabschnitt vor und nach der Aktivierung untersucht wurde, hätte diese Technik zu einem erheblichen Zeitaufwand und extremen Kosten geführt. Aus diesen Gründen wurde dem Digitalmikroskop in dieser Studie der Vorzug gegeben.

In vergleichbaren Studien wurde eine selbsterstellte Bewertungsskala verwendet, die je nach Untersucher zu unterschiedlichen Ergebnissen führte [96]. Um die untersucherabhängige Fehlerquelle möglichst gering zu halten, wurden in der vorliegenden Studie sämtliche Arbeitsschritte von der Doktorandin selbst durchgeführt. Da der mögliche Haftverbund zwischen Sealer und Dentinwand ein wichtiger Faktor für die Prognose des Zahnes nach der Revision darstellt, wurde hier als Indikator für den Erfolg der Revision die bedeckte Wurzelkanaloberfläche der

vorhandenen Volumina vorgezogen. Die Angabe von Volumina ermöglicht zwar ebenfalls eine quantitative Angabe vorhandener Wurzelkanalfüllmaterialrest, allerdings ist eine solche Aussage nicht ausreichend. Vielmehr ist sie alleine nicht in der Lage, die wirkliche Qualität einer Reinigung der Kanaloberfläche durch eine Revisionsbehandlung optimal darzustellen, denn es ist ja möglich, dass eine dickere Sealerschicht in einem begrenzten Kanalabschnitt ein höheres Volumen verursacht, als dies bei einer vollständig mit einem dünnen Sealerfilm bedeckten Wurzelkanaloberfläche der Fall ist. Somit wäre nominell der mit einem dünnen Sealerfilm nach der Revisionsbehandlung bedeckte Wurzelkanal im Vorteil, da quantitativ ein geringeres Volumen an Wurzelkanalfüllmaterial ermittelt wurde, zugleich würde das Risiko eines nicht der Desinfektion zugänglichen Wurzelkanaloberfläche hiermit nicht aufgezeigt. Die Werte wurden in Prozent zur Gesamtkanalwandoberfläche angegeben, da dies dem Behandler die Einschätzung des Revisionserfolgs erleichtert.

## 8.2 Diskussion der Ergebnisse

### Prüfung der Arbeitshypothesen

#### **Arbeitshypothese 1**

Die Revisionstechniken zeigen signifikante Unterschiede hinsichtlich der Reinigungseffizienz.

**Diese Hypothese wird angenommen.**

Es konnten signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Aktivierungstechniken bezüglich der Revisionseffizienz ermittelt werden. Diese beziehen sich ausschließlich auf den apikalen Kanalabschnitt. Gruppe 4 (*SF65*) konnte in diesem Bereich deutlich bessere Ergebnisse erzielen als Gruppe 3 (*CanalBrush*) und Gruppe 1 (ohne Aktivierung). Die Hypothese wird daher angenommen. Die Revisionseffizienz zwischen den Gruppen 1 bis 3 ergab keinen signifikanten Unterschied.

### **Arbeitshypothese 2**

Die zusätzliche Aktivierung von Lösungsmittel in einem zweiten Revisionschritt zeigt eine signifikante Verbesserung der Revisionseffizienz.

**Diese Hypothese wird angenommen.**

In dieser Studie konnte der maximale Anteil an bedeckter Wurzelkanalwandoberfläche zur gesamten Kanalwandoberfläche im koronal und im mittleren Abschnitt 30,5 % (Medianwert) nach Revisionschritt 2 auf mindestens 18,5 % (koronal) und 27 % (mittig) reduziert werden. Die Effizienz der Reinigung des apikalen Kanalabschnitts konnte sogar mindestens um zusätzliche 10 %, von 42,5 % auf 33,5 % bedeckte Kanalwandoberfläche erhöht werden. Je nach Gruppe, konnte ein deutlich besseres Ergebnis erzielt werden, besonders in Gruppe 4 (*SF65*) mit 9 % bedeckter apikaler Kanalwandoberfläche erhöht werden.

Allen gemeinsam ist daher eine gesteigerte Reinigungseffizienz nach Revisionschritt 2, verglichen mit dem Ergebnis nach Revisionschritt 1. Die Hypothese wird daher angenommen.

### **Arbeitshypothese 3**

Die Aktivierung von Lösungsmittel bewirkt mit allen Techniken eine Steigerung der Revisionseffizienz im Vergleich zur Verwendung des Lösungsmittels ohne Aktivierung.

**Diese Hypothese wird abgelehnt.**

In dieser Studie konnte bei der Anwendung des *SF65*-Ansatzes (Gruppe 4) als Aktivierungsinstrument eine signifikante Steigerung der Reinigungseffizienz gegenüber dem passiven Einwirken des Lösungsmittels (Gruppe 1) erzielt werden. Dieser Effekt beschränkt sich jedoch auf den apikalen Kanalabschnitt. Im mittleren und koronalen Wurzelkanalabschnitt, wie auch bei der Verwendung der

*CanalBrush* (Gruppe 3) und *IRRI S-Spitze* (Gruppe 2), konnte keine signifikante Verbesserung ermittelt werden. Die Hypothese, dass alle angewandten Aktivierungstechniken mehr Wurzelfüllresiduen lösen als die Verwendung von Lösungsmittel ohne Aktivierung, muss demnach abgelehnt werden.

### **Revisionseffizienz des F360-Systems**

Nach Revision mit dem *F360*-System konnten die Kanalwände nicht vollständig von Wurzelfüllmaterialien befreit werden. Im apikalen Bereich verblieb mit 36,5-42,5 % (Medianwert=MDW) der größte Anteil an Füllmaterial. Dies entspricht dem Ergebnis zahlreicher vorangegangener Studien, in denen im apikalen Kanalabschnitt die geringste Revisionseffizienz erzielt werden konnte [37,47,53,62,73,134]. Als Ursache wird der erschwerte Zugang zu diesem Bereich angenommen. Im koronalen Abschnitt verblieben 17 bis 30,5 % (MDW) und im mittleren Abschnitt 20,5 bis 30,5 % (MDW) an residualem Füllmaterial. Die Schwankungen der einzelnen Gruppen bezüglich der Füllungsmaterialresiduen könnten auf eine unterschiedliche Kanal Anatomie des humanen Substrats zurückzuführen sein. Ziel der Aufbereitung sollten kreisrund aufbereitete Wurzelkanäle mit gleichem Durchmesser sein, um hier Schwankungen aufgrund variabler Proben zu vermeiden. Die röntgenologische Kontrolle mittels Guttaperchastift in 2 Ebenen, welche vorab zur Ausmusterung der Versuchszähne durchgeführt wurde, ist limitiert, wobei möglicherweise auch vorhandene Kanalausbuchtungen oder Formkongruenzen übersehen worden sein könnten. Zudem besteht bei der Verwendung des gleichen Feilensystems für Aufbereitung und Nachbehandlung die Gefahr, dass schon während der Aufbereitung nicht instrumentierte Kanalbereiche auch bei der Revision nicht erreicht werden konnten. Folglich würden in diesen Bereichen Wurzelfüllmaterialreste verbleiben, welches auch durch die Ergebnisse dieser Studie und durch die hohe Standardabweichung der Ergebnisse bestätigt wird. Dem gegenüber konnte in vergleichbaren Studien bei der Verwendung des gleichen Feilensystems für Aufbereitung und Revision im Vergleich mit einem anderem Revisionssystem die beste Revisionseffizienz erreicht werden. Dies konnte sowohl bei Verwendung eines vollrotierenden Systems (*Mtwo*) [4,83] oder eines reziproken Systems (*Reciproc*) [140] ermittelt werden.

In der Studie von *Rüth (2014)* wurden unterschiedliche Sealer auf ihre Revidierbarkeit überprüft. Zunächst wurden 60 humane Unterkieferinzisivi mit *FlexMaster*-Instrumenten auf .04/#40 aufbereitet und mittels Single-Cone-Technik mit

Guttapercha und verschiedenen Sealern gefüllt. Revisionschritt 1 erfolgte mit dem *EndoSequence*-System .04/#40. Auch hier galt der Revisionschritt als abgeschlossen, wenn die Arbeitslänge erreicht wurde und kein Füllmaterial mehr aus dem Kanal befördert werden konnte. Die Auswertung erfolgte über Mikrofotografie. Aufgrund des ähnlichen Versuchsaufbaus, lassen sich hier gute Vergleiche ziehen. In der Gruppe mit *Sealer AH Plus* verblieben im koronalen Bereich 44,4 % (Mittelwert, kurz MW), im mittleren Bereich 50,4 % (MW) und apikal 56,2 % (MW) der Sealerreste [124]. Vergleicht man das Ergebnis mit den Werten der aktuellen Studie, kann die Hypothese aufgestellt werden, dass das *F360*-System eine effizientere Reinigung der Kanalwände ermöglicht.

Auch in einer Vergleichsstudie konnten nach der Revision mit dem *Mtwo*-System oder *RaCe*-Feilen im mittlerem (*Mtwo* 29,5 %, *RaCe* 38,9 %) und koronalen Kanalabschnitt (*Mtwo* 31,7 %, *RaCe* 30,1 %) weniger Wurzelfüllmaterial entfernt werden, als in der aktuellen Studie. Im apikalen Bereich konnten vergleichbare Ergebnisse erzielt werden (*Mtwo* 35,5 %, *RaCe* 42,8 %). Da in dieser Vergleichsstudie die laterale Kondensationstechnik als Obturation gewählt wurde, kann es, wie bereits erwähnt, vor allem im apikalen Wurzelkanalabschnitt zu sealerfreien Bereichen gekommen sein und somit zu einem Verfälschen des Ergebnisses in Richtung einer höheren Revisionseffizienz. Dies würde erklären, weshalb nur im apikalen Kanalabschnitt ähnliche Ergebnisse erzielt werden konnten. Die schlechteren Ergebnisse gegenüber der aktuellen Studie könnten jedoch nicht nur dem Feilensystem, sondern auch dem Kanalaufbau geschuldet sein, da hier ovale Kanäle gewählt wurden, die einen gleichmäßigen Abtrag in allen Kanalbereichen erschweren [83].

Die Revisionseffizienz des *F360*-Systems stellt laut der Ergebnisse eine gute Alternative zu den Revisionssystemen in den Vergleichsstudien dar. Ob die Reinigungseffizienz durch das *F360*-System für eine erfolgreiche Nachbehandlung ausreicht, steht jedoch zur Diskussion. Eine Erhöhung der Aufbereitungsgröße, wie sie in manchen Studien zur Verbesserung der Reinigungsleistung empfohlen wird [116], würde bei *F360* ebenfalls möglich sein, weil hiermit noch eine weitere Instrumentengröße angeboten wird. Zudem wäre neben der Verwendung von Eukalyptol auch noch eine zirkumferente Bearbeitung der Wurzelkanaloberfläche möglich, welche bei zunehmenden Instrumentengrößen auch eine laterale Bearbeitung aufgrund der zunehmenden Rigidität der Instrumente zulassen würde.

## Effekt von Eukalyptusöl als Lösungsmittel

Die Ergebnisse zeigten nach der Verwendung von Eukalyptusöl in allen Kanalabschnitten systemunabhängig geringere Werte von Wurzelfüllmaterial gegenüber Revisionschritt 1. Es ist davon auszugehen, dass in dieser Studie das Lösungsmittel nicht instrumentierte Bereiche erreichen konnte und so zu einem höheren Anteil an füllmaterialfreier Kanaloberfläche im Vergleich zum 1. Revisionschritt führte. Auch die lösenden Eigenschaften des Lösungsmittels auf die Sealerreste haben vermutlich zu diesem Ergebnis beigetragen.

