

Aus der Poliklinik für Parodontologie und Zahnerhaltung
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vergleich zweier Wurzelfülltechniken und Wurzelkanalsealer hinsichtlich postoperativer
Komplikationen an mehrwurzeligen Zähnen

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Zahnmedizin
der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Franziska Charlotte Mörsdorf
aus Willich

Mainz, 2026

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. med. Philipp Drees

1.Gutachter: Univ.-Prof. Dr. med. dent. James Deschner

2.Gutachter: PD Dr. med dent. Monika Bjelopavlovic

Tag der Promotion: 2. September 2026

Nutzungsrecht

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung
4.0 International Lizenz (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Widmung

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis	I
2	Abbildungsverzeichnis	II
3	Tabellenverzeichnisverzeichnis.....	IV
4	Ziel der Dissertation	1
5	Literaturdiskussion	4
5.1	Pathophysiologie und Mikrobiologie der apikalen Parodontitis	4
5.2	Klinische und radiologische Diagnostik	5
5.3	Periapical Scoring Index.....	6
5.4	Wurzelkanalmorphologie mehrwurzeliger Zähne	8
5.4.1	Klassifikationen nach Vertucci	9
5.5	Indikationen und Therapieziele primärer Wurzelkanalbehandlung.....	10
5.6	Einflussfaktoren und Behandlungserfolg endodontischer Behandlungen	11
5.6.1	Präoperative Faktoren	12
5.6.2	Intraoperative Faktoren.....	13
5.6.3	Postoperative Faktoren.....	14
5.7	Wurzelkanalfüllmaterialien.....	14
5.8	Guttapercha	15
5.9	Kunstharzbasierte Füllmaterialien	16
5.10	Wurzelkanalsealer	16
5.11	Typen von Wurzelkanalsealern	16
5.12	AH Plus.....	19
5.13	BC Sealer	20
5.14	AH Plus versus BC Sealer.....	22
5.15	Wurzelkanalfülltechniken.....	23
5.16	Einstifttechnik	23
5.17	Laterale Kondensation.....	24
5.18	Laterale Kondensation versus Einstifttechnik.....	25
5.19	Komplikationen	27
6	Material und Methoden	28
6.1	Ethik und Datenschutz.....	28
6.2	Studiendesign und Patientenkollektiv	28
6.3	Datenerhebung	30
6.4	Röntgenologische Auswertung.....	30
6.5	Erhobene Bewertungsparameter.....	31
6.6	Statistische Analyse	33
7	Ergebnisse	33
7.1	Übereinstimmung der Bewertungsergebnisse.....	33
7.2	Beschreibung der Stichprobe und Ausgangsbefunde	34
7.2.1	Verteilung der Fälle nach Behandler und Technik.....	34

7.2.2	Anamnese.....	35
7.2.3	Präendodontischer Zustand.....	36
7.2.4	Postendodontische Versorgung.....	39
7.3	Radiologische Befunde nach der Wurzelkanalfüllung	40
7.3.1	Länge der Wurzelkanalfüllung	40
7.3.2	Homogenität der Wurzelkanalfüllung	44
7.3.3	Gesamtqualität.....	45
7.3.4	PAI im Kontrollbild 1 nach WF	48
7.4	Verteilung postoperativer Komplikationen	49
7.4.1	Zeitpunkt aufgetretener postoperativer Komplikation	52
7.4.2	Behandlungssitzungen	57
7.5	Einfluss der Fülltechnik auf das Auftreten postoperativer Komplikationen	60
7.6	Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Abhängigkeit von der Obturationstechnik.....	63
7.7	Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler unabhängig von der verwendeten Technik	68
8	Diskussion	70
8.1	Zusammensetzung des Patientenkollektiv	70
8.2	Studiendesign	72
8.3	Röntgenbilder	73
8.4	Radiologische Qualitätsparameter	74
8.4.1	Homogenität der Wurzelkanalfüllung	75
8.4.2	Länge der Wurzelkanalfüllung	77
8.5	Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von Obturationstechnik und Ausbildungsstand	79
8.6	Postoperative Komplikationen und Hypothesenprüfung.....	82
8.7	Limitationen	86
8.8	Schlussfolgerung und Ausblick.....	88
9	Zusammenfassung.....	89
10	Literaturverzeichnis	91
11	Anhang	101
11.1	Erhobene Variablen.....	101
11.2	Wurzelfüllungslängen nach Ausbildungsstand	104
11.3	Homogenität der Wurzelkanalfüllung nach Behandlergruppen	105
11.4	Prüfung auf Normalverteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen nach Obturationstechnik.....	110
11.5	Auftreten postoperativer Komplikationen in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand und Technik	112
12	Danksagung	114
13	Tabellarischer Lebenslauf	115

1 Abkürzungsverzeichnis

ASA	American Society of Anesthesiologists
DF	Degrees of freedom
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
ESE	European Society of Endodontology
GKV	Gesetzliche Krankenversicherung
HRQOL	Health-Related Quality of Life
ISO	International Organization for Standardization
KZBV	Kassenzahnärztlichen Bundesvereinigung
Micro-CT	Mikro-Computertomographie
NaOCl	Natriumhypochlorid
OHIP	Oral Health Impact Profile
PAI	Periapical Index
RANK	Receptor Activator of Nuclear Factor κ B
RANKL	Receptor Activator of Nuclear Factor κ B Ligand
SD	Standardabweichung
WF	Wurzelkanalfüllung
WHO	World Health Organization
WSR	Wurzelspitzenresektion
χ^2	Chi-Quadrat-Test

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Referenzröntgenbilder, entsprechende Strichzeichnungen und die dazugehörigen PAI-Scores (Ørstavik et al.) (32).	7
Abbildung 2:	Wurzelkanalkonfiguration nach der Klassifikation von Vertucci (1984) (40).	10
Abbildung 3:	Übersicht über Guttaperchastifte unterschiedlicher Größen entsprechend der ISO-Farbcodierung (eigene Aufnahme).	15
Abbildung 4:	Epoxidharzbasierter Wurzelkanalsealer, AH Plus Jet [®] , Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland (eigene Aufnahme).	20
Abbildung 5:	Kalziumsilikatbasierter Wurzelkanalsealer, TotalFill BC Sealer [®] , FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz (eigene Aufnahme).	21
Abbildung 6:	Schematische Darstellung der lateralen Kondensation von Guttapercha bei der Wurzelkanalfüllung nach Vorbild von Quelle (109).	25
Abbildung 7:	Balkendiagramm zur Verteilung anamnestischer Besonderheiten im untersuchten Patientenkollektiv (n = 333). X-Achse: anamnestischen Vorerkrankungen der Patienten, Y-Achse: Anzahl der Behandlungsfälle als absolute Zahl.	35
Abbildung 8:	Kreisdiagramm zum Ausgangsbefund röntgenologisch sichtbarer apikaler Parodontitis bei der lateralen Kondensation in Prozent.	37
Abbildung 9:	Kreisdiagramm zum Ausgangsbefund röntgenologisch sichtbarer apikaler Parodontitis bei der Einstifttechnik in Prozent.	37
Abbildung 10:	Balkendiagramm zur postendodontischen Versorgung in Abhängigkeit von der verwendeten Fülltechnik in Prozent. X-Achse: postendodontische Versorgung, Y-Achse: Anteil der Fälle je Technik in Prozent. (n = 333).	39
Abbildung 11:	Balkendiagramm zur Verteilung der Fülllängen in Prozent, differenziert nach verwendeter Wurzelkanalfülltechnik.	42
Abbildung 12:	Balkendiagramm zum Vergleich der Füllungshomogenität zwischen AH Plus und BC-Sealer in Prozent. AH Plus (n = 163), BC Sealer (n = 170).	46

Abbildung 13:	Prozentuale Verteilung der dichotomisierten PAI-Kategorien (Code 1–2 vs. Code 3–5) im ersten Kontrollbild nach Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik (n = 333).	50
Abbildung 14:	Balkendiagramm zur Häufigkeit postoperativer Komplikationen nach Anwendung von der lateralen Kondensation, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler in Prozent. X-Achse: postoperative Komplikation, Y-Achse: Anteil der Fälle in Prozent (n = 163).	52
Abbildung 15:	Balkendiagramm zur Art postoperativer Komplikationen nach Anwendung der Einstifttechnik, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler in Prozent. X-Achse: postoperative Komplikation, Y-Achse: Anteil der Fälle in Prozent (n = 170).	53
Abbildung 16:	Zeitlicher Verlauf postoperativer Komplikationen in Prozent, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden. Dargestellt sind die Anteile der Fälle je Behandlergruppe über definierte Nachbeobachtungsintervalle. Technik Laterale Kondensation (n = 163).	56
Abbildung 17:	Zeitlicher Verlauf postoperativer Komplikationen in Prozent, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden. Dargestellt sind die Anteile der Fälle je Behandlergruppe über definierte Nachbeobachtungsintervalle. Technik: Einstifttechnik, (n = 170).	57
Abbildung 18:	Boxplot zur Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen nach verwendeter Wurzelkanalfülltechnik. Dargestellt sind Median, Interquartilsbereich, Spannweite sowie Ausreißer für die laterale Kondensation mit AH Plus (n = 163) und die Einstifttechnik mit BC Sealer (n = 170).	60
Abbildung 19:	Prozentuale Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen bei Anwendung der Einstifttechnik, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden.	61
Abbildung 20:	Prozentuale Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen bei Anwendung der lateralen Kondensation, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden.	62
Abbildung 21:	Anteil postoperativer Komplikationen bei Verwendung von der lateralen Kondensation mit AH Plus, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler in Prozent.	64

Abbildung 22:	Anteil postoperativer Komplikationen bei Verwendung von der Einstifttechnik mit BC Sealer, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler (in Prozent).....	65
Abbildung 23:	Balkendiagramm zur Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Prozent, differenziert nach verwendeter Technik in Prozent.X-Achse: Gesamtqualität („ideal“/„nicht ideal“) Y-Achse der prozentuale Anteil der Fälle (n = 333)	67
Abbildung 24:	Prozentuale Verteilung der röntgenologisch beurteilten Gesamtqualität der Wurzelfüllung („ideal“ vs. „nicht ideal“) bei Anwendung der lateralen Kondensation mit AH Plus, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler (n = 163).....	69
Abbildung 25:	Prozentuale Verteilung der röntgenologisch beurteilten Gesamtqualität der Wurzelfüllung („ideal“ vs. „nicht ideal“) bei Verwendung von BC Sealer, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler (n = 170). .	69
Abbildung 26:	Balkendiagramm zur Verteilung Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Prozent, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler, technikunabhängig (n = 333).	73
Abbildung 27:	Balkendiagramm zur Verteilung der Wurzelfülllängen bei Behandlern zu Beginn der klinischen Ausbildung, differenziert nach Fülltechnik in Prozent. X-Achse: Länge der WF, Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (n = 113).....	104
Abbildung 28:	Verteilung der Wurzelfülllängen bei Behandlern in fortgeschrittener klinischer Ausbildung, differenziert nach Fülltechnik in Prozent. X-Achse: Länge der WF, Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (n = 114).	104
Abbildung 29:	Verteilung der Wurzelfülllängen bei approbierten Behandlern, differenziert nach Fülltechnik in Prozent, X-Achse: Länge der WF, Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (n = 106).....	105
Abbildung 30:	Balkendiagramm zum Vergleich der Füllungshomogenität zwischen AH Plus und BC-Sealer in Prozent in der Behandlergruppe zum Start der klinischen Ausbildung. Laterale Kondensation (n = 54), Einstifttechnik (n = 59).	106
Abbildung 31:	Balkendiagramm zum Vergleich der Füllungshomogenität zwischen lateraler Kondensation und Einstifttechnik in Prozent in der	

	Behandlergruppe der fortgeschrittenen klinischen Ausbildung. Laterale Kondensation (n = 54), Einstifttechnik (n = 60).	107
Abbildung 32:	Balkendiagramm zum Vergleich der Füllungshomogenität zwischen lateraler Kondensation und Einstifttechnik in Prozent der approbierten Behandler laterale Kondensation (n = 55), Einstifttechnik (n = 51).	109
Abbildung 33:	Balkendiagramm zur Verteilung postoperativer Komplikationen bis 18 Monate nach Wurzelkanalfüllung, differenziert nach Ausbildungsstufe und Fülltechnik (AH Plus/laterale Kondensation). X-Achse: postoperative Komplikation; Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (laterale Kondensation n = 163).....	112
Abbildung 34:	Balkendiagramm zur Verteilung postoperativer Komplikationen bis 18 Monate nach Wurzelkanalfüllung, differenziert nach Ausbildungsstufe und Fülltechnik (BC Sealer/Einstifttechnik). X-Achse: postoperative Komplikation; Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (Einstifttechnik n = 170).	112

3 Tabellenverzeichnisverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich wesentlicher materialwissenschaftlicher und klinisch relevanter Eigenschaften epoxidharzbasierter und kalziumsilikatbasierter Wurzelkanalsealer (AH Plus vs. BC Sealer).....	22
Tabelle 2:	Zuordnung der Untersuchungszeiträume zur Wurzelfülltechnik und verwendeten Sealer.....	30
Tabelle 3:	Kreuztabelle zur Verteilung der verwendeten Fülltechniken nach Ausbildungsstand der Behandler.....	34
Tabelle 4:	Anamnestiche Verteilung getrennt nach Obturationstechnik.....	36
Tabelle 5:	Verteilung der röntgenologisch sichtbaren apikalen Parodontitis zum Zeitpunkt der Ausgangsaufnahme in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik.....	38
Tabelle 6:	Darstellung der postendodontischen Versorgung (Krone, Füllung, fehlende Dokumentation) in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik.....	40
Tabelle 7:	Kreuztabelle zur Länge der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test. (* $p < 0,05$ statistisch signifikant, ^a rad. = radiologisch).....	42
Tabelle 8:	Kreuztabelle zum Auftreten apikaler Extrusionen (apikaler Puff) in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test. (* $p < 0,05$ statistisch signifikant).....	43
Tabelle 9:	Länge der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler, getrennt nach Obturationstechnik (mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test. (* $p < 0,05$ statistisch signifikant, ^a rad. = radiologisch).....	44
Tabelle 10:	Kreuztabelle zur Homogenität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test.....	46
Tabelle 11:	Kreuztabelle zur Homogenität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test.....	47
Tabelle 12:	Kreuztabelle zur Verteilung der Füllungshomogenität in Abhängigkeit von der Fülllänge bei Verwendung der lateralen Kondensation mit AH Plus.....	48
Tabelle 13:	Kreuztabelle zur Verteilung der Füllungshomogenität in Abhängigkeit von der Fülllänge bei Verwendung der Einstifttechnik mit BC Sealer...	49
Tabelle 14:	Kreuztabelle und Chi-Quadrat-Test zur Verteilung der dichotomisierten PAI-Kategorien (Code 1–2 vs. Code 3–5) im ersten Kontrollbild nach Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik (n = 333).....	50
Tabelle 15:	Postoperative Komplikationen nach Wurzelkanalbehandlung (absolute Häufigkeiten), differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden und Art der Komplikation bei der lateralen Kondensation.....	52
Tabelle 16:	Postoperative Komplikationen nach Wurzelkanalbehandlung (absolute Häufigkeiten), differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden und Art der Komplikation bei der Einstifttechnik.....	53

Tabelle 17:	Kreuztabelle und Chi-Quadrat-Test zur Verteilung postoperativer Komplikationen in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik.....	55
Tabelle 18:	Kreuztabelle und Chi-Quadrat-Test zur Verteilung postoperativer Komplikationen in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler, technikenunabhängig.....	56
Tabelle 19:	Zeitpunkt des Auftretens postoperativer Komplikationen nach Wurzelkanalfüllung mit lateraler Kondensation mit AH Plus, absolute Häufigkeiten.....	58
Tabelle 20:	Zeitpunkt des Auftretens postoperativer Komplikationen nach Wurzelkanalfüllung mit Einstifttechnik mit BC Sealer, absolute Häufigkeiten.....	58
Tabelle 21:	Zusammenfassende Tabelle zur Anzahl der Behandlungssitzungen in Abhängigkeit von der verwendeten Wurzelkanalfülltechnik (Laterale Kondensation n = 163, Einstifttechnik n = 170).....	59
Tabelle 22:	Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen bei Anwendung der Einstifttechnik mit BC Sealer, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden. Dargestellt sind die absoluten Fallzahlen pro Sitzungsanzahl sowie die Gesamtverteilung.....	60
Tabelle 23:	Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen bei Anwendung der lateralen Kondensation mit AH Plus, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden. Dargestellt sind absolute Fallzahlen pro Sitzungsanzahl sowie die Gesamtverteilung.....	61
Tabelle 24:	Postoperative Komplikationen (≤ 18 Monate) insgesamt sowie nach Obturationstechnik und Ausbildungsstand der Behandler (n/N, %, Chi-Quadrat-Test, Phi).....	64
Tabelle 25:	Zusammenhang zwischen Obturationstechnik und röntgenologisch beurteilter Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung (ideal vs. nicht ideal) einschließlich Chi-Quadrat-Test und Effektmaß (Phi) (n = 333).....	66
Tabelle 26:	Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Abhängigkeit von der Obturationstechnik, stratifiziert nach Ausbildungsstand (n, %, Chi-Quadrat-Test, Phi).....	67
Tabelle 27:	Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler, getrennt nach Obturationstechnik, einschließlich Chi-Quadrat-Test und Effektmaß (Cramér-V).....	68
Tabelle 28:	Kreuztabelle zur Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von Behandlergruppe, technikenunabhängig, einschließlich Chi-Quadrat-Test. * p < 0,05 statistisch signifikant.....	72
Tabelle 29:	Übersicht der im Rahmen der Studie erhobenen endodontischen und patientenbezogenen Variablen.....	103
Tabelle 30:	Chi-Quadrat-Test zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Wurzelkanalfülltechnik und Homogenität der Wurzelkanalfüllung bei Behandlern zu Beginn der klinischen Ausbildung (n = 113).....	107
Tabelle 31:	Chi-Quadrat-Test zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Wurzelkanalfülltechnik und Homogenität der Wurzelkanalfüllung bei Behandlern in fortgeschrittener klinischen Ausbildung (n = 114).....	108
Tabelle 32:	Chi-Quadrat-Test zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Wurzelkanalfülltechnik und Homogenität der Wurzelkanalfüllung bei Approbierten (n = 106).....	109

Tabelle 33:	Deskriptive Statistik der Sitzungsanzahl differenziert nach Obturationstechnik.....	111
Tabelle 34:	Normalverteilungsprüfung (Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk) für die Anzahl der Behandlungssitzungen nach Obturationstechnik (signifikante Abweichung von der Normalverteilung ($p < 0,001$).	111

4 Ziel der Dissertation

Die Endodontologie ist ein zentraler Bestandteil der konservierenden Zahnheilkunde. Sie befasst sich mit der Diagnostik, Prävention und Behandlung von Erkrankungen der Zahnpulpa und des periapikalen Gewebes (1).