In vorherigen Studien wurde durch die Anwendung von Lösungsmittel ein Erweichen und Verteilen des Wurzelfüllmaterials an den Kanalwänden vermutet [59,126]. In der Studie von *Horvath et al. (2009)* wurden während der Revision mittels manuellen Hedströmfeilen verschiedene Lösungsmittel angewandt und mit einer Kontrollgruppe ohne Lösungsmittel verglichen. In der Gruppe ohne Lösungsmittel konnten weniger Wurzelfüllmaterialreste ermittelt werden [64]. In der Studie wies Chloroform im Vergleich zu Eukalyptusöl eine geringere Revisionseffizienz auf. Dies könnte durch dessen ausgeprägteren Lösungseffekt auf Guttaperchabestandteile bedingt sein. Die angewandte laterale Kondensationstechnik sowie die Wahl von Hedströmfeilen als Revisionsinstrument, scheint es hier zu keiner Verdrillung des Guttaperchastifts um die Feile geführt zu haben. Eine Entfernung der Wurzelkanalfüllung in toto konnte nicht erreicht werden. Folglich kann das Lösungsmittel seinen hier unerwünschten Nebeneffekt auf die Guttapercharesten frei entfalten. Auch die zusätzliche Kanalvergrößerung konnte diesen Effekt nicht ausgleichen [64]. In der aktuellen Studie konnte Guttapercha aufgrund der Einstifttechnik und des zuvor erfolgten Revisionschritt 1 mit der maschinellen *F360*-Feile in allen Versuchsgruppen zu Beginn entfernt werden. Es besteht daher kein Effekt des Lösungsmittels auf die Guttapercha und somit auch kein Verteilen an der Wurzelkanaloberfläche, welches die besseren Ergebnisse nach dessen Einsatz in dieser Studie vermuten lässt. *Magalhaes et al. (2007)* konnten durch die Verwendung von unterschiedlichen Lösungsmitteln ohne zusätzliches Revisionsinstrument auch bei enthaltenen Guttaperchaanteilen einen Lösungseffekt aufzeigen, wodurch keine Verteilung von Guttapercharesten an der Kanalwand resultierte [94]. Demnach besteht Grund zur Annahme, dass die Verteilung der Guttaperchaanteile an den Kanalwänden eine zusätzliche Instrumentierung des Wurzelkanals voraussetzt [94]. Dies erklärt auch die schlechteren Ergebnisse bei der Verwendung von Eukalyptusöl im Vergleich zur isolierten Instrumentierung mit 2 verschiedenen maschinellen Systemen in einer Vergleichsstudie [83]. Die schlechtere

Revisionseffizienz durch den Einsatz von Lösungsmittel aufgrund von Erweichen und Verteilen der Wurzelfüllmaterialien an den Kanalwänden, wie es in Vorgängerstudien zur Diskussion stand, konnte somit in der aktuellen Studie nicht bestätigt werden.

*Campello et al. (2019)* konnten keine Erhöhung der Revisionseffizienz durch die Verwendung von Eukalyptusöl feststellen. Die Verwendung war im 1. Revisions-schritt durch ein *Mtwo*-Feilensystem sowie im 2. Revisions-schritt durch den *XP-Endo-Finisher R* nicht ausschlaggebend. Dies kann auf die unterschiedlichen anatomischen Gegebenheiten der Versuchszähne zurückzuführen sein. Hier wurden Zähne mit Wurzeln vom Vertucci IV-Typ mit Isthmus gewählt. Die Ergebnisse lassen auf eine begrenzte Erreichbarkeit des Lösungsmittels auf schwer zugängliche Bereiche schließen [24]. In der aktuellen Studie konnte durch die speziell ausgewählten Versuchszähne mit geradem Kanalverlauf und rundem Kanaldurchmesser ein verstärkter Reinigungseffekt durch den zusätzlichen Einsatz von Eukalyptusöl festgestellt werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, den Nutzen der zusätzlichen Verwendung von Lösungsmittel in Abhängigkeit zur Kanal-anatomie weiterführend zu untersuchen.

Demnach bieten die Ergebnisse dieser Studie Anlass dafür, den Einsatz von Eukalyptusöl mit oder ohne Aktivierung nach erfolgtem 1. Revisions-schritt bei runden geraden Wurzelkanälen zu befürworten.

### **Die Versuchsgruppen im Vergleich**

In dieser Studie konnten ausschließlich im apikalen Bereich signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen ermittelt werden. Die Aktivierung durch die schallaktivierte *SF65*-Spitze (Gruppe 4) konnte im Vergleich zur Kontrollgruppe ohne Aktivierung des Lösungsmittels (Gruppe 1) signifikant mehr Wurzelkanaloberfläche von Wurzelkanalfüllmaterial befreien (Mann-Whitney:  $p=0,005^*$ ). Auch im Verhältnis zur mechanischen Aktivierung mittels *CanalBrush* (Gruppe 3) sind die Ergebnisse in Gruppe 4 (*SF65*) deutlich suffizienter (Mann-Whitney:  $p=0,001^*$ ). Durch die Verwendung der *SF65*-Spitze konnten 15,5 % (MDW) an Materialrückständen zusätzlich gelöst werden und es verblieben im Durchschnitt 15 % (MDW) an der apikalen Kanalwand. Dies lässt sich durch die Wirkweise von schallstimulierten Flüssigkeiten erklären, denn das aktivierte Lösungsmittel wird hier in schnelle und kontinuierliche Bewegung versetzt. Die Schallaktivierung führte vermutlich zu einer vergrößerten Kontaktfläche der Kanalwand und die lösenden Eigenschaften des Eukalyptusöls wurden in ihrer Effizienz erhöht. Da dieser Effekt

im Vergleich zu den anderen Gruppen nur im apikalen Bereich zu einer signifikant besseren Reinigungseffizienz führte, ist anzunehmen, dass die Schallaktivierung vor allem in anatomisch engen Kanalbereichen von Vorteil ist und sich dieser Effekt vermutlich nach koronal, mit breiterem Kanaldurchmesser, aufhebt.

In der Gruppe 2, in der das Lösungsmittel durch die ultraschallaktivierte *IRRI S*-Spitze stimuliert wurde, lag der Medianwert der zusätzlich durch die Aktivierungstechnik befreiten Kanalwand mit 8,5 % deutlich unter dem der *SF65*-Gruppe (15,5 % MDW). Im Paarvergleich dieser Gruppen konnte anhand des Mann-Whitney-Tests jedoch kein deutlicher Unterschied zu den anderen Versuchsgruppen bestätigt werden. Da auch bei der Ultraschallaktivierung die oben genannten Effekte vermutet werden, könnte die höhere Revisionseffizienz in der Gruppe 4 auf eine höhere Drehzahl von 300.000 Aktivierungen  $\times \text{min}^{-1}$  im *SONICflex-Handstück (LUX 2000L, KaVo)* zurückzuführen sein.

Gruppe 3 (mechanisch betriebene *CanalBrush*) wies mit 5 % (MDW) zusätzlich entferntem Material und mit 33,5 % (MDW) verbliebenem Füllungsresten im apikalen Kanalabschnitt die schlechteste Revisionseffizienz auf. Dies konnte durch die Paarvergleichsanalyse von Gruppe 3 und 4 (*SF65*) bestätigt werden (Mann-Whitney-Test:  $p=0,001^*$ ). Dieses Ergebnis kann auf die fehlenden positiven Eigenschaften bei ultra-/schallaktivierten Flüssigkeit im Vergleich zur mechanischen Arbeitsweise zurückgeführt werden. Eine weitere Erklärung könnte die deutlich geringere Drehzahl von 10.000 U  $\times \text{min}^{-1}$  im *OS30-Winkelstück* sein. Gruppe 3 (*CanalBrush*) erzielte im Vergleich zur Kontrollgruppe eine schlechtere Säuberung des Kanals. Wie bereits genannt, wird ein Verteilen der Materialreste auf die Kanalwand durch die Verwendung von Lösungsmittel und mechanisch betriebenen Instrumenten vermutet. Da in diesem Fall jedoch keine Guttapercha vorhanden war und kein direkter Kontakt zur Kanalwand ausgeübt wurde, liegt die Wahrscheinlichkeit nahe, dass das Lösungsmittel aus dem Kanal befördert worden sein könnte. Denn das Eukalyptusöl kann immerhin als Träger fungieren und die gelösten Bestandteile in Lösung halten, sodass diese herausgespült werden können [135]. Zwischen den 2 Gruppen konnte jedoch kein signifikanter Unterschied ermittelt werden.

In der Kontrollgruppe ohne Aktivierung waren die Ergebnisse nach Aktivierung deutlich schlechter als in Gruppe 4 (*SF65*). Die Medianwerte betragen koronal 16,5 %, mittig 27 % und apikal 27 % im Vergleich zur schallaktivierten Lösung mit koronal 7,5 %, mittig 9 % und apikal 15 %. Die Werte nach dem Revisionsschritt 2 sind demnach nicht allein auf die lösenden Eigenschaften von Eukalyptusöl zurückzuführen. Da anhand der deskriptiven Statistik jedoch nur im apikalen Bereich



signifikante Unterschiede ermittelt wurden, ist anzunehmen, dass die Ergebnisse mehr durch die verbesserte Erreichbarkeit von schwer zugänglichen Bereichen (apikal) als durch die Stimulierung der chemischen Lösungseigenschaften von Eukalyptusöl zurückzuführen sind.

In einer Vergleichsstudie wurden nach erfolgtem Revisionsschritt 1 mit 2 verschiedenen Revisionssystemen (*Mtwo* und *RaCe*) mit oder ohne Eukalyptusöl, ein Revisionsschritt 2 mit schallaktiviertem Eukalyptusöl durch einen *EndoActivator* durchgeführt [83]. Das Lösungsmittel wurde zunächst für 2 min in den Kanal gegeben, anschließend 1 min aktiviert und nach Erneuerung und zusätzlicher Einwirkzeit von 1 min erneut 1 min aktiviert. Dies erfolgte bei einer Drehzahl von 10.000 U x min<sup>-1</sup>. Nach dem Revisionsschritt 1 wurden wie in der vorliegenden Studie in dieser Studie apikal ähnliche Ergebnisse bezüglich wurzelfüllmaterialbedeckter Oberfläche ermittelt. Die Medianwerte wurden nach dem Revisionsschritt 2 im apikalen Kanalabschnitt in der *Mtwo*-Gruppe mit 6,7 % und in der *RaCe*-Gruppe mit 25,9 % gemessen. In der aktuellen Studie konnte mittels Schallaktivierung des Lösungsmittels die apikale Kanalwandoberfläche auf 15 % verbliebene bedeckte Oberfläche reduziert werden. Die besseren Ergebnisse in der *Mtwo*-Gruppe könnten durch die verlängerte Einwirkzeit des Lösungsmittels verursacht worden sein. Es erfolgte nach anfänglichem 2-minütigem Einwirken und erneuter anschließender 1-minütiger Aktivierung, so wie in der aktuellen Studie, zusätzlich eine 1-minütige Einwirkzeit sowie 1-minütige Aktivierung. Demnach hatte das Lösungsmittel mehr Zeit seine Lösungseigenschaften wirksam werden zu lassen und Sealerreste in schwer erreichbaren Abschnitten zu lösen. Zudem stößt die Analyse unter dem Lichtmikroskop mit 10-facher Vergrößerung an ihre Grenzen und Materialreste könnten übersehen worden sein. Die signifikant schlechteren Werte in der *RaCe*-Gruppe könnten durch dessen Feilendesign bedingt sein, welches vermehrt zu nicht instrumentierten Bereichen geführt haben könnte, zudem weist das K-Reamer-Design einen negativen Schneidekantenwinkel auf [129]. Ferner ist durch den negativen Schneidekantenwinkel auch eine Verdichtung gelösten Füllmaterials an die Wurzelkanaloberfläche denkbar.

Diese Bereiche konnten auch durch den Einsatz von schallaktiviertem Eukalyptusöl nicht ausreichend gelöst werden. Dies wird auch durch die höheren Werte nach dem 1. Revisionsschritt bestätigt [83]. Der Vergleich der beiden Studien wirft die Frage auf, ob eine geringe Frequenz des Aktivierungsinstrumentes möglicherweise durch eine längere Einwirk- und Aktivierungszeit des Lösungsmittels ausgeglichen werden konnte. Inwieweit diese benötigte Zeit (hier 5 min) pro Kanal für die Revision pro Kanal im Praxisalltag umsetzbar ist, gilt es zu prüfen.

In den Gruppen 1 bis 3 konnten keine deutlichen Unterschiede bezüglich der gereinigten Kanalwandfläche in den jeweiligen Kanalabschnitten festgestellt werden. In Gruppe 4 konnte aufgrund der bereits aufgestellten Hypothesen im apikalen Bereich im Verhältnis zum mittleren und koronalen Abschnitt signifikant mehr Wurzelfüllmaterial gelöst werden.

Es müsste im Rahmen weiterer Studien ermittelt werden, in welchem Verhältnis die Aktivierungstechnik sowie die unterschiedlichen Frequenzen der eingesetzten Aktivierungsspitzen das Ergebnis beeinflusst haben könnten.

### **Ergebnisse im Vergleich zur Erhöhung der Aufbereitungsgröße**

In dieser Studie sollte durch die Verwendung des gleichen Revisions- und Aufbereitungsinstrumentes ohne einen intentionellen Abtrag an der Kanalwand eine zusätzliche Veränderung der Kanalwand ausgeschlossen werden. Es wurde bewusst eine nicht invasive Vorgehensweise sowie Instrumente gewählt, die zu keinem zusätzlichen Abtrag an der Kanalwand führen. Hintergrund ist, auch eine Technik für die Revision von Wurzelkanalfüllungen in großen Kanallumina zu finden, bei denen keine weitere Erhöhung der Instrumentierungsgröße sinnvoll ist, weil sie eine weitere Schwächung der Wurzel darstellt, so beispielsweise bei Zähnen mit nicht abgeschlossenem Apex. In diesem Zusammenhang sollte eine Alternative zu den in Vorgängerstudien bereits proklamierten „root canal enlargement“ während der Revision gefunden werden.

In der Studie von *Roggendorf et al. (2010)* wurden die Versuchszähne mit dem *ActivGP*-System und dem *GuttaFlow*-System gefüllt. Der Aufbereitungsdurchmesser von ISO 40 mit einem Taper .04 wurde im Laufe der Revisionsbehandlung mit dem *EndoSequence*-System schrittweise auf .04/#50 erhöht. Die bedeckte Kanaloberfläche wurde anhand von Mikro-CT-Scans analysiert. Hier konnte eine signifikante Reduktion der Wurzelfüllmaterialien nach Vergrößerung um 2 Größen der intentionellen Aufbereitungsgröße festgestellt werden. Dabei verblieben im apikalen Kanalabschnitt für *ActivGP* ein Wert von unter 0,2 % und für *GuttaFlow* von unter 0,3 %. Dies ist ein deutlich besseres Ergebnis als in der aktuellen Studie mit 15 % in Gruppe 4 (*SF65*). Jedoch lässt keiner der in der Studie von *Roggendorf et al (2010)* verwendeten Sealer einen direkten Vergleich mit dem in dieser Studie verwendeten *Sealer AH Plus* zu [116]. Wie bereits in Vorgängerstudien bewiesen, erzeugt dieser epoxidharzbasierte Sealer einen sehr hohen Haftverbund zur Kanalwand und ist demnach vergleichsweise schwerer zu entfernen [120,157]. Dies konnte bereits im direkten Vergleich mit der Revidierbarkeit von *GuttaFlow*, einem

Wurzelkanalfüllmaterial mit Guttapercha in Pulverform in einer silikonbasierten Matrix mit Mikrosilberzusatz, festgestellt werden [124]. Zudem konnte in der Studie von *Roggendorf et al. (2010)* durch die Anfertigung von Mikro-CT-Scans aller Wurzeln, laterale Ausbuchtungen und Forminkongruenzen ausgeschlossen werden und ein extrem genaues Matching der Probenzähne erzielt werden, das auch kleinste Abweichungen von der zulässigen Kanalform erfassen konnte [116]. In der vorliegenden Studie erfolgte die Ausmusterung mithilfe von Röntgenfilmen in 2 Ebenen. Diese Methode ist jedoch limitiert und lässt dadurch nicht erkannte Ausbuchtungen in den Kanalwänden vermuten, die auch die hohe Standardabweichung erklären lässt. Ein direkter Vergleich ist hier demnach nicht möglich.

In der Studie von *Rüth (2014)* wurde die Wurzelkanäle mittels Einstifttechnik mit Guttapercha und unterschiedlichen Sealern gefüllt. Auch hier erfolgte eine intentionelle Erweiterung der Wurzelkanalgröße um 2 Größen. Die anschließende Analyse erfolgte mittels Mikrofotografie. In der Versuchsgruppe mit *AH Plus* konnten koronal ein Mittelwert von 16,1 %, mittig 26,5 % und apikal 27,2 % ermittelt werden. Vergleicht man die Mittelwerte mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie, so konnten in allen Gruppen deutlich bessere Reinigungseffizienzen erzielt werden. Ausschließlich in Gruppe 3 (*CanalBrush*) wurde apikal ein höherer Mittelwert festgestellt [124].

In der Studie von *Rüth (2014)* wurde jedoch, wie bereits erwähnt, nach dem 1. Revisionsschritt deutlich mehr Wurzelkanalfüllmaterial an den Kanalwänden nachgewiesen. Um eine bessere Vergleichbarkeit des alleinigen Einflusses der Aktivierungstechnik der intentionellen Kanalvergrößerung gegenüberzustellen, muss der zusätzliche Reinigungseffekt durch Einsatz der Aktivierungstechnik betrachtet werden. Durch die propagierte intentionelle Erhöhung der Aufbereitungsgröße um 2 Größen, konnte der prozentuale Anteil die verbliebenen Wurzelkanalfüllmaterialshalbiert werden. Im Rahmen der aktuellen Studie konnte dies ebenfalls erreicht werden. Im apikalen Kanalabschnitt konnte durch die Schallaktivierung des Lösungsmittels mit der *SF65*-Feile die bedeckte Fläche von 39,83 % (Mittelwert) auf 14,87 % reduziert werden [124]. In allen Gruppen konnte koronal und mittig mehr Wurzelkanalfüllmaterial entfernt werden als in der Studie von *Rüth (2014)*. Dabei war der Unterschied zur Kontrollgruppe und mechanisch betriebenen *CanalBrush* jedoch nur minimal. Im apikalen Bereich konnten in der Kontrollgruppe ohne Aktivierung ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Demnach entspricht die aufbereitungsbedingte Vergrößerung des Kanaldurchmessers hinsichtlich ihrer Revisions-effizienz hier der passiven 3-minütigen Einwirkung von Eukalyptusöl. Mit der mechanischen Aktivierung durch die *CanalBrush* konnte apikal weniger Material

entfernt werden (34,1 % Restmaterial nach Aktivierung). Es wurde vermutet, dass es hier zu einem Transport des Lösungsmittels aus dem Kanal kam und dadurch dessen lösende Eigenschaften durch die geringere Einwirkzeit auch einen geringeren Effekt erzielten. Da die Auswahl der geeigneten Versuchszähne äquivalent in dieser Studie anhand von Röntgenbildern in zwei Ebenen durchgeführt wurde, kann diese Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Auch die Obturationstechnik und Lagerungsdauer, dort 2 Wochen und in der aktuellen Studie hier 3 Wochen, lassen einen guten Vergleich der beiden Studien zu. In der aktuellen Studie kann durch die Verwendung des Digitalmikroskops in 200-facher Auflösung angenommen werden, dass alle Wurzelkanalfüllmaterialreste erfasst wurden. Dem gegenüber kann die verwendete Mikrofotografie in der Vergleichsstudie von *Rüth (2014)* zu nicht erfassten Materialresten führen [124]. Die Aktivierung von Eukalyptusöl in einem Revisionschritt 2 anhand von schall- und ultraschallbetriebenen Ansätzen kann anhand dieser Studie als effiziente minimalinvasive Alternative empfohlen werden.

Die Reinigungseffizienz in der Kontrollgruppe erreichte durch das passive Einwirken des Eukalyptusöls in dieser Studie bereits ähnliche Ergebnisse wie die Erhöhung der initialen Aufbereitungsgröße in der Vergleichsstudie [124]. Daher könnte eine verbesserte Reinigungseffizienz unter Beibehaltung der Aufbereitungsgröße eine zirkumferente Bearbeitung des Wurzelkanals mit dem *F360*-System, mit oder ohne anschließende Aktivierung des Lösungsmittels, darstellen. Der Abtrag der Kanalwand wäre vergleichsweise höher als in dieser Studie, jedoch deutlich substanzschonender als bei intentioneller Erweiterung der Wurzelkanalgröße. Zudem könnte diese Methode, ohne anschließende Aktivierung, die Anzahl der benötigten Instrumente reduzieren und dadurch zu einer Kostenersparnis im Praxisalltag führen. Es müsste im Rahmen weiterer Studien experimentell ermittelt werden, in welchem Verhältnis die Verbesserung der Reinigungseffizienz zu dem erhöhten Substanzverlust steht.

## 9 Schlussfolgerung

Der Einsatz des *F360*-Systems als Revisionsinstrument konnte in dieser Studie, verglichen mit anderen etablierten Revisionssystemen, eine gute Revisionseffizienz erzielen. Da ausschließlich die Wurzelfüllmaterialreste analysiert wurden, sind experimentelle weiterführende Studien nötig, um das *F360*-System auf Praxisalltagstauglichkeit hin zu untersuchen. Demnach sind erforderliche Revisionszeit und die Revision in gekrümmten Kanälen im direkten Vergleich mit etablierten Revisionssystemen erforderlich, um eine endgültige Aussage treffen zu können. Als isoliertes Revisionsverfahren könnte das *F360*-System nach den Ergebnissen mit einer weiteren Instrumentengröße kombiniert werden, die dann durch die 10-er Schritte eine gute Effizienz verspricht. Ferner könnten weitere Revisionstechniken zur erhöhten Reinigungseffizienz kombiniert werden, um eine erfolgreiche Nachbehandlung zu gewährleisten. Die zusätzliche Anwendung von Eukalyptusöl in einem Revisionsschritt 2 führte mit oder ohne Aktivierung zu einer Reduktion des Wurzelfüllmaterials. Demnach kann die Anwendung von Eukalyptusöl in einem zusätzlichen Revisionsschritt nach bereits erfolgter Revision anhand der Ergebnisse dieser Studie empfohlen werden. Der zusätzliche Nutzen einer Aktivierung des Lösungsmittels ist laut dieser Studie von der Aktivierungstechnik abhängig. Die Schallaktivierung konnte vor allem im apikalen Bereich die Revisionseffizienz signifikant verbessern. Hingegen führte die zusätzliche Aktivierung durch die mechanisch betriebene *CanalBrush* zu einer deutlich geringeren Entfernung von Wurzelfüllmaterialresten. Aufgrund der Tatsache, dass im apikalen Bereich der größte Anteil an Füllungsresiduen verblieb, kann die Schallaktivierung möglicherweise zu einer deutlichen Verbesserung der klinischen Situation führen. Da die ausgewählten Versuchszähne mit einem runden und geraden Kanalverlauf keineswegs klinisch die Regel sind, wäre es wichtig, auch weiterführende Experimente mit ovalem Kanalquerschnitt und stärkeren Krümmungsradien zu analysieren. Keine der angewandten Verfahrensmethoden konnte jedoch eine vollständige Entfernung des Wurzelfüllmaterials erreichen.

Im Fokus sollte daher die Vorbeugung einer Revision durch eine suffiziente endodontische Initialbehandlung in Kombination mit einer adäquaten koronalen Restauration stehen. Sollte dennoch eine Revision notwendig sein, ist besonders die in diesem Rahmen angewandte Schallaktivierung von Eukalyptusöl in einem zweiten Revisionsschritt eine effektive und sinnvolle Alternative zu der in der Literatur empfohlenen intentionellen Erweiterung der Aufbereitungsgröße. Klinisch kann dieser

Methode eine wichtige Bedeutung zukommen, da hier eine zusätzliche Schwächung des Zahnes verhindert wird, was insbesondere bei Zähnen mit bereits größer aufbereiteten Wurzelkanälen von Relevanz sein kann. Dies kann die Entstehung von Mikrorissen minimieren und zu einer verbesserten Prognose des Zahnes führen.