Wurzelkanalbehandlungen (WKB) zählen weltweit zu den am häufigsten durchgeführten zahnärztlichen Therapien. Die Prävalenz wurzelkanalbehandelter Zähne in der erwachsenen Bevölkerung liegt internationalen Untersuchungen zufolge bei über 50 %. Die durchschnittliche globale Prävalenz liegt bei über 8 % (2). WKB gehören in Deutschland seit Jahrzehnten zu den häufigsten konservierenden Leistungen der gesetzlichen Krankenversicherung (GKV). Nach den aktuellen Jahrbuchdaten der Kassenzahnärztlichen Bundesvereinigung (KZBV), werden jährlich mehrere Millionen Wurzelkanalfüllungen abgerechnet. Damit bleibt die endodontische Versorgung volumenstark und klinisch bedeutsam (3).

Über den funktionellen Nutzen hinaus, etwa in Bezug auf Kaufunktion, Artikulation und Ästhetik, ist der Erhalt natürlicher Zähne eng mit der Lebensqualität der Patientinnen und Patienten verknüpft.

Die Behandlung beinhaltet neben der Entfernung der Zahnpulpa die chemomechanische Aufbereitung des Kanals sowie die Füllung mit Abdichtung der Wurzelkanäle (4). Ein wesentlicher Bestandteil ist die Wurzelkanalfüllung, die darauf abzielt, den Wurzelkanal bakteriendicht zu verschließen und somit eine Reinfektion des periapikalen Gewebes zu verhindern (5).

In aktuellen systematischen Übersichtsarbeiten werden für die primäre endodontische Behandlung hohe Erfolgsraten beschrieben. So berichten Burns et al. je nach angewandten Erfolgskriterien über Erfolgsraten von über 90 % bei klinischer Symptombefreiheit und funktionellem Zahnerhalt sowie von etwa 80–85 % bei strengeren, radiologisch orientierten Kriterien (6).

Trotz dieser hohen Erfolgsraten sind postendodontische Komplikationen, wie beispielsweise Schmerzen, Schwellungen, Frakturen, Extraktionen und Wurzelkanalrevisionen, nicht auszuschließen (5).

Vor diesem Hintergrund vergleicht die vorliegende Untersuchung zwei etablierte Wurzelfülltechniken im Hinblick auf ihre postoperativen Komplikationsraten an mehrwurzeligen Zähnen. Die bis 2016 an der Universitätsmedizin Mainz standardmäßig eingesetzte Methode der lateralen Kondensation mit dem epoxidharzbasierten Sealer (AH Plus) wird mit der seit dem Wintersemester 2016/2017 eingeführten Einstifttechnik unter Verwendung eines Sealers (Total Fill BC Sealer) verglichen. Aufgrund der beschriebenen materialphysikalischen Eigenschaften kalziumsilikatbasierter Sealer und der geringeren Abhängigkeit von mechanischer Kondensation im Vergleich zur lateralen Kondensation, wird die Einstifttechnik

in der vorliegenden Arbeit als potenziell weniger techniksensitiv betrachtet. Ziel ist es zu prüfen, ob sich daraus Vorteile in der klinischen Anwendung ableiten lassen (7-9).

Ein zentraler Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Erfahrungsgrad der Behandler¹. In der Literatur wird übereinstimmend beschrieben, dass endodontische Behandlungsergebnisse in Abhängigkeit von Ausbildung, klinischer Routine und Spezialisierung variieren. Vergleichsstudien berichten, dass die Erfolgs- und Zahnüberlebensraten nach primärer Wurzelkanalbehandlung bei erfahrenen oder spezialisierten Behandlern häufig über 90 % liegen, während sie bei weniger erfahrenen Behandlern niedriger ausfallen können (10, 11).

Untersuchungen aus universitären Lehrkliniken zeigen zudem Unterschiede in der radiologisch beurteilten Qualität der Wurzelfüllung sowie eine höhere Variabilität der Behandlungsergebnisse bei durch Studierende durchgeführten Therapien (12).

Ergänzend weisen patientenbezogene Analysen darauf hin, dass postoperative Beschwerden und Einschränkungen der Lebensqualität nach endodontischen Behandlungen durch Studierende häufiger auftreten können als nach Behandlungen durch approbierte Behandler oder Spezialisten (13).

Die Vergleichsgruppen umfassen Studierende zu Beginn der klinischen Ausbildung (7. Semester), Studierende im fortgeschrittenen klinischen Studienabschnitt (10. Semester) und approbierte Zahnärzte. Gegenstand der Untersuchung ist die Analyse postoperativer Komplikationsraten beider Wurzelfülltechniken, um Optimierungspotenziale für die endodontische Therapie aufzuzeigen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zur Verbesserung der klinischen Praxis beitragen und langfristig das Wohl der Patienten fördern.

¹ Die in dieser Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich immer gleichermaßen auf alle Geschlechter.

Im Folgenden werden die Hypothesen dieser retrospektiven Studie dargelegt:

H₀-Hypothese: Die Verwendung der weniger techniksensitiven Methode mit dem kalziumsilikatbasierten BC Sealer in Kombination mit der Einstifttechnik führt bei unerfahrenen Behandlern im Vergleich zur Standardmethode mit dem epoxidharzbasierten Sealer AH Plus in Kombination mit der lateralen Kondensation zu keiner signifikanten Veränderung der postoperativen Komplikationen bis zu 18 Monaten nach der Wurzelkanalfüllung.

H₁-Hypothese: Die Verwendung der weniger techniksensitiven Methode mit dem kalziumsilikatbasierten BC Sealer in Kombination mit der Einstifttechnik führt bei unerfahrenen Behandlern im Vergleich zur Standardmethode mit dem epoxidharzbasierten Sealer AH Plus in Kombination mit der lateralen Kondensation zu einer signifikanten Veränderung der postoperativen Komplikationen bis zu 18 Monaten nach der Wurzelkanalfüllung.

Folgende Nebenfragestellungen ergeben sich beim Vergleich der genannten Wurzelfülltechniken:

- Besteht in der untersuchten Stichprobe, unabhängig vom Ausbildungsstand der Behandler, zwischen der Einstifttechnik mit dem kalziumsilikatbasierten BC Sealer und der lateralen Kondensation mit dem epoxidharzbasierten Sealer AH Plus ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der radiologisch beurteilten Qualität der Wurzelfüllung, gemessen anhand der röntgenologischen Kontrollaufnahme?
- Besteht zwischen Studierenden des 7. und 10. Semesters sowie approbierten Behandlern unter Anwendung der Einstifttechnik mit dem kalziumsilikatbasierten BC Sealer im Vergleich zur lateralen Kondensation mit dem epoxidharzbasierten Sealer AH Plus ein signifikanter Unterschied in der radiologisch beurteilten Qualität der Wurzelfüllung, gemessen anhand der röntgenologischen Kontrollaufnahme?

5 Literaturdiskussion

5.1 Pathophysiologie und Mikrobiologie der apikalen Parodontitis

Die Prävalenz der apikalen Parodontitis nimmt mit dem Lebensalter deutlich zu und stellt eine zentrale Indikation der Wurzelkanalbehandlung dar (14). Pathophysiologisch führt die Progression kariöser Läsionen zur Überwindung der Zahnhartsubstanzbarrieren. Über die kariöse Kavität gelangen Mikroorganismen und deren Metabolite in den Dentin-Pulpa-Komplex und initiieren dort eine immunologische Antwort (15). Auch ohne klinisch sichtbare Pulpaeröffnung können Keime über Dentintubuli vordringen oder ihre Toxine über den Dentinliquor in die Pulpa befördern (15). Unterbleibt eine rechtzeitige Unterbrechung der Noxe, kommt es zur Nekrose des Pulpengewebes und zur Ausbreitung der Infektion in das periapikale Gewebe (16). Zudem können mikroskopisch feine Schmelz- oder Dentindefekte nach mechanischer Belastung eine mikrobielle Invasion auch bei äußerlich intakten Zähnen ermöglichen (17). Fortgeschrittene parodontale Läsionen eröffnen über exponierte Seitenkanäle oder das Foramen apicale weitere Eintrittspforten in das endodontische System (18).

Auf zellulärer Ebene werden durch bakterielle Antigene membranständige Rezeptoren auf Immun- und Pulpagewebezellen aktiviert. Die nachfolgende Freisetzung proinflammatorischer Mediatoren erhöht die Gefäßpermeabilität und Zellrekrutierung und verstärkt die lokale Entzündungsreaktion (19, 20).

Bei frühzeitiger Elimination des Reizes ist eine Ausheilung einer reversiblen Pulpitis möglich. Unter einer Pulpitis wird eine entzündliche Reaktion des Pulpengewebes verstanden, die infolge bakterieller, chemischer oder mechanischer Reize entsteht (21). Klinisch ist die reversible Pulpitis durch milde, kurz anhaltende thermische Schmerzen ohne Palpations- oder Perkussionsempfindlichkeit gekennzeichnet. Diese Tests dienen der Beurteilung einer periapikalen Gewebsbeteiligung und werden im Kapitel Diagnostik näher erläutert (21-23). Persistiert der Stimulus, entstehen eitrige Herde und nekrotische Areale, der intrapulpaire Druck steigt an und es resultiert häufig eine irreversible Pulpitis mit anhaltenden, schlecht lokalisierbaren, teils ausstrahlenden Schmerzen mit nächtlicher Schmerzexazerbation (20, 23).

Apikal kann sich die mikrobielle Besiedelung planktonisch oder als strukturierter Biofilm etablieren. Biofilme vermitteln durch ihre Matrix einen Schutz vor Wirtsabwehr und antimikrobiellen Substanzen und erleichtern eine koordinierte bakterielle Kommunikation (20).

Der nachfolgende periapikale Knochenabbau wird wesentlich über das RANK/RANKL/Osteoprotegerin-System reguliert. Hierbei handelt es sich um einen zentralen Regelkreis des Knochenstoffwechsels. RANKL (Receptor Activator of Nuclear Factor κ B Ligand) ist ein Botenstoff, der die Differenzierung und Aktivierung knochenabbauender Zellen, den Osteoklasten, stimuliert. Hierzu bindet RANKL an seinen Rezeptor RANK (Receptor Activator of Nuclear Factor κ B), der sich auf der Oberfläche der Osteoklastenvorläuferzellen befindet. Osteoprotegerin wirkt diesem Prozess als löslicher Rezeptor entgegen, indem es RANKL bindet und dadurch den Knochenabbau hemmt. Im Rahmen periapikaler Entzündungen fördern proinflammatorische Mediatoren die RANKL-Expression und reduzieren gleichzeitig die Osteoprotegerin-Expression, wodurch das Gleichgewicht zugunsten des Knochenabbaus verschoben wird. In der Folge nehmen Osteoklastendifferenzierung und -aktivierung zu und die osteolytische Läsion schreitet fort (24-28).

Mikrobiologisch handelt es sich überwiegend um polymikrobielle Infektionen, bei denen Kombinationen verschiedener Spezies ausgeprägtere Gewebsdestruktionen hervorrufen können (15). Aktuelle Untersuchungen zeigen eine hohe Diversität mit Dominanz obligater und fakultativer Anaerobier in primären Infektionen (29). Für einzelne Spezies wurden klinische Assoziationen mit Schmerzereignissen beschrieben (30).

5.2 Klinische und radiologische Diagnostik

Die Beurteilung des periradikulären Gewebezustands erfolgt in der endodontischen Diagnostik und Therapiekontrolle vorrangig anhand klinischer Parameter in Kombination mit bildgebenden Verfahren. Die *European Society of Endodontology (ESE)* beschreibt dabei zunächst die extraorale Inspektion des Patienten. Dabei sind mögliche Gesichtsasymmetrien, Schwellungen im Kopf- und Halsbereich sowie deren Ausdehnung zu beurteilen. Zusätzlich sollte auf regionäre Lymphknotenschwellungen, kutane Fistelöffnungen und Hinweise auf eine kranio-mandibuläre Dysfunktion geachtet werden (1).

Die anschließende intraorale Befundaufnahme beinhaltet die Beurteilung der allgemeinen Mundhygiene, der Beschaffenheit der oralen Schleimhaut sowie das Vorhandensein intraoraler Schwellungen oder Fisteln. Weiterhin sind der Zustand der vorhandenen Zähne, die parodontalen Verhältnisse und die Qualität und Ausdehnung vorhandener restaurativer Befunde systematisch zu erfassen. Zur differenzialdiagnostischen Abklärung endodontischer Erkrankungen steht eine Vielzahl klinischer Testverfahren zur Verfügung. Dazu zählen die Palpation zur Erfassung von Druckdolenz im Weichgewebe, der Mobilitätstest zur Beurteilung der Zahnverankerung und die Perkussion zur Identifikation von Entzündungszeichen im periapikalen Bereich. Ergänzend erfolgt eine parodontale Sondierung zur Erfassung pathologischer Taschenverläufe (1).

Die Okklusionsanalyse dient dem Ausschluss funktioneller Überbelastungen. Zur Erkennung von Frakturen kann zusätzlich die Transillumination angewendet werden. Die Vitalitätsprüfung mittels thermischer oder elektrischer Sensibilitätstests erlaubt Rückschlüsse auf den Zustand der Pulpa. In unklaren Fällen kann eine selektive Leitungsanästhesie zur Lokalisation des betroffenen Zahnes beitragen (1).

Das bildgebende Verfahren umfasst vor allem die intraorale Röntgendiagnostik, die standardisiert in Paralleltechnik durchgeführt wird. Diese Aufnahmetechnik ermöglicht eine weitgehend verzerrungsfreie und reproduzierbare Darstellung der Zahnwurzel und der periapikalen Strukturen und ist daher für die Diagnostik und röntgenologische Verlaufskontrolle nach endodontischer Behandlung besonders geeignet (1). Die intraorale Röntgenaufnahme dient der Beurteilung der Wurzelfüllung hinsichtlich Länge, Homogenität und apikaler Begrenzung sowie der Erfassung periapikaler knöcherner Veränderungen. Aufgrund ihrer breiten klinischen Etablierung, Standardisierbarkeit und vergleichsweise geringen Strahlenbelastung stellt sie weiterhin die zentrale Methode zur radiologischen Beurteilung endodontischer Therapieergebnisse dar (1, 31).

5.3 Periapical Scoring Index

An dem Scandinavian Institute of Dental Materials, Oslo and Department of Operative Dentistry, Dental Faculty, University of Oslo entwickelten Ørstavik et al. im Jahr 1986 ein System zur standardisierten radiologischen Beurteilung des periapikalen Gewebezustands. Hierbei handelt es sich um den Periapikalen Index (PAI). Dieses System basiert auf einer Skala mit fünf Bewertungsstufen. Die Skala reicht von einem gesunden apikalen Parodontium ohne erkennbare Veränderungen (PAI 1), über erste strukturelle Auffälligkeiten des Knochens, die jedoch nicht eindeutig pathologisch sind (PAI 2), bis hin zu deutlichen Knochenveränderungen mit beginnendem Mineralverlust (PAI 3). Höhere Schweregrade beinhalten klar abgrenzbare radioluzente Läsionen (PAI 4) sowie solche mit strahlenförmig ausgedehnten Knochenauflösungen, die auf fortgeschrittene destruktive Prozesse hindeuten (PAI 5) (32).

Die Aussagekraft des PAI beruht auf Referenzröntgenaufnahmen, deren histopathologische Diagnosen gesichert wurden. In Untersuchungen mit mehreren Beobachtenden zeigte sich der PAI als hinreichend zuverlässig und reproduzierbar, mit einer guten Fähigkeit zur Differenzierung zwischen verschiedenen, pathologischen Ausprägungen. Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich der PAI sowohl für epidemiologische Erhebungen als auch für klinische Studien und retrospektive Analysen endodontischer Therapieergebnisse, besonders wenn eine objektive und vergleichbare radiologische Auswertung gefordert ist (32).

Beispielhaft wurde der PAI in einer retrospektiven Studie aus dem Jahr 2024 zur Bewertung des Verlaufs periapikaler Läsionen unter verschiedenen Obturationstechniken und Sealern eingesetzt (33).

Klinische Beschwerdefreiheit und radiologische Unauffälligkeit garantieren nicht in jedem Fall eine vollständige histologische Ausheilung. Vor diesem Hintergrund wird in der aktuellen endodontischen Literatur die funktionelle Zahnerhaltung als ergänzender, patientenrelevanter Endpunkt hervorgehoben, der die langfristige Erhaltung eines beschwerdefreien, funktionsfähigen Zahnes in den Mittelpunkt stellt (34).