## 10 Zusammenfassung

### Hintergrund und Ziele

Der Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung ist nicht immer gewährleistet. Es gibt viele Faktoren, die eine Nachbehandlung notwendig machen. Die orthograde Revision ist nach aktuellem Stand der Wissenschaft die erste Wahl bei einem endodontischen Misserfolg. Die Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials spielt für die Qualität und nicht zuletzt den Erfolg der nachfolgenden erneuten Obturation eine entscheidende Rolle. Ziel dieser Studie war es, eine minimalinvasive Revisionsmethode zu ermitteln, die eine vollständige Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials möglich macht, ohne die Schwächung der Zahnhartsubstanz durch Vergrößerung des Kanaldurchmessers notwendig zu machen. Dabei sollte die Verwendung des Aufbereitungssystems *F360* als Revisionssystem, der Nutzen von Eukalyptusöl in einem 2. Revisionsschritt und dessen Aktivierung anhand von 3 verschiedenen Techniken untersucht werden.

### Material und Methoden

60 humane Zahnwurzeln mit rundem Kanalquerschnitt kleiner ISO 45 wurden auf 14 mm gekürzt und mit dem *F360*-System bis .04/#45 auf eine Arbeitslänge von 13 mm aufbereitet. Danach erfolgte die Trennung der Wurzeln in mesio-distaler Richtung und erneute Reposition mit anschließender Obturation eines Gutta-perchastifts #45 und Sealer *AH Plus* in Einstifttechnik. Die Wurzeln wurden randomisiert in 4 Gruppen (n=15) eingeteilt. Nach 3-wöchiger feuchter Lagerung wurde die Revision mit der *F360*-Feile Größe 45 durchgeführt und es erfolgte die Einteilung jedes Wurzelkanals in einen koronalen, mittleren und apikalen Bereich in 3 mm Abständen. Die Wurzelkanaloberflächen wurden für jede Wurzelhälfte pro Kanalabschnitt mit Hilfe des Digitalmikroskops *Keyence VHX 5000* bei 200facher Vergrößerung fotografiert. Nach erneuter Reposition wurden im Rahmen des 2. Revisions schrittes Eukalyptusöl für 2 min in den Kanal gegeben und es erfolgte eine 1-minütige Aktivierung durch (2) die ultraschallbetriebene *IRRI S-Spitze*, (3) die mechanisch betriebene *CanalBrush*, (4) der schallbetriebene *SF65*-Ansatz oder (1) eine zusätzliche Einwirkzeit von 1 min ohne Aktivierung als Kontrollgruppe. Abschließend wurde eine erneute digitalmikroskopische Aufnahme aller Wurzelhälften, gefolgt von einer quantitativen Erfassung der Wurzelkanalfüllmaterialreste

anhand der erfolgten Aufnahmen mit anschließender statistischer Analyse durchgeführt.

## **Ergebnisse**

Der Revisionschritt 2 konnte in allen Gruppen zu einer verbesserten Revisionseffizienz führen. Ausschließlich im apikalen Kanalabschnitt konnten signifikante Unterschiede unter den Aktivierungstechniken ermittelt werden. Gruppe 4 (*SF65*) erzielte mit zusätzlicher 25,50 % freier Kanalwandfläche im Vergleich zur Gesamtkanaloberfläche eine deutlich gesteigerte Revisionseffizienz gegenüber 5,0 % (Mann-Whitney-Test:  $p=0,001^*$ ) in Gruppe 3 (*CanalBrush*) und 9,50 % (Mann-Whitney-Test:  $p=0,005^*$ ) in Gruppe 1 (ohne Aktivierung). Innerhalb eines Wurzelkanals konnten nur in Gruppe 4 deutliche Unterschiede festgestellt werden. So konnten im apikalen Bereich mit 25,5 % zusätzlicher freier Kanaloberfläche am meisten Material gelöst werden, im Vergleich zu dem koronalen (14 %) (Wilcoxon  $p=0,018^*$ ) und mittleren (16 %) (Wilcoxon  $p=0,020^*$ ) Abschnitt.

## **Schlussfolgerung**

Keine der eingesetzten Techniken führte zu einer vollständigen Entfernung des Wurzelkanalfüllmaterials. Die Anwendung des *F360*-Systems führte bezüglich der Revisionseffizienz zu einem guten Ergebnis im Vergleich zu bereits etablierten Systemen. Eine additive Revisionstechnik wird jedoch empfohlen. Die Verwendung von Eukalyptusöl in einem zweiten Revisionschritt kann klar befürwortet werden. Vor allem die Schallaktivierung des Lösungsmittels konnte eine signifikante Reduktion des Wurzelkanalfüllmaterials im apikalen Kanalabschnitt erreichen. Anhand dieser Studie stellte die zusätzliche Schallaktivierung von Eukalyptusöl eine gute, weil minimalinvasive Alternative zur etablierten Kanalvergrößerung dar. Um diese Revisionstechnik allgemein empfehlen zu können, sind weiterführende Experimente notwendig.



# 11 Summary

## Objectives

The success of a root canal treatment is not always guaranteed. There are many factors that require an endodontic retreatment. According to the current state of science, orthograde retreatment is the treat of choice in case of endodontic failure. The removal of the root filling material plays a decisive role in the quality of the subsequent re-obturation. The aim of this study was to find a minimally invasive retreatment method that allows for a complete removal of the root filling material without necessitating weakening the dentin by increasing the canal diameter. Therefore the use of the *F360* instrumentation system used as a retreatment system, the benefits of using eucalyptol in a second retreatment step, and the activation of the oil using 3 different techniques should be investigated.

## Methods

60 roots of human teeth with a round root canal smaller than ISO 45 were shortened to 14 mm and processed to a working length of 13 mm using the *F360* system up to .04/# 45. Then the roots were sectioned longitudinally in mesio-distal direction and repositioned, followed by obturation using a gutta-percha cone #45 and sealer *AH Plus* in a single-cone technique. The roots were divided into 4 groups (n=15) for further investigation. After 3 weeks storage under clinical conditions (37°C, 100% humidity), the retreatment of the root canal fillings was carried out using the *F360* file #45 and the root canal was divided into coronal, middle and apical areas of 3 mm spacing. The residual obturation material was analyzed for each root half per canal section using digital microscope *Keyence VHX 5000* at 200-fold magnification. Following renewed reduction, eucalyptol was added as part of the 2<sup>nd</sup> retreatment step to the canal for 2 min and activated for 1 minute using (2) the ultrasound operated *IRRI S* tip, (3) the mechanically driven *CanalBrush*, (4) the sonically activated *SF65* or (1) an additional contact time of 1 min without activation as control group. Concluding, a further quantitative assessment of the residual obturation material was performed under the digital microscope with subsequent statistical analysis.

## Results

The second retreatment step resulted in improved cleaning efficiency in all four groups. Significant differences regarding the efficiency of activation techniques could be exclusively within the apical canal section. Group 4 (*SF65*) achieved a significantly increased retreatment efficiency of additional 25.50% versus 5% (Mann-Whitney test:  $p=0.001^*$ ) in group 3 (*CanalBrush*) and 9.50% (Mann-Whitney test:  $p=0.005^*$ ) in group 1 (no activation). Significant differences were only found in the root canals of group 4. In the apical section 25.5% of the obturation material could be removed, compared to 14% (Wilcoxon test:  $p=0.018^*$ ) in the coronal and 16% (Wilcoxon test:  $p=0.020^*$ ) in the middle section.

## Conclusion

None of the investigated activation techniques resulted in a complete removal of the root filling material. Compared to established instrument systems the application of the *F360* system led to satisfactory results in terms of retreatment efficiency. However, an additional retreatment technique is recommended. The use of eucalyptol in a 2<sup>nd</sup> revision step is recommended. Particularly, the sonic activation of the solvent achieved a significant reduction of the root filling material in the apical canal section. Based on this study, the additional sonic activation of eucalyptol provided a favorable minimally invasive alternative to the established root canal enlargement. Further studies are required in order to decide which retreatment technique may be universally recommended.

## 12 Literaturverzeichnis

1. Ahmad M, Roy RA, Kamarudin AG: Observations of acoustic streaming fields around an oscillating ultrasonic file. *Endod Dent Traumatol* 1992; 8: 189-194
2. Akbar I: Radiographic study of the problems and failures of endodontic treatment. *Int J Health Sci (Qassim)* 2015; 9: 111-118
3. Almeida WA de, Leonardo MR, Tanomaru Filho M, Silva LA: Evaluation of apical sealing of three endodontic sealers. *Int Endod J* 2000; 33: 25-27
4. Alves FRF, Marceliano-Alves MF, Sousa JCN, Silveira SB, Provenzano JC, Siqueira JF: Removal of Root Canal Fillings in Curved Canals Using Either Reciprocating Single- or Rotary Multi-instrument Systems and a Supplementary Step with the XP-Endo Finisher. *J Endod* 2016; 42: 1114-1119
5. Aydin B, Kose T, Caliskan MK: Effectiveness of HERO 642 versus Hedstrom files for removing gutta-percha fillings in curved root canals. An ex vivo study. *Int Endod J* 2009; 42: 1050-1056
6. Bali Z, Bali RK, Nagrath S: Prion diseases: risks, characteristics, and infection control considerations in dentistry. *J Investig Clin Dent* 2011; 2: 236-240
7. Barbosa SV, Burkard DH, Spångberg LS: Cytotoxic effects of gutta-percha solvents. *J Endod* 1994; 20: 6-8
8. Barkhordar RA, Goodis HE, Watanabe L, Koumdjian J: Evaluation of temperature rise on the outer surface of teeth during root canal obturation techniques. *Quintessence Int* 1990; 21: 585-8
9. Barletta FB, Rahde NdM, Limongi O, Moura AAM, Zanesco C, Mazocatto G: In vitro comparative analysis of 2 mechanical techniques for removing gutta-percha during retreatment. *J Can Dent Assoc* 2007; 73: 65
10. Baumann MA, Roth A: Effect of experience on quality of canal preparation with rotary nickel-titanium files. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1999; 88: 714-718
11. Baumgartner JC, Cuenin PR: Efficacy of several concentrations of sodium hypochlorite for root canal irrigation. *J Endod* 1992; 18: 605-612
12. Baumgartner JC, Mader CL: A scanning electron microscopic evaluation of four root canal irrigation regimens. *J Endod* 1987; 13: 147-157

13. Bayram E, Dalat D, Bayram M: Solubility evaluation of different root canal sealing materials. *J Contemp Dent Pract* 2015; 16: 96-100
14. Bergmans L, van Cleynenbreugel J, Wevers M, Lambrechts P: Mechanical root canal preparation with NiTi rotary instruments. Rationale, performance and safety. Status report for the American Journal of Dentistry. *Am J Dent* 2001; 14: 324-333
15. Bernardes RA, Duarte MAH, Vivan RR, Alcalde MP, Vasconcelos BC, Bramante CM: Comparison of three retreatment techniques with ultrasonic activation in flattened canals using micro-computed tomography and scanning electron microscopy. *Int Endod J* 2015; 49: 890-897
16. Betti LV, Bramante CM: Quantec SC rotary instruments versus hand files for gutta-percha removal in root canal retreatment. *Int Endod J* 2001; 34: 514-519
17. Bueno CEdS, Delboni MG, Araujo RA de, Carrara HJ, Cunha RS: Effectiveness of rotary and hand files in gutta-percha and sealer removal using chloroform or chlorhexidine gel. *Braz Dent J* 2006; 17: 139-143
18. Bürklein S, Benten S, Schäfer E: Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 2013; 46: 590-597
19. Bürklein S, Benten S, Schäfer E: Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems. Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo. *Int Endod J* 2014; 47: 405-409
20. Bürklein S, Hinschitza K, Dammaschke T, Schäfer E: Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. *Int Endod J* 2012; 45: 449-461
21. Bürklein S, Poschmann T, Schäfer E: Shaping ability of different nickel-titanium systems in simulated S-shaped canals with and without glide path. *J Endod* 2014; 40: 1231-1234
22. Bürklein S, Tsotsis P, Schäfer E: Incidence of dentinal defects after root canal preparation: reciprocating versus rotary instrumentation. *J Endod* 2013; 39: 501-504
23. Camara AC, Aguiar CM, Poli de Figueiredo JA: Assessment of the deviation after biomechanical preparation of the coronal, middle, and apical thirds of

- root canals instrumented with three HERO rotary systems. *J Endod* 2007; 33: 1460-1463
24. Campello AF, Almeida BM, Franzoni MA et al.: Influence of solvent and a supplementary step with a finishing instrument on filling material removal from canals connected by an isthmus. *Int Endod J* 2019; 52: 716-724
  25. Canali LCF, Duque JA, Vivian RR, Bramante CM, Só MVR, Duarte MAH: Comparison of efficiency of the retreatment procedure between Wave One Gold and Wave One systems by Micro-CT and confocal microscopy. An in vitro study. *Clin Oral Investig* 2018; 23: 337-343
  26. Carvalho Maciel AC de, Zaccaro Scelza MF: Efficacy of automated versus hand instrumentation during root canal retreatment. An ex vivo study. *Int Endod J* 2006; 39: 779-784
  27. Cavenago BC, Ordinola-Zapata R, Duarte MAH et al.: Efficacy of xylene and passive ultrasonic irrigation on remaining root filling material during retreatment of anatomically complex teeth. *Int Endod J* 2014; 47: 1078-1083
  28. Chen JL, Messer HH: A comparison of stainless steel hand and rotary nickel-titanium instrumentation using a silicone impression technique. *Aust Dent J* 2002; 47: 12-20
  29. Chhabra N, Gyanani H, Kamatagi L: Smear layer removal efficacy of combination of herbal extracts in two different ratios either alone or supplemented with sonic agitation. An in vitro scanning electron microscope study. *J Conserv Dent* 2015; 18: 374-378
  30. Clinton K, van Himel T: Comparison of a warm gutta-percha obturation technique and lateral condensation. *J Endod*; 2001 Nov; 27: 692-695.
  31. Da Rosa RA, Santini MF, Cavenago BC, Pereira JR, Duarte MAH, So MVR: Micro-CT evaluation of root filling removal after three stages of retreatment procedure. *Braz Dent J* 2015; 26: 612-618
  32. Dall'Agnol C, Hartmann MSM, Barletta FB: Computed tomography assessment of the efficiency of different techniques for removal of root canal filling material. *Braz Dent J* 2008; 19: 306-312
  33. Darcey J, Roudsari RV, Jawad S, Taylor C, Hunter M: Modern Endodontic Principles. Part 5. Obturation. *Dent Update* 2016; 43: 114-116, 119-1120, 123-126 passim

34. de-Figueiredo FED, Lima LF, Lima GS et al.: Apical periodontitis healing and postoperative pain following endodontic treatment with a reciprocating single-file, single-cone approach. A randomized controlled pragmatic clinical trial. *PLoS ONE* 2020; 15: e0227347
35. Demirbuga S, Pala K, Topcuoglu HS, Cayabatmaz M, Topcuoglu G, Ucar EN: Effect of different gutta-percha solvents on the microtensile bond strength of various adhesive systems to pulp chamber dentin. *Clin Oral Investig* 2017; 21: 627-633
36. Dincer AN, Er O, Canakci BC: Evaluation of apically extruded debris during root canal retreatment with several NiTi systems. *Int Endod J* 2015; 48: 1194-1198
37. Duarte MAH, Só MVR, Cimadon VB, Zucatto C, Vier-Pelisser FV, Kuga MC: Effectiveness of rotary or manual techniques for removing a 6-year-old filling material. *Braz Dent J* 2010; 21: 148-152
38. DuLac KA, Nielsen CJ, Tomazic TJ, Ferrillo PJ, Hatton JF: Comparison of the obturation of lateral canals by six techniques. *J Endod* 1999; 25: 376-380
39. Ebert J, Roggendorf M: Das NiTi-System F360 – Erste Ergebnisse. *ZWR* 2013; 122: 582-585
40. Edgar SW, Marshall JG, Baumgartner JC: The antimicrobial effect of chloroform on *Enterococcus faecalis* after gutta-percha removal. *J Endod* 2006; 32: 1185-1187
41. Eldeniz AU, Erdemir A, Belli S: Shear bond strength of three resin based sealers to dentin with and without the smear layer. *J Endod* 2005; 31: 293-296
42. Eldeniz AU, Ørstavik D: A laboratory assessment of coronal bacterial leakage in root canals filled with new and conventional sealers. *Int Endod J* 2009; 42: 303-312
43. Endo MS, Ferraz CCR, Zaia AA, Almeida JFA, Gomes BPFA: Quantitative and qualitative analysis of microorganisms in root-filled teeth with persistent infection. Monitoring of the endodontic retreatment. *Eur J Dent* 2013; 7: 302-309
44. Eriksson AR, Albrektsson T: Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury. A vital-microscopic study in the rabbit. *J Prosthet Dent* 1983; 50: 101-107

45. Fabricius L, Dahlén G, Sundqvist G, Happonen R-P, Möller AJR: Influence of residual bacteria on periapical tissue healing after chemomechanical treatment and root filling of experimentally infected monkey teeth. *Eur J Oral Sci* 2006; 114: 278-285
46. Facer SR, Walton RE: Intracanal distribution patterns of sealers after lateral condensation. *J Endod* 2003; 29: 832-834
47. Ferreira JJ, Rhodes JS, Ford TR: The efficacy of gutta-percha removal using ProFiles. *Int Endod J* 2001; 34: 267-274
48. Figueiredo FED de, Lima LF, Oliveira LS et al.: Effectiveness of a reciprocating single file, single cone endodontic treatment approach. A randomized controlled pragmatic clinical trial. *Clin Oral Investig* 2020; 24: 2247-2257
49. Friedman S, Abitbol S, Lawrence HP: Treatment outcome in endodontics. The Toronto Study. Phase 1: initial treatment. *J Endod* 2003; 29: 787-793
50. Friedman S, Mor C: The success of endodontic therapy--healing and functionality. *J Calif Dent Assoc* 2004; 32: 493-503
51. Garip Y, Gunday M: The use of computed tomography when comparing nickel-titanium and stainless steel files during preparation of simulated curved canals. *Int Endod J* 2001; 34: 452-457
52. Gençoğlu N, Garip Y, Baş M, Samani S: Comparison of different gutta-percha root filling techniques. Thermafil, Quick-fill, System B, and lateral condensation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2002; 93: 333-336
53. Gergi R, Sabbagh C: Effectiveness of two nickel-titanium rotary instruments and a hand file for removing gutta-percha in severely curved root canals during retreatment. An ex vivo study. *Int Endod J* 2007; 40: 532-537
54. Giuliani V, Cocchetti R, Pagavino G: Efficacy of ProTaper universal retreatment files in removing filling materials during root canal retreatment. *J Endod* 2008; 34: 1381-1384
55. Gok T, Capar ID, Akcay I, Keles A: Evaluation of different techniques for filling simulated C-shaped canals of 3-dimensional printed resin Teeth. *J Endod* 2017 Sep; 43:1559-1564

56. Gomes BPFA, Pinheiro ET, Jacinto RC, Zaia AA, Ferraz CCR, Souza-Filho FJ: Microbial analysis of canals of root-filled teeth with periapical lesions using polymerase chain reaction. *J Endod* 2008; 34: 537-540
57. Gregorio C de, Estevez R, Cisneros R, Paranjpe A, Cohenca N: Efficacy of different irrigation and activation systems on the penetration of sodium hypochlorite into simulated lateral canals and up to working length. An in vitro study. *J Endod* 2010; 36: 1216-1221
58. Grischke J, Muller-Heine A, Hulsmann M: The effect of four different irrigation systems in the removal of a root canal sealer. *Clin Oral Investig* 2014; 18: 1845-1851
59. Gu L-S, Ling J-Q, Wei X, Huang X-Y: Efficacy of ProTaper Universal rotary retreatment system for gutta-percha removal from root canals. *Int Endod J* 2008; 41: 288-295
60. Hammad M, Qualtrough A, Silikas N: Three-dimensional evaluation of effectiveness of hand and rotary instrumentation for retreatment of canals filled with different materials. *J Endod* 2008; 34: 1370-1373
61. Hardie EM: Heat transmission to the outer surface of the tooth during the thermo-mechanical compaction technique of root canal obturation. *Int Endod J* 1986; 19: 73-77
62. Hassanloo A, Watson P, Finer Y, Friedman S: Retreatment efficacy of the Epiphany soft resin obturation system. *Int Endod J* 2007; 40: 633-643
63. Hoen MM, Pink FE: Contemporary endodontic retreatments. An analysis based on clinical treatment findings. *J Endod* 2002; 28: 834-836
64. Horvath SD, Altenburger MJ, Naumann M, Wolkewitz M, Schirrmeister JF: Cleanliness of dentinal tubules following gutta-percha removal with and without solvents: a scanning electron microscopic study. *Int Endod J* 2009; 42: 1032-1038
65. [http://www.dentalmagazin.de/praxiszahnmedizin/zahnerhaltung/Ein-System-fuer-Revision-und-Aufbereitung\\_105414.html#1](http://www.dentalmagazin.de/praxiszahnmedizin/zahnerhaltung/Ein-System-fuer-Revision-und-Aufbereitung_105414.html#1), (abgerufen am 18.05.2017)
66. [https://www.kometdental.de/~media/KometDental/Brochures/SyncFolder/419093\\_pdf.pdf](https://www.kometdental.de/~media/KometDental/Brochures/SyncFolder/419093_pdf.pdf); (abgerufen am 20.06.2017)



67. [https://www.kometdental.de/Info-Center.aspx#/q-f360/typ-showroom\\_filter\\_brochures/p-1/som-0/req-6](https://www.kometdental.de/Info-Center.aspx#/q-f360/typ-showroom_filter_brochures/p-1/som-0/req-6), (abgerufen am 18.07.2017)
68. <https://www.vdw-dental.com/sortiment/produktdetail/irri-feilen>, (abgerufen am 18.07.2017)
69. Hülsmann M, Bluhm V: Efficacy, cleaning ability and safety of different rotary NiTi instruments in root canal retreatment. *Int Endod J* 2004; 37: 468-476
70. Hülsmann M, Schade M, Schäfers F: A comparative study of root canal preparation with HERO 642 and Quantec SC rotary Ni-Ti instruments. *Int Endod J* 2001; 34: 538-546
71. Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH: Mechanical preparation of root canals. Shaping goals, techniques and means. *Endod Topics* 2005; 10: 30-76
72. Hunter KR, Doblecki W, Pelleu GB, JR: Halothane and eucalyptol as alternatives to chloroform for softening gutta-percha. *J Endod* 1991; 17: 310-311
73. Imura N, Kato AS, Hata GI, Uemura M, Toda T, Weine F: A comparison of the relative efficacies of four hand and rotary instrumentation techniques during endodontic retreatment. *Int Endod J* 2000; 33: 361-366
74. Kahn FH, Rosenberg PA, Schertzer L, Korthals G, Nguyen PNT: An in-vitro evaluation of sealer placement methods. *Int Endod J* 1997; 30: 181-186
75. Kamalasanan RR, Devarasanahalli SV, Aswathanarayana RM, Rashmi K, Gowda Y, Nadig RR: Effect of 5% chlorine dioxide Irrigant on micro push out bond strength of resin sealer to radicular Dentin. An In Vitro Study. *J Clin Diagn Res* 2017; 11: 49-53
76. Kandaswamy D, Venkateshbabu N, Arathi G, Roohi R, Anand S: Effects of various final irrigants on the shear bond strength of resin-based sealer to dentin. *J Conserv Dent* 2011; 14: 40-42
77. Kandemir Demirci G, Çalışkan MK: A prospective randomized comparative Study of cold lateral Condensation versus core/gutta-percha in Teeth with periapical Lesions. *J Endod* 2016; 42: 206-210
78. Karatekin AÖ, Keleş A, Gençoğlu N: Comparison of continuous wave and cold lateral condensation filling techniques in 3D printed simulated C-shape canals instrumented with Reciproc Blue or Hyflex EDM; *PloS ONE*; 2019: e0224793.