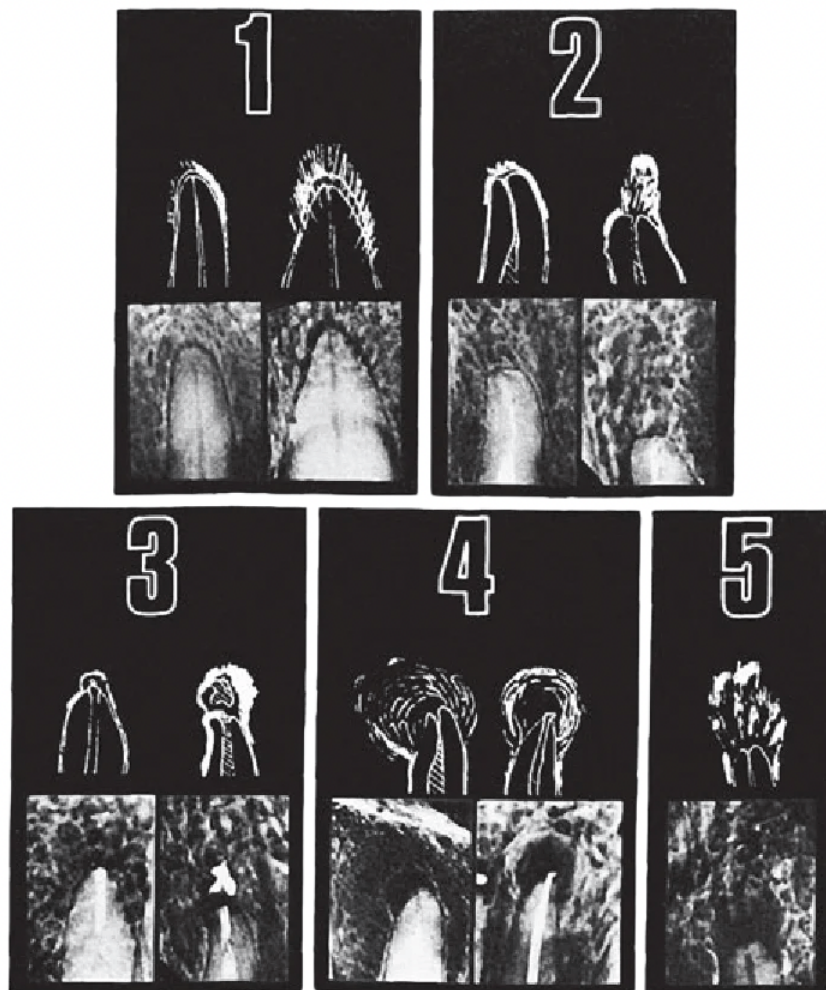


Abbildung 1: Referenzröntgenbilder, entsprechende Strichzeichnungen und die dazugehörigen PAI-Scores (Ørstavik et al.) (32).

5.4 Wurzelkanalmorphologie mehrwurzeliger Zähne

Mehrwurzelige Zähne stellen aufgrund ihrer häufig komplexen und anatomisch variablen Morphologie eine erhebliche Herausforderung für die endodontische Therapie dar (35). Besonders Molaren und teilweise Prämolaren des Oberkiefers weisen eine erhöhte anatomische Diversität auf, die die Diagnostik und Behandlung erschwert.

Bei den oberen ersten Prämolaren liegt in etwa 60 % der Fälle eine Bifurkation mit zwei separaten Kanälen vor; in rund 40 % ist nur eine Wurzel vorhanden. Einwurzelige Prämolaren weisen in der Regel zwei Wurzelkanäle auf, deren Verlauf und Zusammenführung variabel sein können. Eine Trifurkation stellt eine seltene Ausnahme dar. Die Prävalenz einer Zweiwurzelkonfiguration bei den zweiten Oberkieferprämolaren beträgt lediglich etwa 10 % (36).

Die oberen ersten Molaren zeigen typischerweise eine dreiwurzelige Anatomie mit mesiobukkalen, distobukkalen und palatinalen Wurzeln. In der mesiobukkalen Wurzel lässt sich in 60 % bis 90 % der Fälle ein zweiter Kanal (MB2) nachweisen. Auch die oberen zweiten Molaren weisen meist drei Wurzeln auf; bei ca. 20 % der Patienten findet sich eine Reduktion auf zwei Wurzeln (36).

Die unteren Molaren verfügen in der Regel über zwei Wurzeln (mesial und distal) mit insgesamt meist drei Kanälen. In der mesialen Wurzel treten in etwa 85 % der Fälle zwei Kanäle auf, während die distale Wurzel typischerweise einen, in 15 % bis 20 % jedoch auch zwei Kanäle aufweist (36).

Zusätzlich zur inter- und intraindividuellen Variabilität der Wurzelkanalarchitektur erschweren auch anatomische Faktoren wie die posterior gelegene Zahnposition, eingeschränkte Mundöffnung oder limitierte Sichtverhältnisse den endodontischen Zugang. Häufig sind die Wurzeln stark gekrümmt und die Kanäle weisen eine hohe strukturelle Komplexität auf. Neben dem Hauptkanal finden sich regelmäßig laterale, sekundäre oder akzessorische Kanäle, die sich in verschiedenen Ebenen (lateral, apikal) abzweigen. Diese feinen Verzweigungen gelten als potenzielle Ursache unbehandelter Kanalanteile und stellen damit einen relevanten Risikofaktor für den Langzeiterfolg endodontischer Behandlungen dar (37).

Zur systematischen Erfassung der Wurzelkanalmorphologie wurden mehrere Klassifikationssysteme entwickelt. Weine (1969) beschrieb vier Grundtypen für einwurzelige Zähne: Typ I (ein durchgehender Kanal), Typ II (zwei Kanäle mit Vereinigung), Typ III (zwei getrennte Kanäle mit eigenem Foramen apicale) und Typ IV (zwei vollständig getrennte Verläufe bis zu getrennten apikalen Ausgängen) (38).

Vertucci (1984) erweiterte diese Klassifikation anhand von Untersuchungen an 2.400 extrahierten permanenten Zähnen. Die Präparate wurden entkalkt, mit Farbstoffen injiziert und transparent gemacht, um die Zahl und Konfiguration der Kanäle, Kanalverzweigungen, apikale Foramina, transversale Anastomosen sowie das Vorkommen apikaler Delten darzustellen. Vertucci unterschied auf dieser Grundlage acht verschiedene Kanalkonfigurationstypen (39). Altersbedingte Veränderungen wie die kontinuierliche Ablagerung von Sekundärdentin führen zu einer fortschreitenden Einengung des Kanallumens bis hin zur Obliteration. Diese Veränderungen können die endodontische Aufbereitung erheblich erschweren oder unmöglich machen (35).

5.4.1 Klassifikationen nach Vertucci

Vertucci Typ I

1-1: Ein einzelner Kanal zieht vom Pulpenkavum bis zur Wurzelspitze, ohne sich zu verzweigen.

Vertucci Typ II

2-1: Zwei separate Kanäle beginnen im Pulpenkavum und vereinigen sich zu einem Kanal, der apikal endet.

Vertucci Typ III

1-2-1: Ein Kanal teilt sich innerhalb der Wurzel in zwei, die später wieder zu einem Kanal fusionieren.

Vertucci Typ IV

2-2: Zwei getrennte Kanäle ziehen vom Pulpenkavum bis zu zwei getrennten Foramina apicalia.

Vertucci Typ V

1-2: Ein einzelner Kanal teilt sich im apikalen Drittel in zwei separate Kanäle mit zwei Foramina.

Vertucci Typ VI

2-1-2: Zwei Kanäle beginnen, vereinigen sich in der Mitte, teilen sich dann erneut in zwei separate Kanäle.

Vertucci Typ VII

1-2-1-2: Ein Kanal teilt sich, vereinigt sich erneut und teilt sich dann wieder in zwei separate Kanäle.

Vertucci Typ VIII

3-3: Drei getrennte Kanäle vom Pulpenkavum bis zu drei separaten apikalen Foramina.

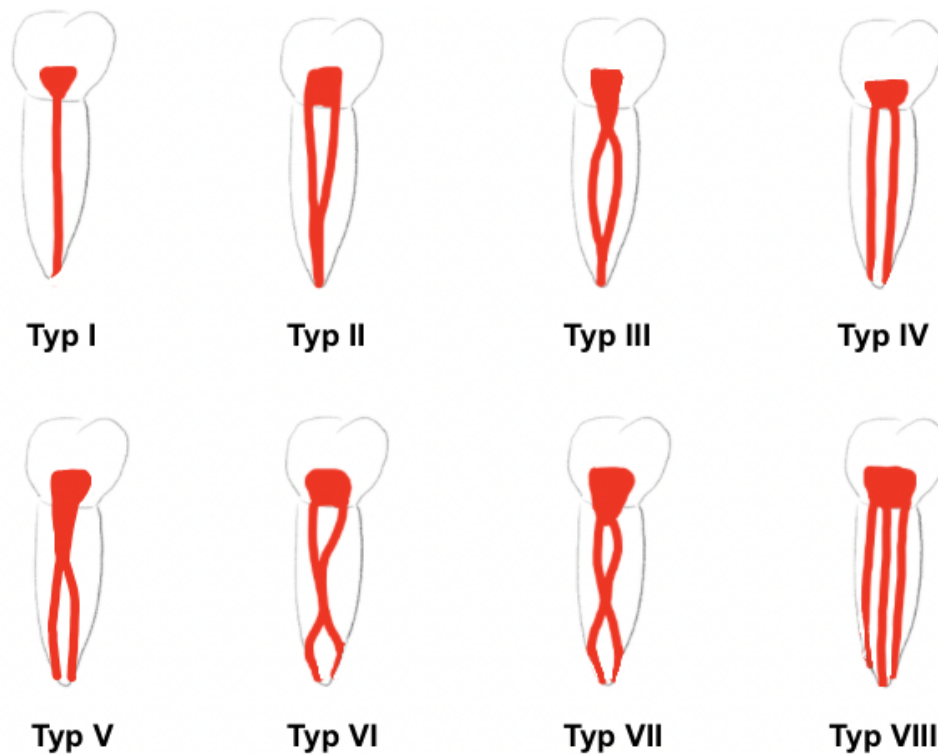


Abbildung 2: Wurzelkanalkonfiguration nach der Klassifikation von Vertucci (1984) (40).

5.5 Indikationen und Therapieziele primärer Wurzelkanalbehandlung

Die primäre Wurzelkanalbehandlung ist eine konservierende Maßnahme zur Behandlung oder Vermeidung der apikalen Parodontitis und stellt vor einer Extraktion die Therapie der Wahl dar (6). Dabei lassen sich Erkrankungen des endodontischen Gewebes überwiegend auf bakterielle Infektionen zurückführen (41).

Die ESE stuft das Vorliegen einer irreversiblen Pulpitis oder eines pulpanekrotischen Zustandes auch ohne klinische oder radiologische Anzeichen einer apikalen Parodontitis, als eigenständige Indikation für eine endodontische Behandlung ein (1). Mögliche Ursachen dafür stellen tiefe kariöse Läsionen, dentale oder orthodontische Traumata, aber auch endoparodontale Läsionen aufgrund einer ausgeprägten Parodontitis dar. Karies stellt hierbei die führende Ursache einer Pulpitis dar. Bereits bei kleinsten kariösen Defekten im Schmelz können erste histologische Veränderungen im Pulpengewebe auftreten. Dringt die Karies bis in das Dentin vor, können freigelegte Dentinkanälchen den Transport bakterieller Toxine in Richtung Pulpa ermöglichen. Eine direkte bakterielle Invasion der Pulpa erfolgt jedoch typischerweise erst nach dem Absterben des vitalen Gewebes (36).

Neben den pathologischen Indikationen gibt es auch elektive Gründe, die eine Wurzelkanalbehandlung notwendig machen. Dazu gehören beispielsweise Situationen, in

denen eine Devitalisierung des Zahnes aus prothetischen oder restaurativen Gründen erforderlich ist, beispielsweise im Rahmen einer Präparation (36).

Demgegenüber ist eine Wurzelkanalbehandlung kontraindiziert, wenn der betreffende Zahn nicht mehr langfristig erhaltungswürdig erscheint, etwa infolge gravierender parodontaler Destruktion, oder irreversibler struktureller Schäden. Auch systemische Kontraindikationen, mangelnde Kooperationsfähigkeit oder persistierend unzureichende Mundhygiene können einer erfolgreichen Behandlung entgegenstehen und sollten bei der Therapieplanung berücksichtigt werden (1).

Das übergeordnete Ziel der endodontischen Behandlung ist der langfristige funktionelle Zahnerhalt unter Wahrung der Patientengesundheit (1). Vor dem Hintergrund der mikrobiell bedingten Pathogenese von Pulpitiden und periapikalen Läsionen steht die Entfernung bzw. weitgehende Reduktion der intrakanalären Mikroorganismen im Zentrum des Therapiekonzepts (42).

Die Leitlinien der European Society of Endodontology (2006) definieren die Zielsetzung für die Aufbereitung als die vollständige Entfernung von pulpaem und nekrotischem Gewebe sowie die Eliminierung von Debris und mikrobieller Kontamination. Zudem soll eine Formgebung unter Erhalt des natürlichen Kanalverlaufs und der apikalen Konstriktion erfolgen. Darüber hinaus wird eine konische Präparation von koronal nach apikal und eine verlässliche Arbeitslängenkontrolle gefordert. Ebenfalls essenziell ist eine ausreichende Spülung des Wurzelkanalsystems. Durch diese Maßnahmen soll der Kanal effektiv desinfizierbar und anschließend bakteriendicht obturierbar sein, sodass ein aseptischer Zustand erreicht wird (1).

Die Zielerreichung beruht auf der chemomechanischen Aufbereitung (43). Chemisch erfolgt die Desinfektion durch geeignete Spüllösungen und medikamentöse Zwischenlagen. Mechanisch werden infiziertes Dentin sowie vitale oder nekrotische Gewebereste instrumentell entfernt (44). Beide Komponenten verfolgen das gemeinsame Ziel der wirksamen mikrobiellen Reduktion im Wurzelkanalsystem (7).

5.6 Einflussfaktoren und Behandlungserfolg endodontischer Behandlungen

Der Behandlungserfolg endodontischer Maßnahmen ist in der Literatur nicht einheitlich definiert. Verwendet werden klinische, radiologische oder kombinierte Kriterien. Dementsprechend variieren die berichteten Erfolgsraten je nach Bewertungsmaßstab. In Anlehnung an die Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) lässt sich das Outcome von einer WKB dreistufig einordnen. Vollständige Heilung liegt vor, wenn klinische Symptombefreiheit besteht und radiologisch ein normal breiter, kontinuierlich erkennbarer Parodontalspalt mit knöcherner Regeneration nach endodontisch bedingten Läsionen nachweisbar ist. Eine unvollständige Heilung liegt vor, wenn klinische

Symptomfreiheit besteht und die periapikale Läsion im Röntgenbild kleiner wird. Keine Heilung liegt vor, wenn Symptome fortbestehen oder erneut auftreten und radiologisch keine Verkleinerung der Läsion erkennbar ist, gegebenenfalls mit Progression bzw. resorptiven Veränderungen (45). In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Erfolgskontrolle klinisch-radiologisch. Die kleinste Beobachtungseinheit ist der Zahn.

Trotz technischer Weiterentwicklungen bleibt der Behandlungserfolg multifaktoriell determiniert. Entsprechend berichtet die Literatur über eine breite Spannweite primärer Erfolgsraten zwischen etwa 71 % und 95 %, die maßgeblich von der jeweiligen Erfolgsdefinition, der Nachbeobachtungsdauer und der angewandten Diagnostik abhängt (46-49).

Pekruhn analysierte retrospektiv einzzeitig durchgeführte WKB mit Einjahresnachkontrollen bei 81,8 % der behandelten Zähne. Als Misserfolg galten persistierende, zunehmende oder neu auftretende periapikale Läsionen sowie klinische Symptome. Die Misserfolgsrate betrug 5,2 %, entsprechend einer Erfolgsrate von etwa 95 %, wobei höhere Misserfolgsraten bei Zähnen mit periapikaler Ausdehnung pulpaler Erkrankungen beobachtet wurden (49).

Demgegenüber definierten Peters und Wesselink den Behandlungserfolg in einer prospektiven Studie anhand der vollständigen radiologischen Ausheilung periapikaler Läsionen über einen Nachbeobachtungszeitraum von bis zu 4,5 Jahren. Eine vollständige Ausheilung wurde in 81 % der einzzeitig und in 71 % der zweizeitig behandelten Fälle festgestellt, ohne signifikanten Unterschied zwischen den Behandlungsprotokollen (48).

Hannahan und Eleazer bewerteten retrospektiv den Erfolg endodontisch behandelter Zähne anhand funktioneller Kriterien. Als Erfolg galt ein erhaltener und funktionell belastbarer Zahn, während Mobilität oder die Notwendigkeit einer Wurzelspitzenresektion als unsichere Befunde gewertet wurden. Nach einer durchschnittlichen Nachbeobachtungsdauer von Monaten ergab sich eine Erfolgsrate von 99,3 %, bei nur geringem Bedarf an zusätzlichen Interventionen (47).

5.6.1 Präoperative Faktoren

Der Einfluss präoperativer Bedingungen auf den Behandlungserfolg endodontischer Maßnahmen ist in mehreren Studien untersucht worden. Wiederholt wurde gezeigt, dass bestimmte patienten- und zahnbezogene Ausgangsparameter mit einer signifikant höheren Heilungs- und Überlebenswahrscheinlichkeit assoziiert sind.

Patienten mit einem günstigen allgemeinen Gesundheitszustand gemäß der ASA-Klassifikation der American Society of Anesthesiologists (ASA I–II) wiesen eine signifikant höhere Erfolgsrate auf. Der Behandlungserfolg wurde dabei als das Fehlen radiologischer und klinischer Symptome definiert (50). Ebenso zeigt sich der Erhalt der Pulpavitalität als ein positiver Prognosefaktor (51, 52). Ein weiterer zentraler Aspekt ist das Ausmaß periapikaler Läsionen. Kleine Läsionen (<4 mm) oder deren vollständiges Fehlen gehen mit besseren

Heilungschancen einher (4, 50). Entzündungsbedingte Indikationen für die Wurzelkanalbehandlung wie Karies, Schmerzen oder Abszesse wurden ebenfalls mit einer erhöhten Erfolgswahrscheinlichkeit assoziiert (50).

Hinsichtlich des Alters zeigte sich in einzelnen Analysen, dass jüngere Patienten tendenziell eine bessere Prognose aufwiesen. Allerdings konnte dieser Effekt in multivariaten Modellen nicht als unabhängiger Faktor bestätigt werden (53, 54). Weitere Studien identifizierten zusätzliche Faktoren, die mit dem Überleben endodontisch behandelter Zähne assoziiert sind. In einer retrospektiven Analyse an einer deutschen Universitätszahnklinik zeigten Rodig et al., dass Zähne mit zwei stabilen proximalen Kontaktpunkten zu benachbarten Zähnen signifikant höhere Überlebensraten aufwiesen (55). In einer populationsbasierten Kohortenstudie aus Korea berichteten Kwak et al., dass das Geschlecht, die Zahnregion sowie der Behandlungsort einen Einfluss auf das Behandlungsergebnis hatten. Dabei zeigten sich günstigere Überlebensverläufe bei weiblichen Patientinnen, im Krankenhausumfeld durchgeführte Behandlungen, mandibulären Zähnen sowie Frontzähne (56).

5.6.2 Intraoperative Faktoren

Auch während der Behandlung wurden in der Literatur verschiedene Einflussgrößen beschrieben, die sich prognostisch auswirken können. Studien zeigen, dass die Arbeitslänge der Wurzelfüllung entscheidend ist. Füllungen mit einem Abstand von 0–2 mm zum röntgenologischen Apex sind mit den besten Überlebensraten assoziiert (57). Ebenso wird eine homogene Kondensation als vorteilhaft beschrieben. Das Vorliegen von Schmerzen während der Behandlung korreliert mit schlechteren Ergebnissen (57). Weitere Studien berichten, dass wiederholte akute Beschwerden (≥ 2 Episoden) und eine hohe Sitzungszahl (≥ 5 Termine) mit einem erhöhten Extraktionsrisiko verbunden sind (58). Gleichzeitig wird aus anderen Arbeiten hervorgehoben, dass eine geplante Mehrsitzigkeit mit kontrolliertem Vorgehen positive Effekte auf die Überlebensrate haben kann (55).

Zu den als prognostisch günstig beschriebenen technischen Faktoren zählen die vollständige Instrumentation bis zum apikalen Terminus sowie die Erreichung der apikalen Patency, die als kontrollierte Durchgängigkeit des Wurzelkanals bis zum apikalen Foramen definiert ist (59).

Auch der Einsatz bestimmter Spüllösungen zeigt differenzierte Effekte. Während die Anwendung von Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA) in Kombination mit Natriumhypochlorit (NaOCl) vor allem bei Revisionsbehandlungen mit höheren Erfolgsraten assoziiert ist, zeigte die zusätzliche Spülung mit zweiprozentigem Chlorhexidin (CHX) keine positive Assoziation mit der periapikalen Ausheilung (59).

Ein weiterer Aspekt betrifft die maschinelle Aufbereitung. Zähne ohne initiale Läsion, die maschinell instrumentiert wurden, zeigten signifikant bessere Heilungsraten (50, 60).

5.6.3 Postoperative Faktoren

Die Bedeutung der koronalen Versorgung nach endodontischer Therapie wird in der Literatur zunehmend hervorgehoben. Mehrere klinische Studien und systematische Auswertungen zeigen, dass suffiziente koronale Restaurationen einen entscheidenden Beitrag zum langfristigen Zahnerhalt leisten (11, 59, 61). Vor allem eine adäquate koronale Abdichtung ist mit einer verbesserten periapikalen Ausheilung und höheren Überlebensraten assoziiert (59).

Langzeitstudien zum Zahnüberleben nach Wurzelkanalbehandlung belegen, dass Zähne mit anschließender Kronenversorgung signifikant höhere Überlebensraten aufweisen als ausschließlich direkt restaurierte Zähne (11). Indirekte Restaurationen wie Kronen mit Stiftverankerung oder Goldteilkronen zeigten eine geringere Frakturnrate. Da Frakturen zu den Hauptursachen für den Verlust endodontisch behandelter Zähne zählen, ging dies mit einer verlängerten Überlebensdauer einher (61).

5.7 Wurzelkanalfüllmaterialien

Die Auswahl geeigneter Wurzelkanalfüllmaterialien ist ein zentraler Faktor für die Prognose endodontischer Behandlungen. Ziel ist, das Wurzelkanalsystem dauerhaft bakteriendicht zu verschließen, verbliebene Mikroorganismen effektiv zu isolieren und eine günstige Umgebung für die Heilung des periapikalen Gewebes zu schaffen (62, 63).

Damit ein Füllmaterial diesen Anforderungen gerecht wird, muss es ein breites Spektrum an biologischen, physikalischen und anwendungstechnischen Eigenschaften erfüllen (5). Aus biologischer Sicht ist eine hohe Gewebeverträglichkeit entscheidend. Das Material sollte weder zytotoxisch noch proinflammatorisch wirken und im Idealfall über antimikrobielle Eigenschaften verfügen, um eine Reinfektion zu verhindern. Zudem ist eine Resistenz gegenüber biologischer Resorption erforderlich, um die Integrität der Füllung im Gewebe langfristig zu sichern (36). Für eine dauerhafte und bakterienundurchlässige Versiegelung des Wurzelkanalsystems ist eine ausgeprägte Dimensionsstabilität mit zuverlässiger Adhäsion an der Kanalwand von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus sollte das Wurzelkanalfüllmaterial eine homogene, porenfreie Struktur aufweisen, die eine geringe Löslichkeit bei Kontakt mit Gewebeflüssigkeiten aufweist (36). Praktisch-klinische Anforderungen betreffen in erster Linie die Anwenderfreundlichkeit und Verarbeitungszeit. Das Material sollte sich kontrolliert in den Wurzelkanal einbringen lassen, gleichzeitig aber eine ausreichende Verarbeitungszeit aufweisen. Eine hohe Radiopazität vereinfacht die postoperative Beurteilung der Wurzelkanalfüllung. Unerwünschte Verfärbungen der Zahnhartsubstanz sollten in ästhetisch sichtbaren Bereichen vermieden werden (36).

5.8 Guttapercha

Guttapercha stellt seit vielen Jahrzehnten das Standardmaterial in der endodontischen Füllung dar. Es handelt sich um ein polymeres Naturprodukt, das aus dem eingedickten Milchsaft tropischer Bäume der Familie Sapotaceae gewonnen wird. Chemisch gesehen ist Guttapercha ein Isomer von Kautschuk, unterscheidet sich jedoch durch höhere Härte, Sprödigkeit und eine geringere Elastizität (62, 64). Kristallin kann Guttapercha in einer α - oder β -Phase vorliegen. Die α -Phase ist fließfähig und weich, die β -Phase dagegen flexibler und wird bevorzugt in Kaltfülltechniken eingesetzt. In der industriellen Verarbeitung wird Guttapercha meist in die β -Phase überführt (65).

Kommerzielle Guttaperchastifte bestehen typischerweise aus etwa 20 % Guttapercha und bis zu 80 % Zinkoxid. Zusätze wie Wachse, Kunststoffe und Metallsulfate verbessern Plastizität und Röntgensichtbarkeit. Zudem werden teilweise bioaktive Zusätze wie Kalziumhydroxid, Chlorhexidin oder Jodoform eingearbeitet, um die antimikrobielle Wirkung zu verstärken (66-68). Guttapercha wird bei etwa 60 °C plastisch, was für thermoplastische Fülltechniken von Bedeutung ist. Der Phasenwechsel von der β - in die α -Phase kann während der Erwärmung auftreten und ist mit Volumenänderungen verbunden, die bei unzureichender Technik Schrumpfungen verursachen können. Guttapercha ist in organischen Lösungsmitteln wie Eukalyptusöl oder Xylol löslich (36).

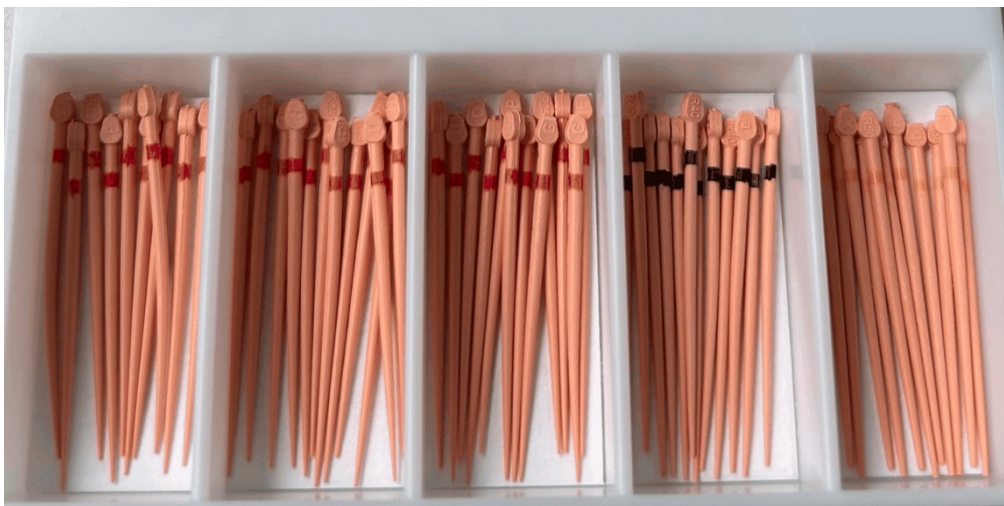


Abbildung 3: Übersicht über Guttaperchastifte unterschiedlicher Größen entsprechend der ISO-Farbcodierung (eigene Aufnahme).

5.9 Kunstharzbasierte Füllmaterialien

Kunststoffbasierte Füllmaterialien wurden über Jahrzehnte hinweg als Alternative zu Guttapercha erforscht (69). Mit der Einführung von Resilon etablierte sich eine klinisch

relevante Option. Resilon besteht aus einer Polyesterbasis, verstärkt mit bioaktivem Glas, Bismut- und Bariumsalzen (70). Es wird in Form von Stiften für die laterale Kondensation und als Pellets für thermoplastische Techniken angeboten. Die physikalischen Eigenschaften ähneln jenen von Guttapercha, wobei die Fähigkeit zur chemischen Bindung an den Sealer einen potenziellen Vorteil hinsichtlich der Versiegelung und Stabilität bietet. Es ist sowohl für die laterale Kondensation als auch für thermoplastische Techniken geeignet. Die Langzeitbeständigkeit erscheint begrenzt. Genannt werden vor allem enzymatische Degradation und damit einhergehende dimensionsbezogene Veränderungen (69).

5.10 Wurzelkanalsealer

Wurzelkanalsealer bilden zusammen mit Guttapercha die Grundlage der dichten Obturation des endodontischen Systems. Die jeweilige chemische Zusammensetzung der Sealer beeinflusst ihre physikalischen Eigenschaften und Interaktion mit dem umgebenden Gewebe (63).

Die Anforderungen an ideale Wurzelkanalsealer wurden von Grossman definiert und umfassen eine hermetische Abdichtung des Kanalsystems, eine hohe Haftfähigkeit an der Zahnhartsubstanz, ausgeprägte Radiopazität sowie eine bakterienhemmende Wirkung. Zudem sollten Sealer eine geringe Schrumpfung während der Aushärtung zeigen und biokompatibel sein (69).

5.11 Typen von Wurzelkanalsealern

Zinkoxid-Eugenol-basierte Sealer

Zinkoxid-Eugenol-Sealer gehören zu den früh etablierten Materialien. Der Sealer zeigt initial eine antibakterielle Wirkung durch das freigesetzte Eugenol. Diese nimmt jedoch mit der Zeit durch die Diffusion von Eugenol aus dem Sealer ab. Im Langzeitverlauf werden Einschränkungen der Dimensionsstabilität und Beständigkeit gegenüber Flüssigkeitseinwirkung beschrieben (63, 71).

Epoxidharzbasierte Sealer

Epoxidharzbasierte Sealer werden in der Endodontie seit vielen Jahren verwendet und gelten als sehr zuverlässig. Sie zeichnen sich durch eine gute Abdichtung, hohe Formstabilität und gute Fließeigenschaften aus. Einer der bekanntesten Vertreter dieser Gruppe ist AH Plus, der als sogenannter „Goldstandard“ bezeichnet wird (36). Dieser ist durch eine initial bakterizide Wirkung, die im zeitlichen Verlauf nachlässt und seine hohe Biokompatibilität gekennzeichnet (36, 72).

Als materialbedingte Nachteile epoxidharzbasierter Sealer werden in der Literatur die vergleichsweise lange Aushärtungszeit von etwa 8 Stunden sowie eine zeitlich begrenzte, aushärtungsabhängige Zytotoxizität beschrieben (73). Während der initialen Aushärtungsphase können reaktive Bestandteile freigesetzt werden, die in In-vitro-Untersuchungen vor allem bei direktem Kontakt mit periapikalem Gewebe eine reduzierte Zellviabilität zeigen (63, 72, 73). Zudem konnte gezeigt werden, dass die Polymerisation von AH Plus auch nach der initialen Aushärtungsphase weiter fortschreitet und selbst nach einer Woche noch nicht vollständig abgeschlossen ist (73).

Diese Effekte nehmen nach vollständiger Aushärtung deutlich ab. Darüber hinaus weisen epoxidharzbasierte Sealer keine bioaktive Wirkung auf und fördern im Gegensatz zu biokeramischen Materialien weder eine Hartgewebsbildung noch eine chemische Bindung an Dentin (63). Auch eine begrenzte Löslichkeit und fehlende Resorbierbarkeit bei apikaler Extrusion werden als potenzielle Nachteile diskutiert (63).

Silikonbasierte Sealer

GuttaFlow ist ein kalt applizierbarer, selbsthärtender Polydimethylsiloxan-Sealer mit fein dispergierter Guttapercha und Silberpartikeln. Der Hersteller nennt eine hohe Fließfähigkeit und eine leichte Expansion beim Abbinden (74). In vitro zeigte GuttaFlow eine insgesamt mit Epoxidharz-Sealern vergleichbare Randdichtigkeit, wobei die Ergebnisse vom verwendeten Verfahren abhängen (75). GuttaFlow wird als Sealer in Kombination mit einem Mastercone eingesetzt, nicht als eigenständiges Füllmaterial (74).

Kalziumsalicylatzementbasierte Sealer

Sealer auf Basis von Kalziumsalicylat zeichnen sich durch ihre ausgeprägte biologische Verträglichkeit aus. Sie enthalten Kalziumhydroxid, das in der Zahnmedizin aufgrund seiner keimreduzierenden Eigenschaften und potenziellen Beitrages zur Mineralisationsförderung seit Langem etabliert ist (76, 77). Kalziumhydroxid setzt Kalzium- und Hydroxidionen frei, die zur Bildung von Hartgewebe beitragen und durch einen alkalischen pH-Wert Bakterien hemmen können. Bei Sealern ist jedoch unklar, ob diese Effekte im Mund ausreichend wirksam sind, da die Freisetzung der Ionen begrenzt ist und der pH-Wert nur leicht ansteigt (78).

Im Allgemeinen sind Sealer dieser Art jedoch durch eine erhöhte Löslichkeit in Flüssigkeiten und der damit verbundenen insuffizienten Wurzelkanalfüllung in ihrer Langzeitprognose eingeschränkt (36).

Bei bestimmten kalziumsalicylathaltigen Sealern ist die Sichtbarkeit im Röntgenbild eingeschränkt, da sie den durch die International Organization for Standardization (ISO) 6876/2001 festgelegten Mindeststandard für die Röntgenopazität von 3 mm Aluminiumäquivalent nicht erreichen. Dadurch ist die röntgenologische Beurteilbarkeit eingeschränkt (78).

Glasionomerzementbasierte Sealer

Glasionomerbasierte Wurzelkanalsealer zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine chemische Verbindung mit Dentin eingehen können, besonders nachdem das Smearlayer entfernt wurde. Diese Eigenschaft trägt dazu bei, die Abdichtung im Wurzelkanal zu verbessern und das Risiko eines bakteriellen Eindringens zu verringern (79). Ketac-Endo stellt eine weiterentwickelte Variante der Gruppe Glasionomerzement-basierten Sealer dar und bringt dabei mehrere Vorteile mit sich. Er ermöglicht eine verlängerte Verarbeitungszeit, zeigt eine eindeutige röntgenologische Sichtbarkeit und eine sehr gute Randpassung an die Kanalwände (80).

Kalziumsilikat-basierte Sealer

Wurzelkanalsealer auf Basis von Kalziumsilikaten sind durch ihre biologische Verträglichkeit und ihre bioaktiven Eigenschaften gekennzeichnet (81, 82). Ihre Zusammensetzung erlaubt die Freisetzung von Kalzium- und Hydroxylionen, wodurch im Wurzelkanal ein basisches Milieu geschaffen wird. Dies begünstigt zum einen eine antimikrobielle Wirkung, zum anderen kann die Apatitbildung entlang des Dentins angeregt werden, was zu einer stabilen Versiegelung beiträgt (36, 72, 83).

Ein Merkmal dieser Sealer ist ihre Fähigkeit zur chemischen Interaktion mit dem umgebenden Dentin. Über die sogenannte Mineralinfiltrationszone und die Bildung von Hydroxylapatit kommt es zu einer engen Anlagerung an die Kanalwände. Darüber hinaus wurde eine mikromechanische Retention durch Penetration in die Dentintubuli beschrieben (72, 84, 85). Diese Eigenschaften tragen zur Verbesserung der Randdichtigkeit und zur Minimierung bakterieller Reinfektionen bei.

Limitierend ist seine Hitzeempfindlichkeit, die bei thermoplastischen Obturationstechniken ein Problem darstellt (36).

5.12 AH Plus

Epoxidharzbasierte Wurzelkanalsealer wie AH Plus gelten aufgrund ihrer guten Verarbeitbarkeit, zuverlässigen Dichtigkeit und umfangreichen klinischen Evidenz weiterhin als Referenzmaterialien in der Endodontie (86).

AH Plus zeichnet sich durch gute Haftkraft an der Kanalwand, einfache Verarbeitung, Formstabilität sowie langanhaltende Dichtigkeit aus (87-89). Auch in der antibakteriellen Wirkung zeigt AH Plus vor allem initial eine starke Wirkung gegen das Bakterium *Enterococcus faecalis*, einen der häufigsten identifizierten Keime in chronisch verlaufenden, symptomlosen endodontischen Infektionen (90).

Die unterschiedlichen Materialeigenschaften wirken sich unmittelbar auf das klinische Vorgehen aus. AH Plus als hydrophober Sealer entfaltet seine Haftungseigenschaften unter möglichst trockenen Kanalbedingungen. Entsprechend wird eine Abschlusspülung mit chelatbildenden Lösungen wie EDTA (17 %) oder Zitronensäure (10 %) empfohlen, um durch Entfernung der Schmierschicht eine mikromechanische Adaption an das entkalkte Dentin zu ermöglichen (91).