79. Kerekes K, Tronstad L: Long-term results of endodontic treatment performed with a standardized technique. *J Endod* 1979; 5: 83-90
80. Kesim B, Üstün Y, Aslan T, Topçuoğlu HS, Şahin S, Ulasan Ö: Efficacy of manual and mechanical instrumentation techniques for removal of overextended root canal filling material. *Niger J Clin Pract* 2017; 20: 761-766
81. Keskin C, Sariyilmaz E, Sariyilmaz O: Effect of solvents on apically extruded debris and irrigant during root canal retreatment using reciprocating instruments. *Int Endod J* 2017; 50:1084-1088
82. Kfir A, Tsesis I, Yakirevich E, Matalon S, Abramovitz I: The efficacy of five techniques for removing root filling material. Microscopic versus radiographic evaluation. *Int Endod J* 2012; 45: 35-41
83. Kleye Christin: Vergleich zweier maschineller Nickel-Titan-Revisionssysteme hinsichtlich der Revisions-effizienz von Wurzelkanalfüllungen in ovalen Wurzelkanälen mit und ohne Einsatz des Lösungsmittels Eukalyptol. *Med Diss; Philipps-Universität Marburg* 2014
84. Koçak MM, Koçak S, Türker SA, Sağlam BC: Cleaning efficacy of reciprocal and rotary systems in the removal of root canal filling material. *J Conserv Dent* 2016; 19: 184-188
85. Kojima K, Inamoto K, Nagamatsu K et al.: Success rate of endodontic treatment of teeth with vital and nonvital pulps. A meta-analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2004; 97: 95-99
86. Kucukyilmaz E, Savas S, Saygili G, Uysal B: Assessment of apically extruded debris and irrigant produced by different nickel-titanium instrument systems. *Braz Oral Res* 2015; 29: 1-6
87. Kvist T: Endodontic retreatment. Aspects of decision making and clinical outcome. *Swed Dent J Suppl* 2001; 25: 1-57
88. Lai SC, Mak YF, Cheung GS et al.: Reversal of compromised bonding to oxidized etched dentin. *J Dent Res* 2001; 80: 1919-1924
89. Lee FS, van Cura JE, BeGole E: A comparison of root surface temperatures using different obturation heat sources. *J Endod* 1998; 24: 617-620
90. Lee JH, Park JB, Andreasen GF, Lakes RS: Thermomechanical study of Ni-Ti alloys. *J Biomed Mater Res* 1988; 22: 573-588

91. Lu Y, Wang R, Zhang L et al.: Apically extruded debris and irrigant with two Ni-Ti systems and hand files when removing root fillings. A laboratory study. *Int Endod J* 2013; 46: 1125-1130
92. Lumley PJ, Blunt L, Walmsley AD, Marquis PM: Analysis of the surface cut by sonic files. *Endod Dent Traumatol* 1996; 12: 240-245
93. Lumley PJ, Walmsley AD, Laird WRE: Streaming patterns produced around endosonic files. *Int Endod J* 1991; 24: 290-297
94. Magalhaes BS, Johann JE, Lund RG, Martos J, Del Pino FAB: Dissolving efficacy of some organic solvents on gutta-percha. *Braz Oral Res* 2007; 21: 303-307
95. Malki M, Verhaagen B, Jiang L-M et al.: Irrigant flow beyond the insertion depth of an ultrasonically oscillating file in straight and curved root canals. Visualization and cleaning efficacy. *J Endod* 2012; 38: 657-661
96. Marfisi K, Mercade M, Plotino G, Duran-Sindreu F, Bueno R, Roig M: Efficacy of three different rotary files to remove gutta-percha and Resilon from root canals. *Int Endod J* 2010; 43: 1022-1028
97. Martos J, Bassotto APS, Gonzalez-Rodriguez MP, Ferrer-Luque CM: Dissolving efficacy of eucalyptus and orange oil, xylol and chloroform solvents on different root canal sealers. *Int Endod J* 2011; 44: 1024-1028
98. Mello Junior JE de, Cunha RS, Bueno CEdeS, Zuolo ML: Retreatment efficacy of gutta-percha removal using a clinical microscope and ultrasonic instruments: part I--an ex vivo study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009; 108: 59-62
99. Merino A, Estevez R, Gregorio C de, Cohenca N: The effect of different taper preparations on the ability of sonic and passive ultrasonic irrigation to reach the working length in curved canals. *Int Endod J* 2013; 46: 427-433
- 100 Meyer KM, Kollmar F, Schirrmeyer JF, Schneider F, Hellwig E: Analysis of shrinkage of different gutta-percha types using optical measurement methods. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2006; 116: 356-361
101. Mohammadi Z, Shalavi S, Giardino L, Palazzi F, Asgary S: Impact of Ultrasonic Activation on the Effectiveness of Sodium Hypochlorite: A Review. *Iran Endod J* 2015; 10: 216-220

102. Morgan LF, Montgomery S: An evaluation of the crown-down pressureless technique. *J Endod* 1984; 10: 491-498
103. Müller GG, Schonhofen AP, Mora PMPK, Grecca FS, So MVR, Bodanezi A: Efficacy of an organic solvent and ultrasound for filling material removal. *Braz Dent J* 2013; 24: 585-590
104. Ørstavik D, Nordahl I, Tibballs JE: Dimensional change following setting of root canal sealer materials. *Dent Mater* 2001; 17: 512-519
105. Paragliola R, Franco V, Fabiani C et al.: Final rinse optimization. Influence of different agitation protocols. *J Endod* 2010; 36: 282-285
106. Peak JD, Hayes SJ, Bryant ST, Dummer PMH: The outcome of root canal treatment. A retrospective study within the armed forces (Royal Air Force). *Br Dent J* 2001; 190:140-144
107. Peng L, Ye L, Tan H, Zhou X: Outcome of root canal obturation by warm gutta-percha versus cold lateral condensation. A meta-analysis. *J Endod* 2007; 33: 106-109
108. Pertot WJ, Camps J, Damiani MG: Transportation of curved canals prepared with canal master U, canal master U niti, and stainless steel K-type files. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1995; 79: 504-509
109. Peters OA: Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems. A review. *J Endod* 2004; 30: 559-567
110. Pitout E, Oberholzer TG: Leakage of teeth root-filled with GuttaFlow and a single GP cone compared to lateral condensation and warm vertical condensation; *SA Dental J* 2009; 64: 104, 106-108.
111. Rapisarda E, Bonaccorso A, Tripi TR, Fragalk I, Condorelli GG: The effect of surface treatments of nickel-titanium files on wear and cutting efficiency. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2000; 89: 363-368
112. Rapisarda E, Tripi TR, Bonaccorso A: Analisi termoelastica di lime endodontiche in nichel-titanio. *Minerva Stomatol* 2000; 49: 93-99
113. Rios MdA, Villela AM, Cunha RS et al.: Efficacy of 2 reciprocating systems compared with a rotary retreatment system for gutta-percha removal. *J Endod* 2014; 40: 543-546

114. Rödiger T, Reicherts P, Konietzschke F, Dullin C, Hahn W, Hülsmann M: Efficacy of reciprocating and rotary NiTi instruments for retreatment of curved root canals assessed by micro-CT. *Int Endod J* 2014; 47: 942-948
115. Rödiger T, Wagner J, Wiegand A, Rizk M: Efficacy of the ProTaper retreatment system in removing Thermafil, GuttaCore or vertically compacted gutta-percha from curved root canals assessed by micro-CT. *Int Endod J* 2018; 51: 808-815
116. Roggendorf MJ, Legner M, Ebert J, Fillery E, Frankenberger R, Friedman S: Micro-CT evaluation of residual material in canals filled with Activ GP or GuttaFlow following removal with NiTi instruments. *Int Endod J* 2010; 43: 200-209
117. Roggendorf MJ FR: Maschinelle Nickel-Titan-Systeme im Überblick. *Quintessenz*; 2012; 63: 31-37
118. Romero A, Green D, Wucherpfennig A: Heat transfer to the periodontal ligament during root obturation procedures using an in vitro model. *J Endod* 2000; 26: 85-87
119. Roy RA, Ahmad M, Crum LA: Physical mechanisms governing the hydrodynamic response of an oscillating ultrasonic file. *Int Endod J* 1994; 27: 197-207
120. Rubio J, Zarzosa JI, Pallarés A: A Comparative Study of shaping ability of four rotary systems. *Acta Stomatol Croat* 2015; 49: 285-293
121. Rubio J, Zarzosa JI, Pallarés A: Comparison of shaping ability of 10 rotary and reciprocating Systems. An in vitro Study with AutoCad. *Acta Stomatol Croat* 2017; 51: 207-216
122. Ruddle CJ: Nickel-titanium rotary systems. Review of existing instruments and geometries. *Dent Today* 2000; 19: 86-8, 90-5
123. Rueggeberg FA, Margeson DH: The effect of oxygen inhibition on an unfilled/filled composite system. *J Dent Res* 1990; 69: 1652-1658
124. Rüdth A: Revidierbarkeit adhäsiver Sealer im Vergleich zu nicht-adhäsiven Sealern. *Med Diss*; Philipps-Universität Marburg 2014
125. Sabins RA, Johnson JD, Hellstein JW: A comparison of the cleaning efficacy of short-term sonic and ultrasonic passive irrigation after hand instrumentation in molar root canals. *J Endod* 2003; 29: 674-678

126. Sae-Lim V, Rajamanickam I, Lim BK, Lee HL: Effectiveness of ProFile .04 taper rotary instruments in endodontic retreatment. *J Endod* 2000; 26: 100-104
127. Saleh AM, Vakili Gilani P, Tavanafar S, Schäfer E: Shaping ability of 4 different single-file systems in simulated S-shaped canals. *J Endod* 2015; 41: 548-552
128. Schäfer E: Effect of physical vapor deposition on cutting efficiency of nickel-titanium files. *J Endod* 2002; 28: 800-802
129. Schäfer E, Vlassis M: Comparative investigation of two rotary nickel-titanium instruments. ProTaper versus RaCe. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 2004; 37: 239-248
130. Schäfer E, Zandbiglari T: A comparison of the effectiveness of chloroform and eucalyptus oil in dissolving root canal sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2002; 93: 611-616
131. Schirrmeister JF: Der Einsatz von Lösungsmitteln während der Revision von Wurzelkanalbehandlungen, *Endodontie* 2006; 15, 325-335
132. Schirrmeister JF, Hermanns P, Meyer KM, Goetz F, Hellwig E: Detectability of residual Epiphany and gutta-percha after root canal retreatment using a dental operating microscope and radiographs--an ex vivo study. *Int Endod J* 2006; 39: 558-565
133. Schirrmeister JF, Meyer KM, Hermanns P, Altenburger MJ, Wrbas K-T: Effectiveness of hand and rotary instrumentation for removing a new synthetic polymer-based root canal obturation material (Epiphany) during retreatment. *Int Endod J* 2006; 39: 150-156
134. Schirrmeister JF, Wrbas K-T, Schneider FH, Altenburger MJ, Hellwig E: Effectiveness of a hand file and three nickel-titanium rotary instruments for removing gutta-percha in curved root canals during retreatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2006; 101: 542-547
135. Seol GH, Kim KY: Eucalyptol and its role in chronic diseases. *Adv Exp Med Biol* 2016; 929: 389-398
136. Setya G, Nagpal A, Kumar S, Ingle NA: Comparison of root canal sealer distribution in obturated root canal. An in-vitro study. *J Int Soc Prev Community Dent* 2014; 4: 193-197