Die antibakterielle Wirkung von AH Plus ist zeitlich begrenzt. In einer In-vitro-Studie aus dem Jahr 2009 zeigten Zhang et al., dass bereits nach fünf Minuten alle Bakterien von *Enterococcus faecalis* abgetötet werden konnten (72). Diese initiale antibakterielle Wirkung wird unter anderem auf die kurzfristige Freisetzung von Formaldehyd während der Aushärtungsphase zurückgeführt (92, 93).

Mit fortschreitender Abbindung nimmt diese Wirkung jedoch deutlich ab. Nach etwa 24 Stunden ist die antibakterielle Aktivität stark reduziert und nach sieben Tagen konnte keine bakterizide Wirkung mehr nachgewiesen werden (94, 95). Auch der pH-Wert, der zunächst leicht alkalisch ist, sinkt nach dem Abbinden auf fast neutral ab, was den Wirkungsverlust zusätzlich erklärt (72).

Untersuchungen zur Materialzusammensetzung von AH Plus zeigten nach 28 Tagen in wässriger Umgebung den Nachweis verschiedener Elemente, darunter Kohlenstoff, Sauerstoff, Silizium, Phosphor, Zirkonium, Kalzium und Wolfram (96). Studien beschreiben zudem eine sogenannte Mineralinfiltrationszone sowie eine mögliche Hydroxylapatitbildung am Randbereich zum Dentin (84, 85). Diese Prozesse deuten zwar auf eine gewisse Reaktion mit der Zahnschmelze hin, allerdings fehlt AH Plus die sogenannte Bioaktivität, wie sie bei biokeramischen Sealern beobachtet wird (87, 88).



Abbildung 4: Epoxidharzbasierter Wurzelkanalsealer, AH Plus Jet®, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland (eigene Aufnahme).

5.13 BC Sealer

BC Sealer ist ein kalziumsilikatbasierter, biokeramischer Wurzelkanalsealer. Typische Bestandteile sind Trikalziumsilikat, Dikalziumsilikat, Kalziumphosphat und Zirkoniumoxid als Röntgenkontrast, ergänzt durch Kalziumhydroxid sowie Füll- und Verdickungsstoffe (8, 97). Diese Zusammensetzung verleiht dem Sealer nicht nur physikalisch-chemische Stabilität, sondern auch ausgeprägte biologische Eigenschaften.

Laborstudien zeigen, dass kalziumsilikatbasierte Sealer im Vergleich zu epoxidharzbasierten Materialien eine verbesserte Adaptation an die Kanalwand, eine tiefere Penetration in Dentintubuli sowie eine ausgeprägtere antibakterielle Wirkung aufweisen (98, 99). Ein zentrales Merkmal biokeramischer Sealer wie BC Sealer ist ihre Fähigkeit zur Bioaktivität, durch die Freisetzung von Kalziumionen und die Induktion einer Apatitbildung an der Grenzfläche zum Dentin. Die hierbei entstehenden mineralischen Ablagerungen fördern eine dichte, chemisch vermittelte Verbindung zum Dentin (8, 9, 100, 101). Während der Abbindephase wird zudem ein deutlich alkalischer pH-Wert erreicht, der eine antimikrobielle Wirkung entfalten kann.

Hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften zeigt BC Sealer laut Literatur eine gute Dimensionsstabilität ohne signifikante Schrumpfung oder Expansion nach der Aushärtung (102). Einschränkungen bestehen jedoch hinsichtlich seiner thermischen Belastbarkeit. Untersuchungen belegen, dass hohe Temperaturen, wie sie bei thermoplastischen Obturationstechniken auftreten, die Viskosität und Fließfähigkeit des Materials reduzieren können (103). Daher ist die Verwendung des Sealers im Rahmen der Kaltfülltechnik empfehlenswert.

Aus biologischer Sicht weist der BC Sealer insgesamt eine gute Gewebeverträglichkeit auf. Mehrere Studien beschreiben eine geringe Zytotoxizität sowie eine Förderung der osteoblastären Differenzierung und Hartgewebsbildung (8, 9, 100, 101, 104).

Während der frühen Abbindephase kann der stark alkalische pH-Wert bei Kontakt mit periapikalem Gewebe, etwa infolge einer Sealerextrusion, vorübergehend mit einer reduzierten Zellviabilität einhergehen. Diese Effekte werden auf die hohe Konzentration freigesetzter Hydroxylionen zurückgeführt und nehmen mit fortschreitender Aushärtung des Materials deutlich ab (100, 102).

Aufgrund der hydrophilen Eigenschaften und der feuchtigkeitsabhängigen Aushärtung wird für kalziumsilikatbasierte Sealer empfohlen, das Spülprotokoll nach einer EDTA-Spülung (17 %) mit Natriumhypochlorit (2,5 %) abzuschließen. Dadurch wird freiliegendes Kollagen entfernt, ohne die bioaktive Interaktion des Sealers mit dem Dentin zu beeinträchtigen (91).

Ein relevanter Nachteil biokeramischer Sealer zeigt sich im Revisionsfall. Mikro-CT-basierte In-vitro-Studien belegen, dass kalziumsilikatbasierte Materialien im Vergleich zu epoxidharzbasierten Sealern schwieriger zu entfernen sind, mit signifikant mehr verbliebenem Restmaterial im Wurzelkanalsystem sowie einer erschwerten Wiederherstellung der apikalen Durchgängigkeit (105).

Neben materialtechnischen und biologischen Aspekten sind auch ökonomische Faktoren zu berücksichtigen. Auf Grundlage der im zahnmedizinischen Fachhandel veröffentlichten Listenpreise liegen biokeramische Sealer wie TotalFill BC bei vergleichbarer Gebindegröße etwa 65 % über epoxidharzbasierten Sealern wie AH Plus, was im klinischen Alltag bei häufiger Anwendung eine relevante wirtschaftliche Rolle spielen kann (106, 107).



Abbildung 5: Kalziumsilikatbasierter Wurzelkanalsealer, TotalFill BC Sealer®, FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz (eigene Aufnahme).

5.14 AH Plus versus BC Sealer

Merkmal	AH Plus (epoxidharzbasiert)	BC Sealer (kalziumsilikatbasiert)
Chemische Basis	Epoxidharz	Kalziumsilikat
Hydrophilie	Hydrophob	Hydrophil
Abbindebedingungen	Bevorzugt trockene Kanalbedingungen	Feuchtigkeit zur Aushärtung erforderlich
Interaktion mit Dentin	Mikromechanische Haftung	Chemische Interaktion durch Apatitbildung
Bioaktivität	Keine echte Bioaktivität	Bioaktiv mit Kalziumionenfreisetzung
Dentintubulipenetration	Abhängig von Smear-Layer-Entfernung und Trockenheit	Tiefere Tubuluspenetration
Antibakterielle Wirkung	Initial ausgeprägt, nach Abbindephase abnehmend	Alkalischer pH-Wert mit anhaltender Wirkung
Dimensionsstabilität	Gute Formstabilität nach Aushärtung	Hohe Stabilität mit geringer Schrumpfung
Thermische Belastbarkeit	Gut für warme Obturationstechniken geeignet	Bevorzugt für Kaltfülltechniken
Klinische Erfolgsraten	Vergleichbare Heilungs- und Erfolgsraten	Vergleichbare bis teilweise leicht bessere Erfolgsraten
Revisionsfähigkeit	Meist besser mechanisch entfernbar	Entfernung teilweise erschwert
Abschlussspülung	EDTA oder Zitronensäure empfohlen	NaOCl gefolgt von EDTA empfohlen
Kosten	Geringere Kosten	Höhere Kosten bei vergleichbarer Gebindegröße

Tabelle 1: Vergleich wesentlicher materialwissenschaftlicher und klinisch relevanter Eigenschaften epoxidharzbasierter und kalziumsilikatbasierter Wurzelkanalsealer (AH Plus vs. BC Sealer).

5.15 Wurzelkanalfülltechniken

Die Wurzelkanalfüllung, auch als Obturation bezeichnet, bildet den abschließenden Schritt der endodontischen Behandlung. Sie hat das primäre Ziel, das zuvor chemomechanisch aufbereitete und desinfizierte Wurzelkanalsystem bakteriendicht zu verschließen. Durch diesen dreidimensionalen Verschluss soll eine erneute mikrobielle Kontamination verhindert und die Ausbreitung von Toxinen in das periapikale Gewebe unterbunden werden (5). Die langfristige Prognose wurzelbehandelter Zähne hängt in hohem Maße von der Qualität der Wurzelkanalfüllung ab, da eine unzureichende Obturation mit einem erhöhten Risiko für persistierende oder rezidivierende apikale Parodontitiden assoziiert ist (57). Die Füllung der Kanäle erfolgt unter Verwendung biokompatibler, meist inert wirkender Materialien, typischerweise Guttapercha in Kombination mit einem Wurzelkanalsealer (4). Hinsichtlich der konkreten Technik bestehen verschiedene etablierte Verfahren. Dabei differenziert man zwischen Kaltfülltechniken (Einstifttechnik und laterale Kondensation) und thermoplastischen Fülltechniken (vertikale Kompaktion erwärmter Guttapercha, trägerbasierte Techniken und die thermoplastische Injektion) (36).

5.16 Einstifttechnik

Die Einstifttechnik gehört zu den Kaltfüllverfahren und stellt eine vereinfachte Methode der Wurzelkanalobturation dar.

Bei dieser Technik wird nach vollständiger Kanalaufbereitung ein einzelner, konisch geformter Guttaperchastift eingebracht, dessen Durchmesser und Konizität exakt dem zuletzt verwendeten maschinellen Aufbereitungsinstrument entsprechen. Der Stift wird so angepasst, dass er bei Einführen auf Arbeitslänge, im apikalen Drittel friktionssitzend abschließt. Nach erfolgter Masterpoint-Kontrollaufnahme wird der Stift vorübergehend entfernt, um die Abschlusspülung mit Natriumhypochlorit (NaOCl) durchzuführen, da kalziumsilikatbasierte Sealer für ihre Hydratationsreaktion und chemische Anbindung an das Dentin eine nicht entkalkte, mineralische Dentinoberfläche benötigen (91). Da bei der Einstifttechnik ein vergleichsweise hoher Anteil des Füllvolumens durch den Sealer eingenommen wird, wird der Zustand der Kanalwand in der Literatur als relevanter Faktor für die Adaptation des Sealers diskutiert (7, 59).

Im Anschluss erfolgt die Applikation des Wurzelkanalsealers, gefolgt vom endgültigen Einbringen des zuvor angepassten Guttaperchastiftes. Der Sealer soll hierbei zur Versiegelung des Wurzelkanals beitragen, indem er die verbleibenden Spalten zwischen Dentinwand und Füllmaterial ausfüllt (36, 108).

In-vitro-Daten zeigen, dass bei der Einstifttechnik die Sealerart einen relevanten Einfluss auf die Füllungsqualität lateral verlaufender Kanäle hat (108). Der direkte Vergleich zur lateralen Kondensation wird im Abschnitt 5.18 detailliert dargestellt.

Ein wesentlicher Nachteil der Einstifttechnik liegt im vergleichsweise hohen Anteil an Sealer in der Füllung, was potenziell das Risiko für Undichtigkeiten erhöhen kann. Dies wird besonders bei komplexen Kanalverläufen oder in anatomisch schwierigen Situationen relevant. Dennoch gilt die Methode als klinisch sinnvoll, insbesondere bei unkomplizierten Kanalformen oder in Kombination mit bioaktiven Sealern, deren Materialeigenschaften wie die selbstständige Aushärtung und hohe Biokompatibilität die Limitierungen der Technik teilweise kompensieren können (108).

5.17 Laterale Kondensation

Die laterale Kondensation stellt eine weitere Variante der Kaltfülltechniken dar. Sie bietet eine bewährte Methode, um eine möglichst kompakte und lückenlose Obturation des Wurzelkanalsystems zu erreichen. Das Verfahren basiert auf der schrittweisen Einbringung mit Sealer beschickter konischer Guttaperchastifte, in Kombination mit mechanischer Verdichtung durch ein Spreadinstrument, wodurch Platz für zusätzliche Guttaperchaspitzen geschaffen wird. Ziel ist eine möglichst homogene Füllung mit geringem Sealeranteil, um die langfristige Abdichtung und den Schutz vor mikrobieller Reinfektion zu gewährleisten (36, 108).

Dabei ist die Fähigkeit dieser Technik, auch komplexe anatomische Strukturen wie laterale Kanäle und Wandunregelmäßigkeiten zuverlässig zu verschließen, von Bedeutung. Durch die mechanische Kompaktion kann die Guttapercha eng an die Kanalwände angepresst werden, was die dreidimensionale Versiegelung verbessert und das Risiko bakterieller Persistenz reduziert.

Untersuchungen auf Laborbasis zeigen, dass die laterale Kondensation bei geeigneter Materialwahl eine hohe Füllungsdichte auch in seitlichen Kanalstrukturen erzielen kann. Eine differenzierte Bewertung im Vergleich zur Einstifttechnik wird in Abschnitt 5.19 vorgenommen (108).

Diese Befunde unterstreichen den Vorteil der lateralen Kondensation hinsichtlich der Füllungsdichte und Kanaladaptation. Trotz des höheren instrumentellen Aufwands und der erforderlichen Sorgfalt in der Anwendung, bleibt aufgrund ihrer Zuverlässigkeit und Vielseitigkeit eine klinisch etablierte Standardtechnik (36). Sie wird bei Fällen mit komplexer Kanalgeometrie und erhöhtem Risiko für bakterielle Persistenz empfohlen (108).

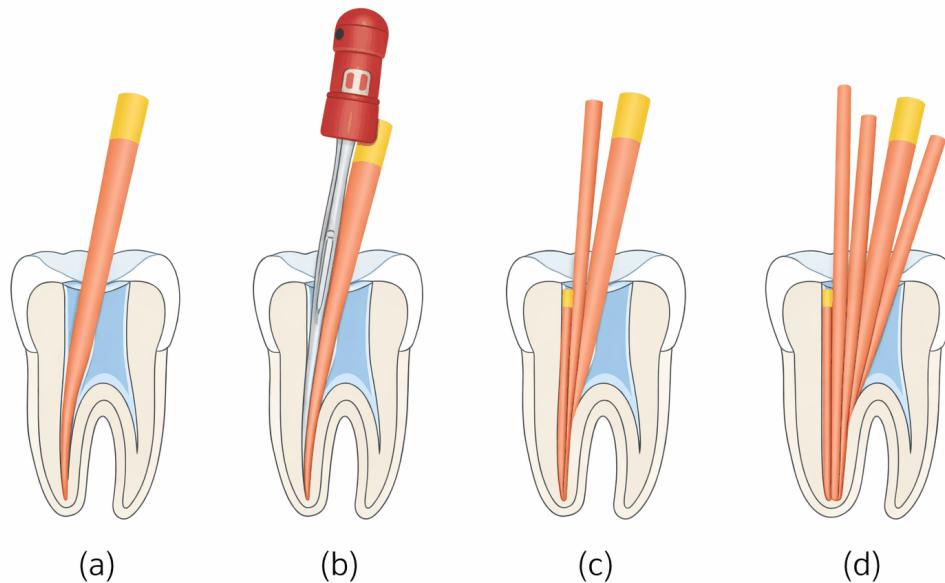


Abbildung 6: Schematische Darstellung der lateralen Kondensation von Guttapercha bei der Wurzelkanalfüllung nach Vorbild von Quelle (109).

- (a) Applikation des Sealers an die Kanalwand und Platzierung des Masterpoints bis zur Arbeitslänge.
- (b) Laterale Verdichtung des Masterpoints mittels Spreader bei gleichzeitiger Sealerverteilung.
- (c) Einbringen sealerbenetzter Zusatzstifte in die durch den Spreader geschaffenen Räume.
- (d) Ergebnis der vollständigen lateralen Kondensation mit dicht adaptierter Guttapercha und Sealer in einem Wurzelkanal.

5.18 Laterale Kondensation versus Einstifttechnik

Der Vergleich zwischen der Einstifttechnik und der lateralen Kondensation ist Gegenstand experimenteller und klinischer Untersuchungen. Trotz der breiten Anwendung beider Techniken bestehen weiterhin unterschiedliche Einschätzungen hinsichtlich ihrer obturationsbedingten Eigenschaften, wie Füllungsqualität, Dichtigkeit und klinischen Auswirkungen.

Nouroloyouni et al. (2023) untersuchten in einer *in-vitro*-Studie an 88 extrahierten einwurzeligen Zähnen die Füllungsqualität sowie die Push-out-Verbundfestigkeit der Einstifttechnik und der lateralen Kondensation unter Verwendung des epoxidharzbasierten Sealers AH Plus und des kalziumsilikatbasierten Sealers Sure Seal Root. Zwischen den

beiden Obturationstechniken zeigten sich keine konsistenten Unterschiede in der Verbundfestigkeit, sofern derselbe Sealer eingesetzt wurde.

Demgegenüber bestanden deutliche sealerabhängige Unterschiede. Sure Seal Root wies in allen Wurzeldritteln signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte auf als AH Plus. Zudem zeigte sich bei Verwendung von AH Plus bei der lateralen Kondensation ein geringerer Void-Anteil als bei der Einstifttechnik. Die Autoren leiteten daraus ab, dass die Sealerart einen stärkeren Einfluss auf Haftfestigkeit und Füllungsqualität ausübt als die Wahl der Obturationstechnik selbst (110).

Diese Ergebnisse fügen sich in die Befunde der Meta-Analyse von Só et al. (2024) ein, in der 18 *in-vitro*-Studien mit insgesamt über 900 untersuchten Wurzelkanälen ausgewertet wurden. Analysiert wurden Parameter wie Void-Anteil, Wandadaptation und apikale Dichtigkeit, erhoben mittels Micro-CT, Farbstoffpenetration oder rasterelektronenmikroskopischer Verfahren. In der gepoolten Analyse ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Einstifttechnik und lateraler Kondensation. Gleichzeitig wiesen die Autoren auf eine ausgeprägte methodische Heterogenität hin, vor allem in Bezug auf die verwendeten Sealer, die Kanalpräparation sowie die eingesetzten Messmethoden, was die Vergleichbarkeit der Einzelstudien einschränkt (111).

Auch El Sayed & El Sayed (2025) verglichen beide Techniken in einer *in-vitro*-Untersuchung unter Verwendung verschiedener Sealer (AH Plus, BioRoot RCS und GuttaFlow 2) mit Fokus auf die Füllung lateraler Kanäle. Dabei zeigte die laterale Kondensation insgesamt höhere Füllungsraten in Seitenkanälen, insbesondere bei Kombination mit AH Plus und GuttaFlow 2. Gleichzeitig wurde bei Verwendung des kalziumsilikatbasierten Sealers BioRoot RCS auch bei der Einstifttechnik eine vergleichsweise hohe Füllungsqualität im apikalen Bereich erreicht, was erneut auf den relevanten Einfluss der Materialeigenschaften des Sealers hinweist (108).

Neben experimentellen Untersuchungen wurden auch klinische Parameter betrachtet. Abada et al. (2025) führten eine randomisierte klinische Studie mit 150 Patienten durch, bei der die Einstifttechnik und die laterale Kondensation jeweils mit einem kalziumsilikatbasierten Sealer (CeraSeal) sowie mit einem epoxidharzbasierten Sealer (AH Plus) kombiniert wurden. Untersucht wurden die postoperative Schmerzintensität über einen Zeitraum von 72 Stunden und das Auftreten von Sealerextrusionen. Zwischen den Obturationstechniken zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der postoperativen Schmerzintensität ($p = 0,124$). Dagegen war die Schmerzintensität signifikant von der Sealerart abhängig, wobei AH Plus mit höheren Schmerzangaben assoziiert war. Auch die Häufigkeit von Sealerextrusionen unterschied sich nicht signifikant zwischen den Techniken, war jedoch mit einer erhöhten Schmerzintensität verbunden (112).

Zusammenfassend zeigen die bisherigen experimentellen und klinischen Studien, dass weder die Einstifttechnik noch die laterale Kondensation eine eindeutige Überlegenheit hinsichtlich der obturationsbedingten Qualität oder klinischer Parameter aufweist. Vielmehr deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Materialeigenschaften des verwendeten Sealers einen maßgeblichen Einfluss auf Haftfestigkeit, Adaptation und postoperative Beschwerden haben. Die Wahl der Obturationstechnik sollte daher unter Berücksichtigung der Kanalgeometrie, der klinischen Situation sowie der verwendeten Sealerart erfolgen.

5.19 Komplikationen

Postoperative Komplikationen nach WKB werden in der Literatur überwiegend in frühe, häufig temporäre Ereignisse (postoperativer Schmerz, Schwellung/Flare-up) und späte, interventionsbedürftige Ereignisse (Revision, Wurzelspitzenresektion, Fraktur, Extraktion) gegliedert. Systematische Übersichten berichten für postoperative Schmerzen eine breite Spannweite der Prävalenz, wobei die Mehrzahl der Beschwerden innerhalb weniger Tage abklingt (113). Flare-ups, definiert als akute Schmerz- oder Schwellungsepisoden mit ungeplanter Intervention, sind seltener und werden häufig bei nekrotischer Pulpa und vorbestehender apikaler Pathologie beschrieben (114, 115). Als auslösende Faktoren gelten proinflammatorische Reaktionen auf chemo-mechanische Maßnahmen, apikal überpresster Sealer sowie okklusale Überlastung. Außerdem spielen individuelle Wirtsfaktoren eine Rolle (114, 116).

Spätkomplikationen stehen in erster Linie mit persistierender oder rekurrenter apikaler Infektion in Zusammenhang. Hier sind die technische Qualität der Wurzelkanalfüllung und der koronale Verschluss zentrale Prädiktoren für den Langzeiterfolg (4, 117). Metaanalysen zeigen, dass unzureichende Obturation und mangelhafte koronale Dichtigkeit mit höherer Rate an persistierenden periapikalen Läsionen und sekundären Interventionen (Revision, chirurgische Maßnahmen) einhergehen (4, 117).

In Ausbildungssettings ist zusätzlich mit erhöhten Raten prozeduraler Fehler zu rechnen, die den weiteren Verlauf mittelbar beeinflussen können. Retrospektive Untersuchungen studentischer Behandlerkollektive berichten substanzielle Quoten technischer Abweichungen wie Unter- und Überfüllungen, Instrumentenfrakturen sowie Perforationen, wobei eine Häufung bei Molaren zu beobachten ist (118, 119). Perforationen stellen dabei ungewollte iatrogene Verbindungen zwischen dem Wurzelkanalsystem und dem umgebenden parodontalen Gewebe dar.

Ein zurückgelassenes Fragment verschlechtert die Prognose nicht zwangsläufig, sofern keine präoperative Läsion vorliegt und die Desinfektion adäquat ist (120). Demgegenüber sind Perforationen und vertikale Wurzelfrakturen häufiger mit einer ungünstigen Langzeitprognose und erhöhtem Extraktionsrisiko assoziiert (121).

Die vorliegenden Daten verdeutlichen ein multifaktorielles Bild postendodontischer Komplikationen. Neben biologischen Reaktionen bestimmen technik- und qualitätsabhängige Faktoren, sowie der Erfahrungsgrad der Behandelnden, das Risiko. Unterschiede zwischen Obturationstechniken werden dabei vor allem über ihre Reproduzierbarkeit technischer Qualitätskriterien wie Länge, Homogenität und koronal dichtem Abschluss klinisch relevant.

6 Material und Methoden

6.1 Ethik und Datenschutz

Es handelt sich um eine retrospektive Auswertung von Routinedaten der Klinik für Parodontologie und Zahnerhaltung der Universitätsmedizin Mainz, erhoben im Zeitraum 01.01.2014 bis 31.07.2021. Es erfolgten keine studienbedingten Eingriffe oder Befragungen. Die Analyse fand ausschließlich anonymisiert innerhalb der Einrichtung statt. Dritte hatten keinen Zugriff. Nach Landeskrankenhausgesetz Rheinland-Pfalz (§§ 36, 37) ist hierfür kein Ethikantrag erforderlich. Die Datenverarbeitung entsprach den geltenden Datenschutzrichtlinien (DSGVO).

6.2 Studiendesign und Patientenkollektiv

Die Studie wurde als retrospektiv-statistische Analyse abgeschlossener WKB mehrwurzeliger Zähne in der Klinik für Parodontologie und Zahnerhaltung der Universitätsmedizin Mainz durchgeführt. Die Behandlungen wurden von Behandlern mit unterschiedlichem Erfahrungsgrad durchgeführt. Hierbei wurde zwischen drei Behandlergruppen differenziert. Die erste Gruppe umfasste Studierende des 7. Semesters zu Beginn der klinischen Ausbildung, die nach Abschluss der Phantomkurse erstmals Wurzelkanalbehandlungen am Patienten durchführten. Die Behandlungen erfolgten unter engmaschiger Supervision approbierter Zahnärzte im Rahmen des studentischen Kurses, wobei einzelne Behandlungsschritte regelmäßig vorgezeigt und überprüft wurden.

Die zweite Gruppe bestand aus Studierenden des 10. Semesters in fortgeschrittener klinischer Ausbildung, die bereits über mehrere Semester praktische Behandlungserfahrung verfügten und sich in der Abschlussphase vor dem Staatsexamen befanden. Auch hier erfolgte die

Behandlung unter Anleitung und Kontrolle approbierter Behandler im Rahmen des klinischen Unterrichts.

Die dritte Behandlergruppe wurde durch approbierte Zahnärzte repräsentiert, die als angestellte Behandler der Zahnklinik Mainz tätig waren und über umfangreiche klinische Erfahrung in der Patientenbehandlung verfügten.

Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich vom 1. Januar 2014 bis zum 31. Juli 2021, wobei der Zeitraum vom 1. August 2016 bis zum 31. Mai 2017 aus der Analyse ausgeschlossen wurde, da es sich um eine Übergangsphase mit paralleler Anwendung beider Obturationstechniken handelte und eine eindeutige Zuordnung der Behandlungen nicht durchgängig gewährleistet werden konnte.

Für die Datenauswertung wurden folgende **Ein- und Ausschlusskriterien** definiert:

Einschlusskriterien:

- abgeschlossene primäre endodontologische Behandlungen
- mehrwurzelige Zähne mit mehreren Vertucci-Typ-I-Wurzelkanälen
- Behandlung unter Kofferdam
- Verwendung einer der folgenden Wurzelfülltechniken:
 - Laterale Kondensation mit AH Plus
 - Einstifttechnik mit BC Sealer
- vollständige Anamnese in der Patientenakte dokumentiert
- röntgenologische Kontrollaufnahme nach Wurzelkanalfüllung in ausreichender diagnostischer Qualität
- vollständige Beurteilbarkeit aller Wurzelspitzen und des gesamten Wurzelkanalsystems
- Behandlung durch eine einheitliche Behandlergruppe mit vergleichbarem klinischem Erfahrungsgrad

Ausschlusskriterien:

- Weisheitszähne
- Revisionsbehandlungen
- Behandlungen im Übergangszeitraum vom 01.08.2016 bis 31.05.2017
- fehlende oder qualitativ unzureichende röntgenologische Kontrollaufnahmen
- unvollständige Patientenakten

Aus einem Ausgangskollektiv von 491 Fällen konnten nach Anwendung der definierten Ein- und Ausschlusskriterien 333 Fälle in die statistische Auswertung einbezogen werden, was

einer Einschlussrate von 67,8 % entspricht. Als klinikbasiertes Kollektiv bildet die Stichprobe nur einen Teil der Allgemeinbevölkerung ab.

Untersuchungszeitraum	Wurzelfülltechnik	Verwendeter Sealer	Bemerkung
01.01.2014 – 31.07.2016	Laterale Kondensation	AH Plus (epoxidharzbasiert)	Standardverfahren vor Technikwechsel
01.08.2016 – 30.04.2017	–	–	Übergangsphase, aus der Analyse ausgeschlossen
01.05.2017 – 31.07.2021	Einstifttechnik	BC Sealer (kalziumsilikatbasiert)	Standardverfahren nach Technikwechsel

Tabelle 2: Zuordnung der Untersuchungszeiträume zur Wurzelfülltechnik und verwendeten Sealer.

6.3 Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgte retrospektiv durch Sichtung digitaler und analoger Patientenakten sowie durch Auswertung der zugehörigen röntgenologischen Befunde. Hierzu wurden Einträge aus den digitalen Dokumentationssystemen SAP GUI for Windows (SAP SE, Walldorf, Deutschland, Version 8.00) und VISident (BDV Branchen-Daten-Verarbeitung GmbH, Holzwickede, Deutschland, Version 2.0) herangezogen und bei Bedarf durch analoge Patientenakteien ergänzt.

Die erfassten Daten wurden zur weiteren Verarbeitung tabellarisch in Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA; Version 16.91) überführt.

6.4 Röntgenologische Auswertung

Die röntgenologischen Kontrollaufnahmen nach erfolgter Wurzelkanalfüllung stellten die zentrale Grundlage der Bewertung dar. Die Auswertung erfolgte digital mithilfe des Röntgensystems Sidexis XG 2.6 (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) an einem Monitor entsprechend der Norm DIN 6868-157 (2014).

Zur Sicherstellung einer objektiven Datenerhebung wurden die Röntgenbilder zunächst durch einen approbierten Zahnarzt manuell anonymisiert. Die anschließende Befundung erfolgte unabhängig von den klinischen Patientendaten durch zwei Studierende des neunten Semesters der Universitätsmedizin Mainz, nach einer strukturierten Kalibrierungsphase in Anlehnung an die retrospektive Studie von Llana et al. (2020) (50).

In diagnostisch unklaren Fällen wurden die Aufnahmen konsiliarisch unter Einbeziehung der Erfahrung eines approbierten Betreuers beurteilt.

6.5 Erhobene Bewertungsparameter

Die im Rahmen der Studie erhobenen Bewertungsparameter sind mit ihren jeweiligen Definitionen und Kodierungen übersichtlich tabellarisch (s. Anhang 11.1) dargestellt.

Erhobene röntgenologische Daten:

1. Wurzelanzahl
2. Wurzelkanalanzahl
3. Apikale Parodontitis bei Diagnoseaufnahme (Ja/Nein Entscheidung)
4. Puff (Ja/Nein Entscheidung)
5. Vertucci Typ I Kanal (Ja/Nein Entscheidung)
6. Suffizientes Kontrollbild (Ja/Nein Entscheidung)
7. Länge der WF (>2mm vor radiologischen Apex/≤2mm vor radiologischen Apex/WF endet am radiologischen Apex/apikal Puff)
8. Qualität (homogen/inhomogen)
9. PAI bezüglich Röntgenkontrollaufnahme nach WF (Code 1,2,3,4,5)

Parameter Patientenkartei:

1. Behandler
(Start klinische Ausbildung, fortgeschrittene klinische Ausbildung, Approbierte)
2. Revision (Ja/ Nein Entscheidung)
3. Art postoperativer Komplikation
(keine Komplikation, Schwellung, Extraktion, Revision, Schmerz, WSR, Fraktur)
4. Zeitpunkt postoperativer Komplikation
(post ≤1 Woche/ post >1Woche bis ≤3Monate/ >3 Monate bis ≤ 6 Monate/post > 6 Monate bis ≤18 Monate)
5. Postendodontische Versorgung
(Krone / Füllung/fehlende Dokumentation)
6. Anzahl der Behandlungssitzungen
7. Wurzelfülltechnik
(Laterale Kondensation mit AH Plus/ Einstifttechnik mit BC Sealer)
8. Anamnese
(Diabetes, Parodontitis, Endokarditisprophylaxe, Rauchen, Bisphosphonate)
9. Kofferdam (Ja/ Nein Entscheidung)

Nach Abschluss der Befundung der Röntgenaufnahmen und der Auswertung der Patientenkarteien wurden die anonymisierten Röntgenbilder entschlüsselt und die ermittelten Befunde mit den Patientendaten zusammengeführt. Anschließend erfolgte eine Selektion der Fälle anhand der festgelegten Ein- und Ausschlusskriterien. Die finalen Datensätze wurden daraufhin in SPSS International Business Machines Corporation, Armonk, USA, Version 29 zur statistischen Analyse anonymisiert überführt.

Die Qualität der Wurzelkanalfüllung wurde zahnbezogen anhand der Kriterien Füllungslänge und Homogenität im postoperativen Röntgenbild nach erfolgter Wurzelkanalfüllung beurteilt.

Die radiologische Beurteilung der Wurzelkanalfüllungen umfasste die Parameter Füllungslänge in Relation zum radiologischen Apex und Homogenität der Füllung. Beide Kriterien wurden getrennt voneinander erfasst und ausgewertet. Die Einordnung der Füllungslänge orientierte sich an in der endodontologischen Literatur gebräuchlichen Konzepten zur Lage des Füllungsendes (4, 122, 123).

Es wurden folgende Kategorien definiert:

- Füllung > 2 mm vor dem radiologischen Apex
- Füllung $\leq$ 2 mm vor dem radiologischen Apex
- Füllung am radiologischen Apex
- apikale Extrusion (Sealer-Puff)

Die Homogenität der Wurzelkanalfüllung wurde unabhängig davon dichotom in „homogen“ und „inhomogen“ klassifiziert.

Zusätzlich wurde auf Basis beider Parameter eine zusammenfassende Bewertung der Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung vorgenommen.

Eine ideale Gesamtqualität wurde definiert als eine Wurzelkanalfüllung, die am radiologischen Apex oder bis maximal 2 mm davor endet und gleichzeitig eine homogene Struktur ohne radiologisch erkennbare Hohlräume aufweist.

Wurzelfüllungen, die diese Kriterien nicht vollständig erfüllten, wurden entsprechend als nicht ideale Gesamtqualität eingestuft.

6.6 Statistische Analyse

Die statistische Analyse wurde mit der Statistik- und Analysesoftware SPSS durchgeführt. Kategoriale Variablen wurden als absolute und relative Häufigkeiten dargestellt. Zur Visualisierung der Verteilungen wurden deskriptive Balkendiagramme sowie Tabellen mit den absoluten Werten erstellt. Gruppenvergleiche erfolgten mit dem Pearson-Chi-Quadrat-Test mit festgelegtem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$.

Zur Prüfung von Gruppenunterschieden zwischen der lateralen Kondensation mit AH Plus und BC Sealer wurden inferenzstatistische Tests durchgeführt. Für kategoriale Variablen wurde der Chi-Quadrat-Test verwendet. Ordinale Variablen (Anzahl Behandlungssitzungen) wurden zunächst auf Normalverteilung geprüft, mittels Shapiro-Wilk-Test, und anschließend mittels Mann-Whitney-U-Test analysiert. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

Die Übereinstimmung der Befundungen zwischen den beiden Untersuchenden wurde mittels Cohen's Kappa bestimmt.

Als statistische Beobachtungseinheit diente der einzelne Zahn. Dabei stand die schlechtestbewertete Wurzel repräsentativ für den gesamten Zahn.

7 Ergebnisse

7.1 Übereinstimmung der Bewertungsergebnisse

Zur Überprüfung der Übereinstimmung der beiden Untersuchenden, nach der in den Methoden beschriebenen Kalibrierungsphase, wurde die Interrater-Reliabilität berechnet. Der ermittelte Cohen's-Kappa-Wert betrug 0,8205 und zeigt damit eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Untersuchenden.

Nach gängiger Klassifikation gelten Kappa-Werte über 0,8 als Ausdruck einer guten Übereinstimmung, Werte zwischen 0,61 und 0,80 als substantiell und Werte zwischen 0,41 und 0,60 als moderat (50).

Aufgrund der hohen Interrater-Reliabilität kann von einer hohen Reproduzierbarkeit und Validität der erhobenen Befunddaten ausgegangen werden, sodass die nachfolgende statistische Auswertung auf einer konsistenten und zuverlässigen Datengrundlage basiert.

7.2 Beschreibung der Stichprobe und Ausgangsbefunde

Dieser Abschnitt eröffnet den Ergebnisteil mit einer deskriptiven Darstellung der Stichprobe und der Ausgangsbefunde, basierend auf Patientenakten und Röntgenbildern. Zur Einordnung ausgewählter Zusammenhänge werden ergänzend statistische Prüfverfahren angewendet.

Zunächst erfolgt die Darstellung der Stichprobe hinsichtlich der Verteilung nach Behandlergruppen und angewandten Wurzelkanalfülltechniken.