137. Shemesh H, Roeleveld AC, Wesselink PR, Wu M-K: Damage to root dentin during retreatment procedures. *J Endod* 2011; 37: 63-66
138. Shemesh H, Wesselink PR, Wu M-K: Incidence of dentinal defects after root canal filling procedures. *Int Endod J* 2010; 43: 995-1000
139. Short JA, Morgan LA, Baumgartner JC: A comparison of canal centering ability of four instrumentation techniques. *J Endod* 1997; 23: 503-507
140. Silva EJNL, Belladonna FG, Carapiá MF, Muniz BL, Rocha MS, Moreira EJJ: Micro-computed tomographic evaluation of canal retreatments performed by undergraduate students using different techniques. *Restor Dent Endod* 2018; 43: 5
141. Sim TP, Knowles JC, Ng YL, Shelton J, Gulabivala K: Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain. *Int Endod J* 2001; 34: 120-132
142. Simon S, Machtou P, Tomson P, Adams N, Lumley P: Influence of fractured instruments on the success rate of endodontic treatment. *Dent Update* 2008; 35: 172-174, 176, 178-179
143. Sjogren U, Figdor D, Persson S, Sundqvist G: Influence of infection at the time of root filling on the outcome of endodontic treatment of teeth with apical periodontitis. *Int Endod J* 1997; 30: 297-306
144. Song M, Kim H-C, Lee W, Kim E: Analysis of the cause of failure in nonsurgical endodontic treatment by microscopic inspection during endodontic microsurgery. *J Endod* 2011; 37: 1516-1519
145. Sonntag D, Stachniss-Carp S, Stachniss C, Stachniss V: Determination of root canal curvatures before and after canal preparation (part II). A method based on numeric calculus. *Aust Endod J* 2006; 32: 16-25
146. Stabholz A, Friedman S: Endodontic retreatment--case selection and technique. Part 2. Treatment planning for retreatment. *J Endod* 1988; 14: 607-614
147. Steffen H, Low A, Rosin M, Welk A: Comparison of K hand files and ProFiles 0.06/0.04 in simulated curved root canals prepared by students. *Quintessence Int* 2006; 37: 811-817

148. Stellungnahme der DGZMK und der DGZ.: Zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen. Definition von „erfolgreicher“ und „nicht erfolgreicher“ Wurzelkanalbehandlung. DZZ 56 2001 Stand 11/00
149. Stellungnahme der DGZMK und der DGZ: Revision einer Wurzelkanalbehandlung. Dtsch Zahnärztl Z 59 (2004)
150. Stojcic S, Shen Y, Qian W, Johnson B, Haapasalo M: Antibacterial and smear layer removal ability of a novel irrigant, QMiX. Int Endod J 2012; 45: 363-371
151. Stratton RK, Apicella MJ, Mines P: A fluid filtration comparison of gutta-percha versus Resilon, a new soft resin endodontic obturation system. J Endod 2006; 32: 642-645
152. Sunay H, Tanalp J, Dikbas I, Bayirli G: Cross-sectional evaluation of the periapical status and quality of root canal treatment in a selected population of urban Turkish adults. Int Endod J 2007; 40: 139-145
153. Tabassum S, Khan FR: Failure of endodontic treatment. The usual suspects. Eur J Dent 2016; 10: 144-147
154. Taşdemir T, Er K, Yildirim T et al.: Comparison of the sealing ability of three filling techniques in canals shaped with two different rotary systems: a bacterial leakage study. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod; 2009 Sep; 108: 129-134
155. Tepel J, Schäfer E, Hoppe W: Properties of endodontic hand instruments used in rotary motion. Part 3. Resistance to bending and fracture. J Endod 1997; 23: 141-145
156. Thompson SA: An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. Int Endod J 2000; 33: 297-310
157. Topçuoğlu HS, Demirbuga S, Tuncay Ö, Pala K, Arslan H, Karataş E: The effects of Mtwo, R-Endo, and D-RaCe retreatment instruments on the incidence of dentinal defects during the removal of root canal filling material. J Endod 2014; 40: 266-270
158. Torabinejad M, Corr R, Handysides R, Shabahang S: Outcomes of nonsurgical retreatment and endodontic surgery. A systematic review. J Endod 2009; 35: 930-937



159. Torabinejad M, Ung B, Kettering JD: In vitro bacterial penetration of coronally unsealed endodontically treated teeth. *J Endod* 1990; 16: 566-569
160. Trevisan L, Huerta IR, Michelon C, Bello MDC, Pillar R, Souza Bier CA: The efficacy of passive ultrasonic Activation of organic Solvents on dissolving two root canal sealers. *Iran Endod J* 2017; 12: 25-28
161. Tronstad L, Asbjørnsen K, Døving L, Pedersen I, Eriksen HM: Influence of coronal restorations on the periapical health of endodontically treated teeth. *Endod Dent Traumatol* 2000; 16: 218-221
162. Vajrabhaya L-O, Suwannawong SK, Kamolroongwarakul R, Pewklieng L: Cytotoxicity evaluation of gutta-percha solvents. Chloroform and GP-Solvent (limonene). *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2004; 98: 756-759
163. van der Sluis LWM, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR: Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature. *Int Endod J* 2007; 40: 415-426
164. Versiani MA, Carvalho-Junior JR, Padilha MIAF, Lacey S, Pascon EA, Sousa-Neto MD: A comparative study of physicochemical properties of AH Plus and Epiphany root canal sealants. *Int Endod J* 2006; 39: 464-471
165. Vosen VE: Lichtmikroskopische Analyse des Wurzelzementins nach Kanalinstrumentierung mittels vier verschiedener maschineller Nickel-Titan-Feilensysteme. *Med Diss; Philipps-Universität Marburg* 2013
166. Walia HM, Brantley WA, Gerstein H: An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod* 1988; 14: 346-351
167. Walmsley AD: Ultrasound and root canal treatment. The need for scientific evaluation. *Int Endod J* 1987; 20: 105-111
168. Walmsley AD, Williams AR: Effects of constraint on the oscillatory pattern of endosonic files. *J Endod* 1989; 15: 189-194
169. Weller RN, Koch KA: In vitro temperatures produced by a new heated injectable gutta-percha system. *Int Endod J* 1994; 27: 299-303
170. Wennberg A, Ørstavik D: Evaluation of alternatives to chloroform in endodontic practice. *Endod Dent Traumatol* 1989; 5: 234-237
171. Wilcox LR: Endodontic retreatment. Ultrasonics and chloroform as the final step in reinstrumentation. *J Endod* 1989; 15: 125-128

172. Wilcox LR: Endodontic retreatment with halothane versus chloroform solvent. *J Endod* 1995; 21: 305-307
173. Wilcox LR, Roskelley C, Sutton T: The relationship of root canal enlargement to finger-spreader induced vertical root fracture. *J Endod* 1997; 23: 533-534
174. Wolcott J, Ishley D, Kennedy W, Johnson S, Minnich S, Meyers J: A 5 yr clinical investigation of second mesiobuccal canals in endodontically treated and retreated maxillary molars. *J Endod* 2005; 31: 262-264
175. Wu MK, Ozok AR, Wesselink PR: Sealer distribution in root canals obturated by three techniques. *Int Endod J* 2000; 33: 340-345
176. Yared G: Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *Int Endod J* 2008; 41: 339-344
177. Zmener O, Pameijer CH, Banegas G: Retreatment efficacy of hand versus automated instrumentation in oval-shaped root canals. An ex vivo study. *Int Endod J* 2006; 39: 521-526

## 13 Anhang

### 13.1 Materialliste

<i>AH Plus Jet</i> LOT 1512000323	Dentsply DeTrey, Konstanz
<i>Aislar</i> LOT 010607	Heraeus Kulzer GmbH, Hanau
<i>Aqua bidest</i>	Zahnklinik - Zahnerhaltung und Parodontologie, Universitätsklinikum Marburg
<i>CanalBrush</i> LOT F51603	ROEKO, Coltène Whaledent, Langenau
<i>C-Pilot-Feilen</i> ISO 06 LOT 1006000040 ISO 10 LOT 0712000186 ISO 08 LOT 0709002326	VDW GmbH, München
<i>Diamantbohrer</i>	Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo
<i>Diamantierte Trennscheibe</i> ISO65 LOT 911643 ISO100 LOT 437002	Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo
<i>Digitalmikroskop</i>  Keyence VHX-5000	Werkstoffkunde des Universitätsklinikums Köln
<i>EDTA 17%</i>	Zahnklinik – Abteilung für Zahnerhaltung, Universitätsklinikum Marburg
<i>Einwegskalpell</i> Klingenform 10 LOT 16017510	Aesculap, Tuttlingen
<i>Elipar TM-Polymerisationslampe</i>	3M Espe AG, Seefeld
<i>Endodontie-Winkelstück</i> 6:1 Übersetzung	VDW GmbH, München
<i>Endomotor</i> <i>Endo-it professional</i>	AEU-25 VDW GmbH, München

<i>EndoPilot</i>	Schlumbohm GmbH & Co. KG, Brokstedt
REF 1093208	
<i>EndoPilot-Ansatz Newtron</i>	Satelec Acteon
<i>Eucalyptus globulus</i>	Apotheke der Universitätsklinik Mar- burg
<i>F360</i>	Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo
ISO 25 LOT706011 ISO 35 LOT343425 ISO 45 LOT950220	
<i>Guttaperchastifte .04/#45 LOT B02251016 LOT B02251016</i>	Komet Dental, Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo
<i>Handstück</i>	KaVo, Biberbach
<i>Heavy Flow LOT 1227574</i>	Ivoclar Vivadent, Ellwangen
<i>Heidemannspatel</i>	Aesculap, Tuttlingen
<i>IRRI S-Feilen LOT 908691</i>	VDW GmbH, München
isotonischer Natriumchloridlösung 0,9%	Universitätsklinikum Marburg
<i>K-Reamer ISO 15 LOT 0703002967 ISO 20 LOT 0703003967</i>	VDW GmbH, München
<i>Lentulo ISO 25</i>	VDW GmbH, München
<i>Excel-Tabelle</i>	Microsoft
<i>Lichtmikroskop Zoom-System Z6 Apo</i>	Leica, Wetzlar
<i>Minifix Messlehre</i>	VDW GmbH, München
<i>Minenbleistift</i>	Staedtler Mars GmbH & Co. KG, Nürnberg
<i>Natriumhypochlorit 3%</i>	Speiko, Münster

<i>Natur Modellhartgips</i> Type 3	Pluradur
<i>OS30-Winkelstück</i> REF 11233011 SN02803	Komet Dental, Lemgo
<i>Papierspitzen 04/#45</i> LOT B02281016	Komet Dental, Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo
<i>Pinzette</i>	Aesculap, Tuttlingen
<i>Plugger</i>	Aesculap, Tuttlingen
<i>Rotes Winkelstück</i>	KaVo, Biberbach
<i>Scaler</i>	Carl Martin GmbH, Solingen
<i>Schaumstoffpellets</i>	Voco, Cuxhaven
<i>Schallspitze SF65</i> LOT 985531	Komet Dental, Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo
<i>Silaplast</i> REF 02001	<i>Detax, Ettlingen</i>
<i>Silikonform</i>	Xenos, Marburg
<i>Dentalsonde</i>	Aesculap, Tuttlingen
<i>SONICflex LUX</i> 2000 L D295784	KaVo, Biberbach
<i>Spülkanülen</i>	EndoNeedle Dr. Buquet, Vedefar NV, Dilbeek, Belgien
<i>Telio CS Inlay</i> LOT U22447	Ivoclar Vivadent, Ellwangen
<i>Trimmer HS 88</i>	Wassermann GmbH, Hamburg
<i>VDW. Silver Endomotor</i>	VDW GmbH, München