7.2.1 Verteilung der Fälle nach Behandler und Technik

Insgesamt konnten unter Berücksichtigung der festgelegten Einschlusskriterien 333 mehrwurzelige, endodontisch behandelte Zähne in die statistische Auswertung aufgenommen werden. Davon wurden 163 Zähne mittels lateraler Kondensation unter Verwendung des Wurzelkanalsealers AH Plus und 170 Zähne mit der Einstifttechnik unter Anwendung von BC Sealer obturiert.

Die Verteilung der Behandler innerhalb der Gruppe mit lateraler Kondensation ergab sich wie folgt: 54 Zähne wurden von Studierenden zu Beginn der klinischen Ausbildung, 54 von Studierenden in fortgeschrittener klinischer Ausbildung und 55 von approbierten Zahnärzten behandelt. Bei Anwendung der Einstifttechnik wurden 59 Zähne von Studierenden am Start der klinischen Ausbildung, 60 Zähne in fortgeschrittener klinischer Ausbildung und 51 Zähne von approbierten Behandlern durchgeführt (Tabelle 3).

Behandler	Kategorie	Laterale Kondensation mit AH Plus n (%)	Einstift-technik mit BC-Sealer n (%)	Gesamt
Start klinische Ausbildung	Anzahl	54	59	113
	% von Behandler	47,8%	52,2%	100,0%
Fortgeschrittene Ausbildung	Anzahl	54	60	114
	% von Behandler	47,4%	52,6%	100,0%
Approbierte	Anzahl	55	51	106
	% von Behandler	51,9%	48,1%	100,0%
Gesamt	Anzahl	163	170	333
	% von Behandler	48,9%	51,1%	100,0%

Tabelle 3: Kreuztabelle zur Verteilung der verwendeten Fülltechniken nach Ausbildungsstand der Behandler.

7.2.2 Anamnese

Im Rahmen der Datenerhebung wurden die anamnestischen Angaben aller eingeschlossenen Patienten systematisch erfasst und auf potenziell relevante systemische sowie parodontale Risikofaktoren hin überprüft. Zu den berücksichtigten Risikofaktoren zählten Diabetes mellitus, Parodontitis, aktives Rauchen, die Einnahme einer Endokarditisprophylaxe sowie eine laufende Bisphosphonattherapie. In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle lagen keine relevanten Vorerkrankungen oder Risikokonstellationen vor. Insgesamt wurden 287 der untersuchten Personen (85,4 %) als anamnestisch unauffällig dokumentiert.

Parodontitis war mit 29 Fällen (8,6 %) die am häufigsten verzeichnete Einzelanamnese, gefolgt von Diabetes mellitus mit 7 Patienten (2,1 %). Weitere Kombinationen und seltenere Risikokonstellationen wie Diabetes und Parodontitis (4 Fälle), Endokarditisprophylaxe (2 Fälle) sowie Rauchen in Kombination mit Parodontitis, Endokarditis und Parodontitis oder Bisphosphonattherapie mit begleitender Parodontitis (jeweils 1 Fall) traten nur vereinzelt auf.

Die Verteilung zeigt insgesamt eine klare Dominanz unauffälliger anamnestischer Profile, während systemische oder kombinierte Belastungen in dieser Stichprobe nur in Einzelfällen nachweisbar waren (Tabelle 4, Abbildung 7).

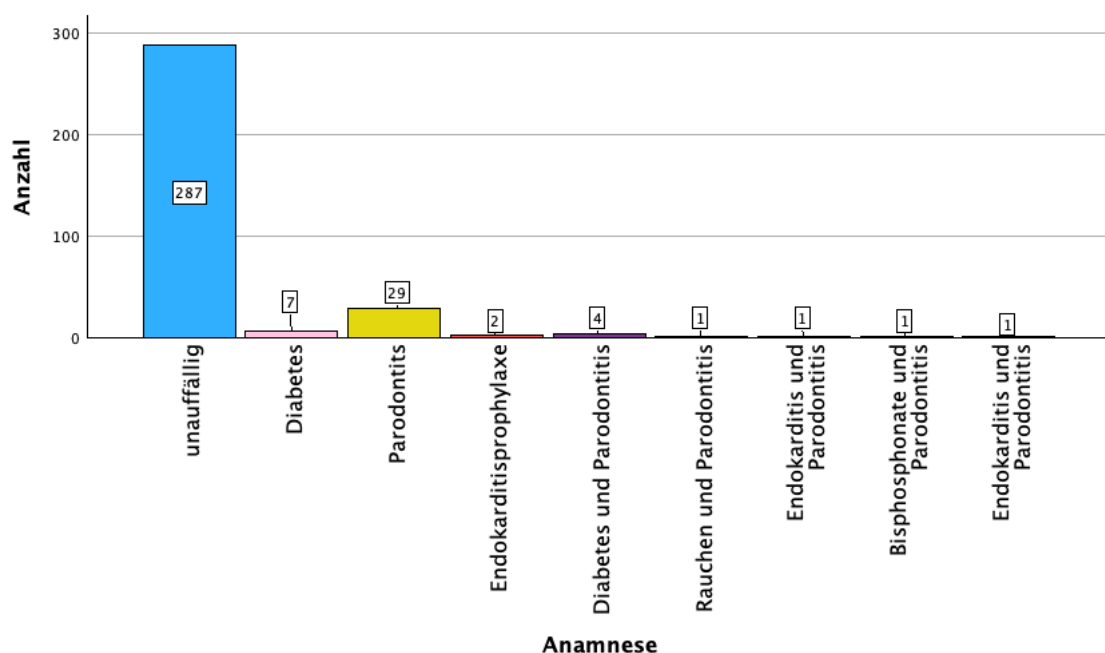


Abbildung 7: Balkendiagramm zur Verteilung anamnestischer Besonderheiten im untersuchten Patientenkollektiv (n = 333). X-Achse: anamnestischen Vorerkrankungen der Patienten, Y-Achse: Anzahl der Behandlungsfälle als absolute Zahl.

Anamnese	Laterale Kondensation mit AH Plus n (%)	Einstifttechnik mit BC-Sealer n (%)	Gesamt n (%)
unauffällig	140 (85,9%)	147 (86,5 %)	287 (86,2 %)
Diabetes	2 (1,2 %)	5 (2,9 %)	7 (2,1 %)
Parodontitis	17 (10,4 %)	12 (7,1 %)	29 (8,7 %)
Endokarditisprophylaxe	1 (0,6 %)	1 (0,6 %)	2 (0,6 %)
Diabetes und Parodontitis	0 (0,0 %)	4 (2,4 %)	4 (1,2 %)
Rauchen und Parodontitis	1 (0,6 %)	0 (0,0 %)	1 (0,3 %)
Endokarditis und Parodontitis	1 (0,6 %)	0 (0,0 %)	1 (0,3 %)
Bisphosphonate und Parodontitis	1 (0,6 %)	0 (0,0 %)	1 (0,3 %)
Endokarditis und Parodontitis	0 (0,0 %)	1 (0,6 %)	1 (0,3 %)
Gesamt	163(100%)	170 (100 %)	333 (100 %)

Tabelle 4: Anamnestische Verteilung getrennt nach Obturationstechnik.

7.2.3 Präendodontischer Zustand

Zur Beurteilung der Ausgangssituation wurde das Vorliegen einer röntgenologisch erkennbaren apikalen Parodontitis vor Behandlungsbeginn analysiert. Dabei zeigte sich bei Verwendung beider untersuchter Techniken eine überwiegende Häufung pathologischer Röntgenbefunde bereits zum Zeitpunkt der initialen Diagnostik.

In der Patientengruppe, die im weiteren Verlauf mittels lateraler Kondensation unter Verwendung des Sealers AH Plus behandelt wurde, war bei 57,1 % der Zähne eine apikale Parodontitis radiologisch nachweisbar. 42,9 % dieser Fälle wiesen zu diesem Zeitpunkt keine entsprechenden Befunde auf (Tabelle 5, Abbildung 8).

In der Vergleichsgruppe, bei der die Obturation mit der Einstifttechnik in Kombination mit BC Sealer erfolgte, lag die initiale Prävalenz einer röntgenologisch sichtbaren apikalen Parodontitis mit 62,9 % geringfügig höher. 37,1 % der Zähne waren röntgenologisch unauffällig (Tabelle 5, Abbildung 9).

Die vorliegenden Daten verdeutlichen, dass ein großer Anteil der behandelten Zähne bereits initial röntgenologisch sichtbare Zeichen einer periapikalen Entzündung aufwies.

Prozentualer Anteil der Zähne mit röntgenologisch sichtbarer apikaler Parodontitis zu Behandlungsbeginn

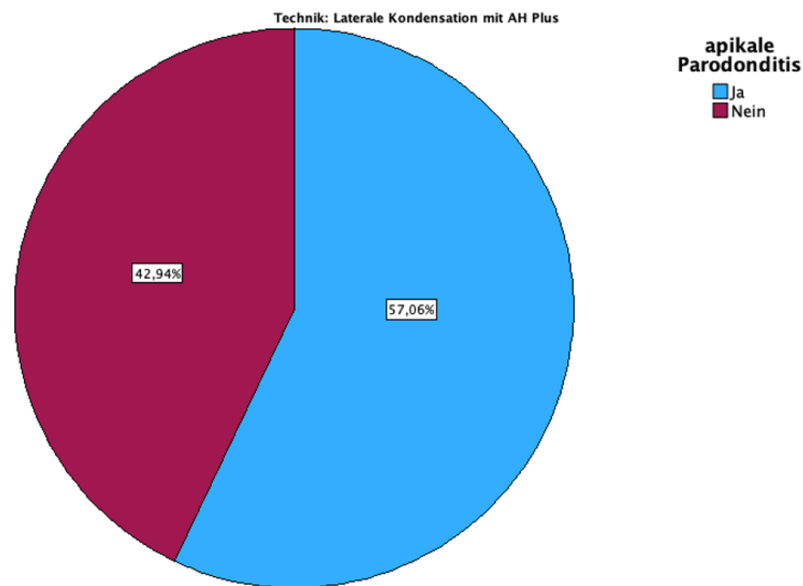


Abbildung 8: Kreisdiagramm zum Ausgangsbefund röntgenologisch sichtbarer apikaler Parodontitis bei der lateralen Kondensation in Prozent.

Prozentualer Anteil der Zähne mit röntgenologisch sichtbarer apikaler Parodontitis zu Behandlungsbeginn

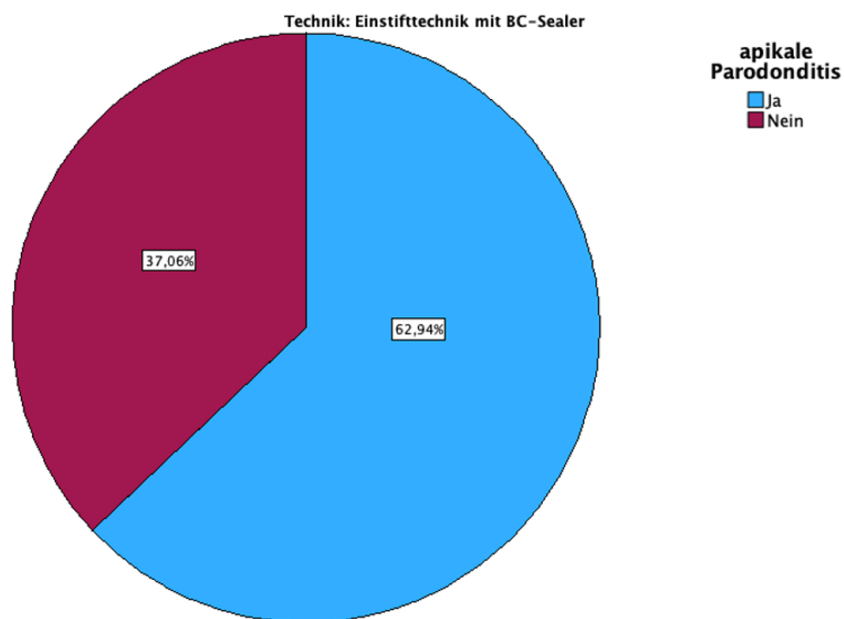


Abbildung 9: Kreisdiagramm zum Ausgangsbefund röntgenologisch sichtbarer apikaler Parodontitis bei der Einstifttechnik in Prozent.

Technik	Ja n (%)	Nein n (%)	Gesamt n (%)
Laterale Kondensation mit AH Plus	93 (57,1 %)	70 (42,9 %)	163 (100 %)
Einstifttechnik mit BC Sealer	107 (62,9 %)	63 (37,1 %)	170 (100 %)
Gesamt	200 (60,1 %)	133 (39,9 %)	333 (100 %)

Tabelle 5: Verteilung der röntgenologisch sichtbaren apikalen Parodontitis zum Zeitpunkt der Ausgangsaufnahme in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik.

7.2.4 Postendodontische Versorgung

Die Analyse der restaurativen Maßnahmen nach abgeschlossener Wurzelkanalbehandlung zeigt ein deutliches Überwiegen direkter Versorgungen. In der Einstifttechnik mit kalziumsilikatbasiertem Sealer erhielten 65,9 % (n = 112) der Zähne eine direkte Kompositfüllung. In der lateralen Kondensation mit AH Plus lag dieser Anteil bei 58,9 % (n = 96). Eine definitive Kronenversorgung wurde im Untersuchungszeitraum bei 27,1 % (n = 46) der Zähne mit Einstifttechnik und kalziumsilikatbasiertem Sealer und bei 30,1 % (n = 49) der Zähne mit lateraler Kondensation und AH Plus dokumentiert. Fehlende Angaben lagen in beiden Gruppen mit 7,1 % (n = 12) bei der Einstifttechnik gegenüber 11,0 % (n = 18) bei der lateralen Kondensation vor (Tabelle 6, Abbildung 10).

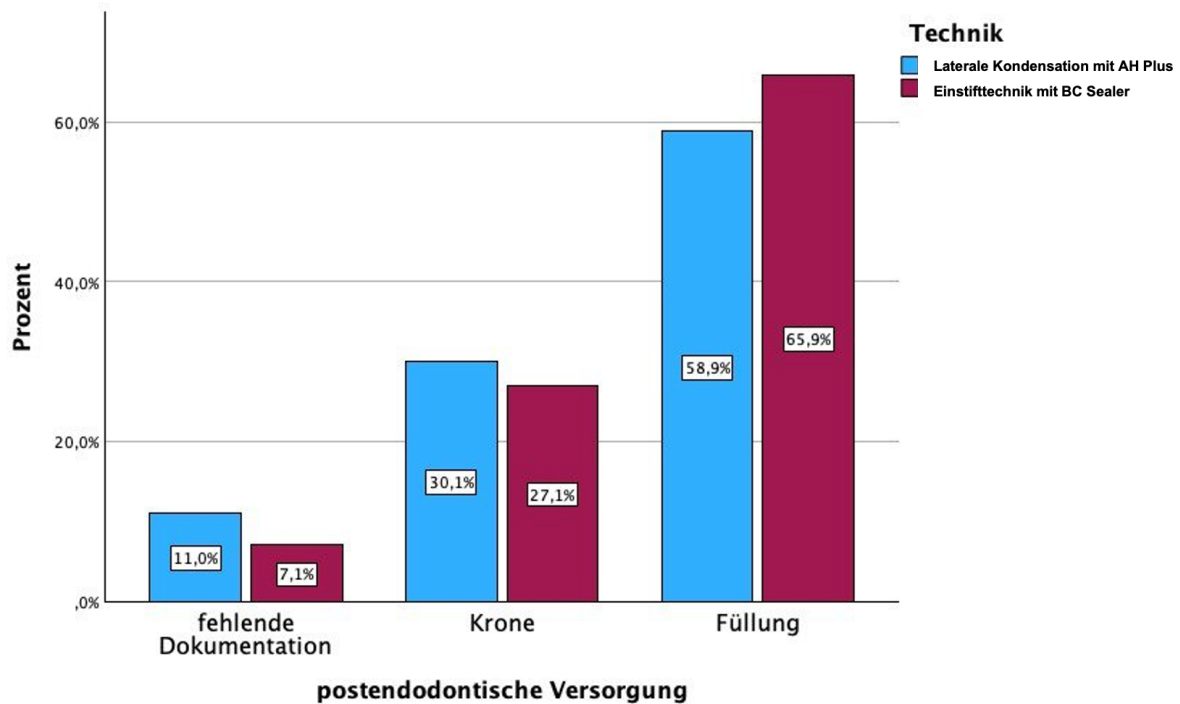


Abbildung 10: Balkendiagramm zur postendodontischen Versorgung in Abhängigkeit von der verwendeten Fülltechnik in Prozent. X-Achse: postendodontische Versorgung, Y-Achse: Anteil der Fälle je Technik in Prozent. (n = 333).

Versorgung	Laterale Kondensation mit AH Plus n (%)	Einstifttechnik mit BC Sealer n (%)	Gesamt n (%)
Fehlende Dokumentation	18 (11,0 %)	12 (7,1 %)	30 (9,0 %)
Krone	49 (30,1 %)	46 (27,1 %)	95 (28,5 %)
Füllung	96 (58,9 %)	112 (65,9 %)	208 (62,5 %)
Gesamt	163 (100 %)	170 (100 %)	333 (100 %)

Tabelle 6: Darstellung der postendodontischen Versorgung (Krone, Füllung, fehlende Dokumentation) in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik.

7.3 Radiologische Befunde nach der Wurzelkanalfüllung

7.3.1 Länge der Wurzelkanalfüllung

Die Längenverteilung der Wurzelkanalfüllungen wurde in vier Kategorien differenziert nach verwendeter Obturationstechnik erfasst. Zwischen den beiden Techniken zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied in der Verteilung der Füllungslängen (Chi-Quadrat-Test: $p = 0,003$).

Die Einstifttechnik mit BC Sealer wies mit 21,2 % im Vergleich zur lateralen Kondensation mit 9,8 % einen deutlich höheren Anteil an überpressten Wurzelkanalfüllungen (apikaler Puff) auf. Demgegenüber traten Wurzelkanalfüllungen, die mehr als 2 mm vor dem radiologischen Apex endeten, bei der lateralen Kondensation häufiger auf (27,0 % vs. 16,5 %).

Eine Füllungslänge bis zum radiologischen Apex wurde bei der lateralen Kondensation am häufigsten beobachtet (36,2 %), während dieser Anteil bei der Einstifttechnik 28,2 % betrug. Apexnahe Füllungen (≤ 2 mm vor dem Apex) zeigten sich hingegen häufiger bei der Einstifttechnik (34,1 %) als bei der lateralen Kondensation (27,0 %).