## 13.2 Statistik

Tabelle 1

Gruppe 1	Ab-schnitt	Mittel-wert (%)	SD (%)	Median-wert (%)	Min. (%)	Max. (%)	IQ (%)	p-Wert (NV)
<b>Vor Aktivierung</b>	koronal	30,73	27,47	26,50	2,50	85,50	30,00	0,016*
	mittig	33,03	22,43	30,50	3,50	82,50	24,50	0,423
	apikal	38,10	19,18	36,50	3,50	85,00	21,00	0,580
<b>Nach Aktivierung</b>	koronal	22,63	21,67	16,50	1,50	77,00	23,00	0,020*
	mittig	24,93	20,41	27,00	1,50	72,00	26,50	0,126
	apikal	27,60	14,44	27,00	2,00	65,00	15,00	0,398
<b>Differenz</b>	koronal	8,10	9,43	7,50	0,00	38,00	8,50	0,00*
	mittig	8,03	6,32	6,00	1,50	25,00	6,50	0,021*
	apikal	10,23	8,16	9,50	1,00	31,50	10,00	0,092

SD= Standardabweichung

NV= Normalverteilung

IQ= Interquartilbereich

p-Wert = Shapiro-Wilk-Test ermittelte p-Wert bei einem Signifikanzniveau von 5%

Tabelle 2

Gruppe 2	Ab-schnitt	Mittel-wert (%)	SD (%)	Median-wert (%)	Min. (%)	Max. (%)	IQ (%)	p-Wert (NV)
<b>Vor Aktivierung</b>	koronal	36,30	21,87	30,50	5,00	72,00	32,00	0,242
	mittig	34,90	20,24	26,00	3,00	68,00	34,50	0,073
	apikal	41,63	19,97	42,50	13,00	71,00	38,00	0,298
<b>Nach Aktivierung</b>	koronal	22,63	19,25	18,50	1,00	62,50	32,50	0,165
	mittig	20,70	15,02	19,00	0,00	45,50	30,50	0,166
	apikal	25,77	15,22	24,00	1,00	50,00	27,50	0,617
<b>Differenz</b>	koronal	14,13	16,18	9,00	2,00	68,50	12,50	0,000*
	mittig	12,73	15,75	9,00	2,00	67,00	9,00	0,000*
	apikal	15,87	17,38	8,50	3,00	58,00	17,50	0,001*

Tabelle 3

Gruppe 3	Ab-schnitt	Mittel-wert (%)	SD (%)	Median-wert (%)	Min. (%)	Max. (%)	IQ (%)	p-Wert (NV)
Vor Aktivierung	koronal	31,80	23,50	17,00	3,50	82,00	36,50	0,059
	mittig	31,33	16,81	26,00	8,50	60,50	24,00	0,242
	apikal	41,43	17,08	38,00	6,50	76,50	22,00	0,981
Nach Aktivierung	koronal	23,37	20,99	13,50	2,50	75,50	33,50	0,017*
	mittig	22,13	14,08	20,50	2,50	56,00	19,50	0,479
	apikal	34,07	15,71	33,50	6,00	59,00	26,00	0,456
Differenz	koronal	8,43	7,96	6,00	1,00	30,50	8,00	0,004*
	mittig	9,07	10,65	4,50	0,00	39,50	10,00	0,001*
	apikal	7,37	7,66	5,00	0,50	27,00	11,00	0,007*

Tabelle 4

Gruppe 4	Ab-schnitt	Mittel-wert (%)	SD (%)	Median-wert (%)	Min. (%)	Max. (%)	IQ (%)	p-Wert (NV)
Vor Aktivierung	koronal	27,37	21,85	23,00	4,00	76,00	25,00	0,046*
	mittig	28,20	22,39	20,50	1,00	67,50	46,00	0,123
	apikal	39,83	19,48	40,50	1,00	66,00	30,50	0,307
Nach Aktivierung	koronal	14,87	16,43	7,50	0,50	53,00	11,50	0,001*
	mittig	12,27	13,24	9,00	0,50	49,00	13,50	0,005*
	apikal	14,87	12,39	15,00	0,50	38,50	22,50	0,156
Differenz	koronal	11,83	9,11	14,00	0,50	34,50	11,50	0,142
	mittig	15,93	13,13	16,00	0,50	39,00	23,50	0,133
	apikal	24,97	15,12	25,50	0,50	55,50	18,00	0,921

Mann Whitney-Test: Differenz koronal nach Aktivierung

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 1			
Gruppe 2	,101		
Gruppe 3	,663	,101	
Gruppe 4	,124	,917	,253

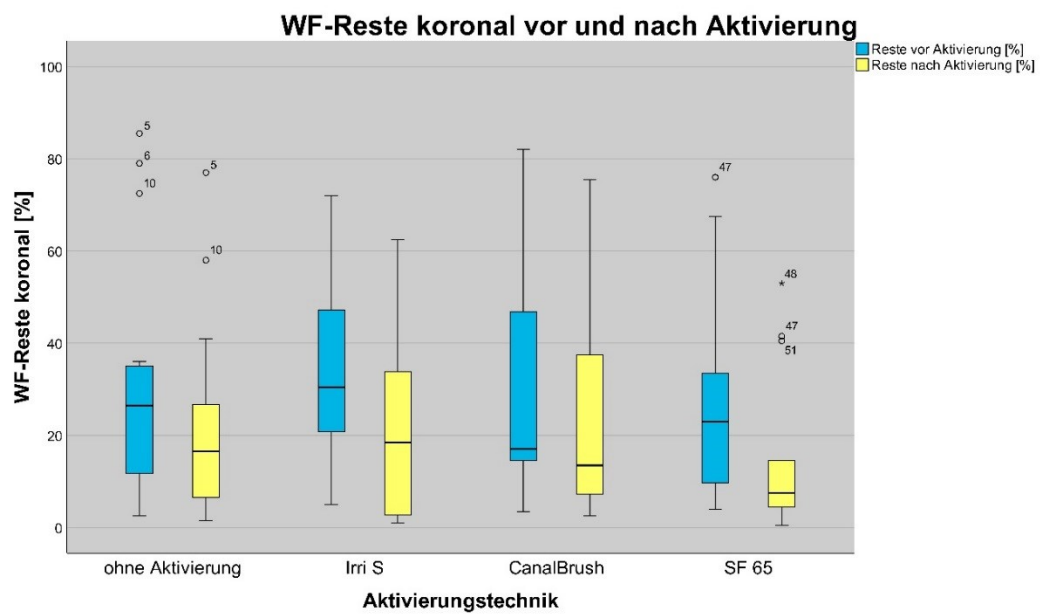
Mann Whitney-Test: Differenz mittig nach Aktivierung

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 1			
Gruppe 2	,350		
Gruppe 3	,589	,205	
Gruppe 4	,135	,443	,198

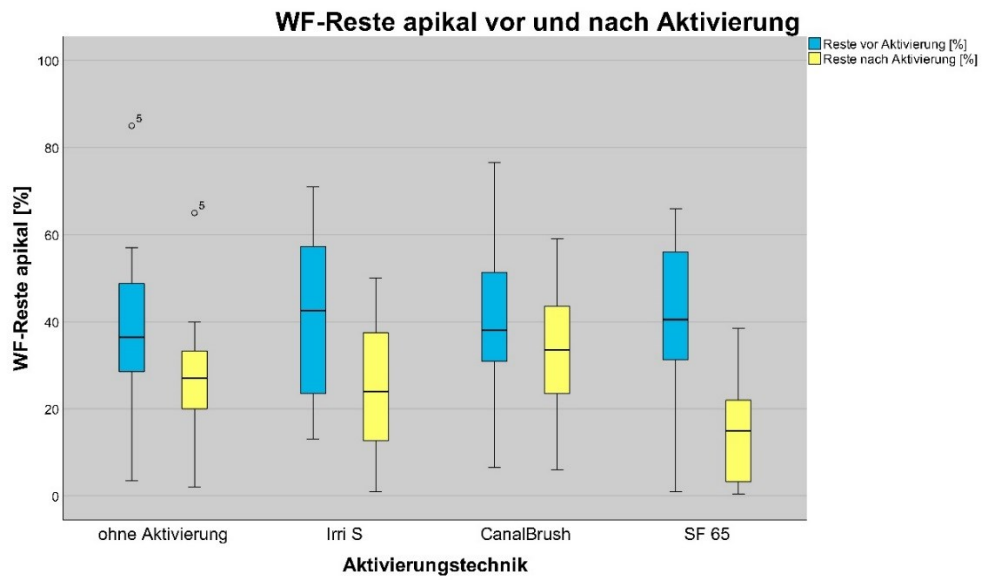
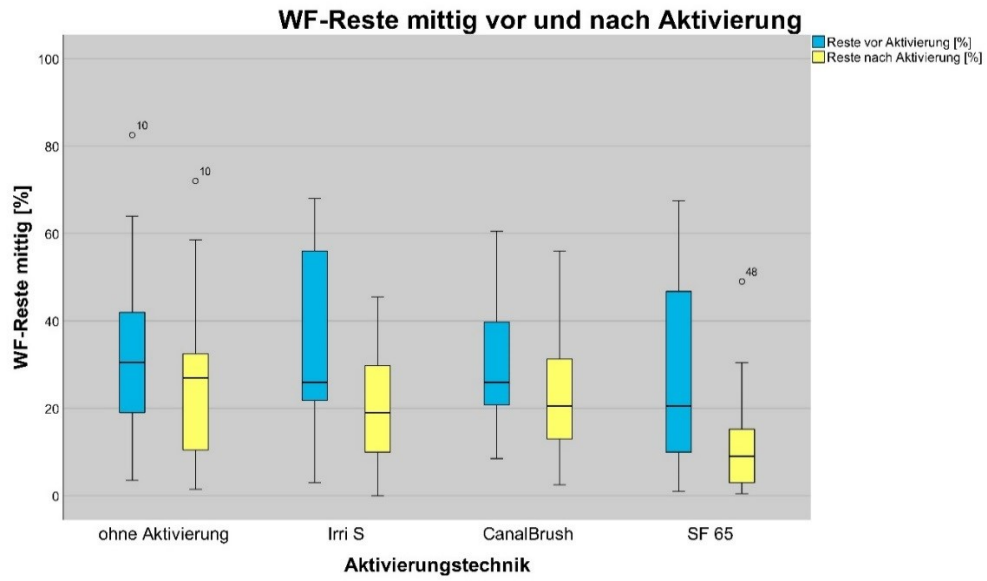
Mann Whitney-Test: Differenz apikal nach Aktivierung

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gruppe 1			
Gruppe 2	,547		
Gruppe 3	,198	,071	
Gruppe 4	,005	,105	,001

Boxplotdiagramme Vergleich WF-Reste vor und nach der Aktivierung







## 14 Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. R. Frankenberger, Direktor der Zahnerhaltungskunde an der Universität Marburg, für die Möglichkeit, diese Arbeit in der Abteilung der Zahnerhaltungskunde zu erarbeiten bedanken.

Herrn Priv.-Doz. Dr. M. J. Roggendorf danke ich für die kompetente Unterstützung und das außergewöhnliche, unermüdliche Engagement bei der Erstellung meiner Arbeit und der statistischen Auswertung. Danke für die überaus hilfsbereite und freundliche Begleitung von Beginn an, weit über die Aufgaben als Betreuer hinaus.

Außerdem bedanke ich mich für die freundliche Unterstützung der Werkstoffkunde und Bereitstellung des Digitalmikroskops während meines experimentellen Teils am Universitätsklinikum Köln, allen voran Dr. H. C. Roggendorf und Dr. F.-J.Faber.

Mein ganz persönlicher Dank geht an alle, die mich während der gesamten Bearbeitungszeit mental unterstützt und motiviert haben, insbesondere meiner Familie und meinen Freund.

## 15 Verzeichnis akademischer Lehrer

Meine akademischen Lehrer im Fachbereich Medizin der Philipps- Universität Marburg waren die Damen und Herren Professoren und Dozenten:

Adamkiewicz, Althaus, Arweiler, Auschill, Braun, Cordes, Frankenberger, Feuser, Gente, Gloerfeld, Korbmacher-Steiner, Lotzmann, Mengel, Milani, Mittag, Moll, Mutters, Neff, Neumüller, Jablonski-Momeni, Pieper, Ramaswamy, Richter, Roggendorf, Oberkircher, Winter