Insgesamt ergibt sich somit ein unterschiedliches Verteilungsmuster zwischen den beiden Techniken: Während die Einstifttechnik mit BC Sealer seltener zu kurze Füllungen aufweist, tritt ein höherer Anteil an Überfüllungen auf. Die laterale Kondensation zeigt hingegen häufiger unterextendierte Füllungen, jedoch seltener apikale Überpressungen. Insgesamt zeigte sich somit ein statistisch signifikanter Unterschied in der Verteilung der Füllungslängen zwischen beiden Techniken. Dieser Unterschied weist jedoch nicht eindeutig auf eine Überlegenheit einer Technik hin, da beide Verfahren unterschiedliche Verteilungsmuster mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen zeigen (Tabelle 7).

Ergänzend wurde das Auftreten von Sealer-Extrusionen (apikaler Puff) separat analysiert. Dabei zeigte sich, dass diese bei Anwendung der Einstifttechnik signifikant häufiger auftraten als bei der lateralen Kondensation ($p = 0,004$) (Tabelle 8).

Zusätzlich wurde der Einfluss des Ausbildungsstands auf die Füllungslängenverteilung untersucht. Die technikunabhängige Auswertung über das Gesamtkollektiv ergab einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Ausbildungsstand und Füllungslängenverteilung ($\chi^2(6) = 13,676$; $p = 0,033$; Cramér-V = 0,143).

Bei technikspezifischer Betrachtung zeigte sich dieser Zusammenhang ausschließlich für die laterale Kondensation mit AH Plus ($\chi^2(6) = 14,817$; $p = 0,022$; Cramér-V = 0,213) (Tabelle 9). Behandler zu Beginn der klinischen Ausbildung wiesen hier den höchsten Anteil an Füllungen am radiologischen Apex auf (42,6 %), während apexnahe Füllungen (≤ 2 mm vor Apex) bei allen drei Gruppen ähnlich verteilt waren (27,8 %; 29,6 %; 23,6 %). Zu kurze Füllungen traten bei fortgeschrittenen Studierenden am häufigsten auf (31,5 %), und der Anteil apikaler Extrusionen stieg mit zunehmendem Ausbildungsstand deutlich an (1,9 %; 5,6 %; 21,8 %).

Für die Einstifttechnik mit BC Sealer war kein signifikanter Zusammenhang nachweisbar ($\chi^2(6) = 6,985$; $p = 0,322$; Cramér-V = 0,143) (Tabelle 9). Apexnahe Füllungen wurden bei fortgeschrittenen Studierenden am häufigsten erzielt (36,7 %), zu kurze Füllungen ebenfalls bei dieser Gruppe (21,7 %). Füllungen am radiologischen Apex waren bei Anfängern am häufigsten (33,9 %). Der Anteil apikaler Extrusionen stieg analog zu AH Plus mit zunehmendem Ausbildungsstand an (15,3 %; 23,3 %; 25,5 %) (Tabelle 8, Abbildung 11).

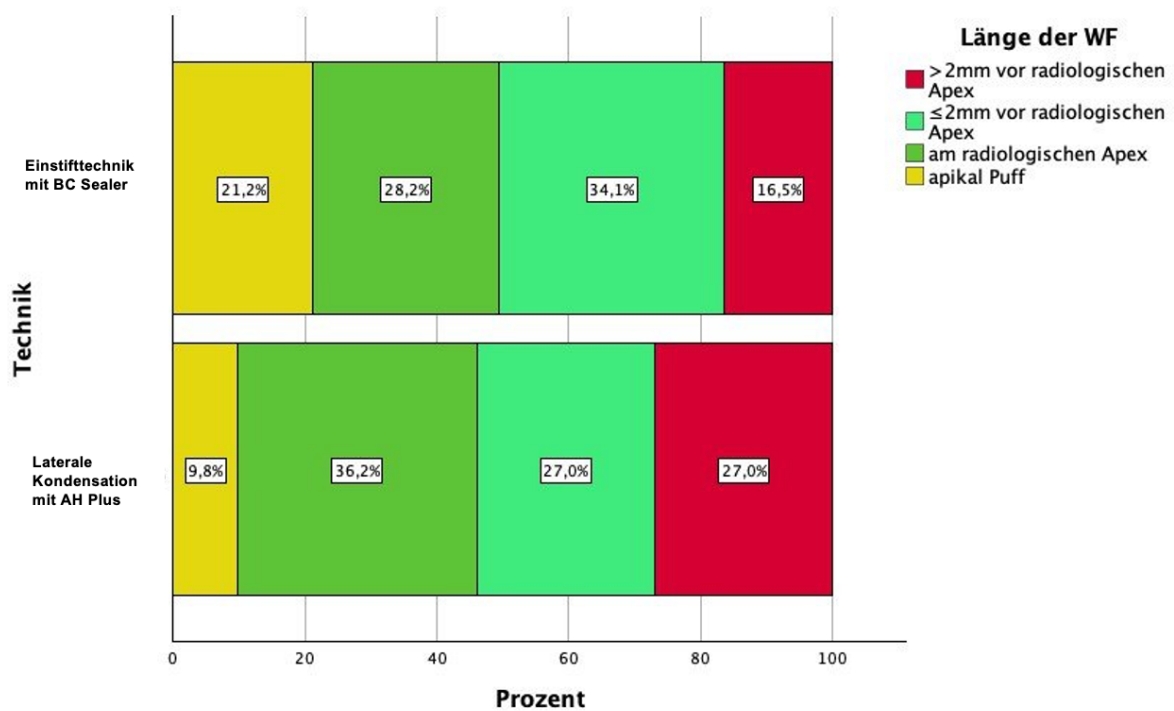


Abbildung 11: Balkendiagramm zur Verteilung der Fülllängen in Prozent, differenziert nach verwendeter Wurzelkanalfülltechnik.

Technik	>2 mm vor rad. ^a Apex n (%)	≤2 mm vor rad. Apex n (%)	am rad. Apex n (%)	apikal Puff n (%)	Gesamt n (%)	χ^2 (df)	p-Wert	Cramer-V
Laterale Kondensation mit AH Plus n (%)	44 (27,0%)	44 (27,0%)	59 (36,2 %)	16 (9,8%)	163 (100%)			
Einstifttechnik mit BC Sealer n (%)	28 (16,5%)	58 (34,1%)	48 (28,2%)	36 (21,2%)	170 (100%)			
Gesamt	72	102	107	52	333	14,159 (3)	0,003*	0,206

Tabelle 7: Kreuztabelle zur Länge der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test. ($p < 0,05$ statistisch signifikant, ^arad. = radiologisch).*

Technik	Apikaler Puff n (%)	Kein apikaler Puff n (%)	Gesamt n (%)	χ^2 (df)	p-Wert	Cramér-V
Laterale Kondensation mit AH Plus n (%)	16 (9,8 %)	147 (90,2 %)	163 (100 %)			
Einstifttechnik mit BC Sealer n (%)	36 (21,2 %)	134 (78,8 %)	170 (100 %)			
Gesamt	52 (15,6 %)	281 (84,4 %)	333 (100 %)	8,150 (1)	0,004*	0,156

Tabelle 8: Kreuztabelle zum Auftreten apikaler Extrusionen (apikaler Puff) in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test. ($p < 0,05$ statistisch signifikant).*

Behandlergruppe	Technik	>2mm vor rad. ^a Apex n (%)	≤2mm vor rad. Apex n (%)	am rad. Apex n (%)	apikal Puff n (%)	Gesamt n (%)	χ^2 (df)	p-Wert	Cramer- V
Start klinische Ausbildung	AH Plus	15 (27,8 %)	15 (27,8 %)	23 (42,6%)	1 (1,9 %)	54 (100 %)			
	BC Sealer	9 (15,3 %)	21 (35,6 %)	20 (33,9 %)	9 (15,3%)	59 (100 %)			
Fortgeschrittene Ausbildung	AH Plus	17 (31,5 %)	16 (29,6 %)	18 (33,3 %)	3 (5,6 %)	54 (100 %)			
	BC Sealer	13 (21,7 %)	22 (36,7 %)	11 (18,3 %)	14 (23,3 %)	60 (100 %)			
Approbierte Behandler	AH Plus	12 (21,8 %)	13 (23,6 %)	18 (32,7 %)	12 (21,8 %)	55 (100 %)			
	BC Sealer	6 (1,8 %)	15 (29,4 %)	17 (33,3 %)	13 (25,5 %)	51 (100 %)			
Vergleich Behandlergruppen innerhalb AH Plus							$\chi^2(6) = 14,817$	0,022*	0,213
Vergleich Behandlergruppen innerhalb BC Sealer							$\chi^2(6) = 6,985$	0,322	0,143

Tabelle 9: Länge der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler, getrennt nach Obturationstechnik (mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test.

($p < 0,05$ statistisch signifikant, ^arad. = radiologisch).*

7.3.2 Homogenität der Wurzelkanalfüllung

Die Homogenität der Obturation wurde anhand der postoperativen Röntgenkontrollaufnahmen dichotom in die Kategorien homogen und inhomogen eingeteilt. Insgesamt wiesen 291 der 333 ausgewerteten Wurzelkanalfüllungen (87,4 %) eine homogene Struktur auf, während 42 Füllungen (12,6 %) als inhomogen klassifiziert wurden.

Bei Betrachtung der einzelnen Obturationstechniken zeigte sich, dass bei Anwendung der Einstifttechnik mit BC Sealer 151 von 170 Füllungen (88,8 %) als homogen bewertet wurden, gegenüber 140 von 163 Füllungen (85,9 %) in der Gruppe der lateralen Kondensation mit AH Plus. Der Unterschied zwischen den beiden Obturationstechniken war statistisch nicht signifikant ($\chi^2(1) = 0,650$; $p = 0,420$), und die Effektstärke nach Phi von 0,044 weist auf einen vernachlässigbar schwachen Zusammenhang hin (Tabelle 10, Abbildung 12).

Ergänzend wurde technikspezifisch geprüft, ob der Ausbildungsstand innerhalb der jeweiligen Technikgruppe einen signifikanten Einfluss auf die Homogenität hatte. Für die laterale Kondensation mit AH Plus zeigte sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang ($\chi^2(2) = 0,348$; $p = 0,840$; Cramér-V = 0,046). Der Anteil homogener Füllungen war bei Behandlern zu Beginn der klinischen Ausbildung mit 87,0 % (47/54) und bei fortgeschrittenen Studierenden ebenfalls mit 87,0 % (47/54) vergleichbar, während approbierte Behandler mit 83,6 % (46/55) einen geringfügig niedrigeren Anteil aufwiesen. Für die Einstifttechnik mit BC Sealer war ebenfalls kein signifikanter Zusammenhang nachweisbar ($\chi^2(2) = 3,423$; $p = 0,181$; Cramér-V = 0,142). Hier erzielten Behandler zu Beginn der klinischen Ausbildung mit 94,9 % (56/59) den höchsten Anteil homogener Füllungen, gefolgt von approbierten Behandlern mit 86,3 % (44/51) und fortgeschrittenen Studierenden mit 85,0 % (51/60). Damit ließ sich in beiden Technikgruppen kein signifikanter Einfluss des Ausbildungsstands auf die Homogenität nachweisen (Tabelle 11).

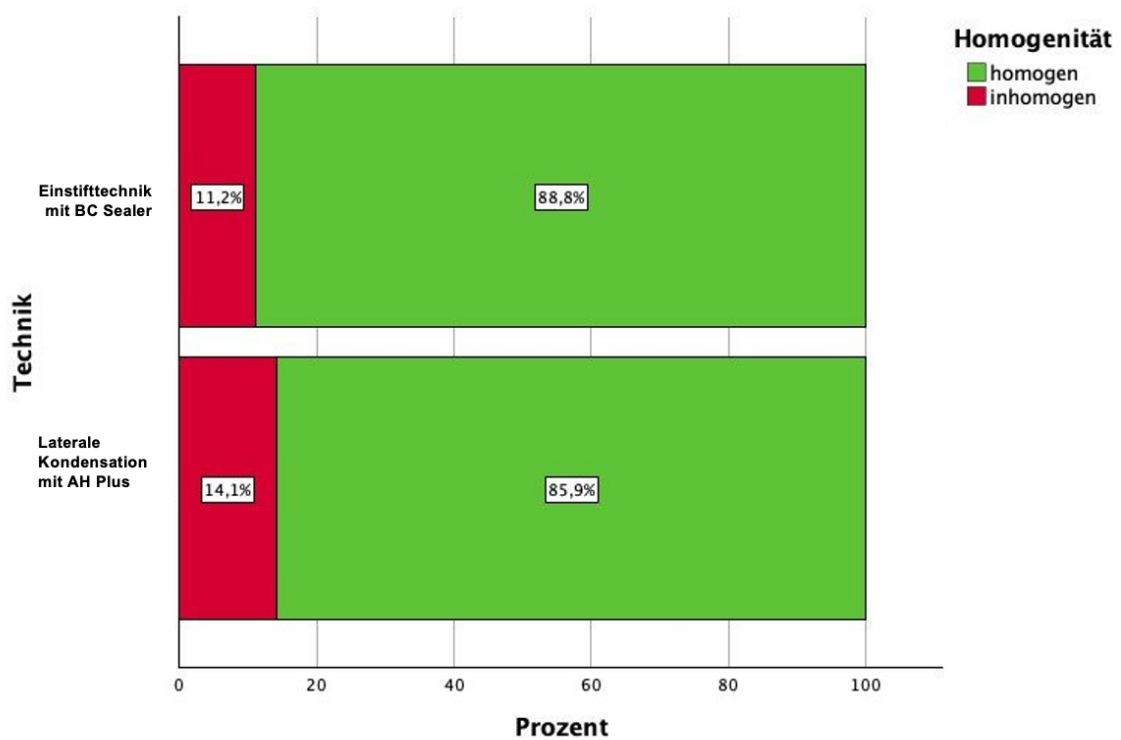


Abbildung 12: Balkendiagramm zum Vergleich der Füllungshomogenität zwischen AH Plus und BC-Sealer in Prozent. AH Plus (n = 163), BC Sealer (n = 170).

Technik	homogen n (%)	inhomogen n (%)	Gesamt n	χ^2 (df)	p-Wert	Cramér V
Laterale Kondensation mit AH Plus	140 (85,9 %)	23 (14,1 %)	163			
Einstifttechnik mit BC Sealer	151 (88,8 %)	19 (11,2 %)	170			
Gesamt	291 (87,4 %)	42 (12,6 %)	333	0,650 (1)	0,420	0,044

Tabelle 10: Kreuztabelle zur Homogenität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test.

Behandlergruppe	Technik	homogen n (%)	inhomogen n (%)	Gesamt n (%)	χ^2 (df)	p-Wert	Cramér-V
Start klinische Ausbildung	AH Plus	47 (87,0 %)	7 (13,0 %)	54 (100 %)			
	BC Sealer	56 (94,9 %)	3 (5,1 %)	59 (100 %)			
Fortgeschrittene Ausbildung	AH Plus	47 (87,0 %)	7 (13,0 %)	54 (100 %)			
	BC Sealer	51 (85,0 %)	9 (15,0 %)	60 (100 %)			
Approbierte Behandler	AH Plus	46 (83,6 %)	9 (16,4 %)	55 (100 %)			
	BC Sealer	44 (86,3 %)	7 (13,7 %)	51 (100 %)			
Vergleich Behandlergruppen innerhalb AH Plus					0,348 (2)	0,840	0,046
Vergleich Behandlergruppen innerhalb BC Sealer					3,423 (2)	0,181	0,142

Tabelle 11: Kreuztabelle zur Homogenität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler mit zugehörigem Chi-Quadrat-Test.

7.3.3 Gesamtqualität

Zur Vorbereitung der nachfolgenden Auswertung der Gesamtqualität werden in den Kreuztabellen (Tabelle 12: Laterale Kondensation; Tabelle 13: Einstifttechnik) die beiden zugrunde liegenden Qualitätsparameter Wurzelkanalfüllungslänge und Homogenität gemeinsam dargestellt. Wie in Kapitel *Material und Methoden* definiert, bildet die Kombination aus beiden Parametern die Bewertung einer idealen und nicht idealen Wurzelkanalfüllung. Deskriptiv zeigen beide Techniken über alle Längenkategorien hinweg überwiegend homogene Wurzelkanalfüllungen. Die höchsten absoluten Fallzahlen homogener Füllungen finden sich bei Füllungen am radiologischen Apex sowie ≤ 2 mm vor dem Apex. Auch bei überpressten Füllungen (apikaler Puff) überwiegen homogene Befunde. Insgesamt zeigen sich in der rein deskriptiven Betrachtung keine ausgeprägten Unterschiede zwischen den beiden Techniken hinsichtlich der Verteilung homogener und inhomogener Füllungen. Die Tabellen dienen damit als Grundlage für die anschließende zusammenfassende Bewertung der Gesamtqualität.

Länge der WF	Kategorie	homogen	inhomogen	Gesamt
> 2 mm vor radiologischem Apex	Anzahl	36	8	44
	%	22,1%	4,9%	27,0%
≤ 2 mm vor radiologischem Apex	Anzahl	36	8	44
	%	22,1%	4,9%	27,0%
am radiologischen Apex	Anzahl	54	5	59
	%	33,1%	3,0%	36,1%
apikaler Puff	Anzahl	14	2	16
	%	8,6%	1,2%	9,9%
Gesamt	Anzahl	140	23	163
	%	85,9%	14,1%	100,0%

Tabelle 12: Kreuztabelle zur Verteilung der Füllungshomogenität in Abhängigkeit von der Fülllänge bei Verwendung der lateralen Kondensation mit AH Plus.

Länge der WF	Kategorie	homogen	inhomogen	Gesamt
> 2 mm vor radiologischem Apex	Anzahl	25	3	28
	%	14,7%	1,8%	16,5%
≤ 2 mm vor radiologischem Apex	Anzahl	48	10	58
	%	28,2%	5,8%	34,0%
am radiologischen Apex	Anzahl	45	3	48
	%	26,5%	1,8%	28,3%
apikaler Puff	Anzahl	33	3	36
	%	19,4%	1,8%	21,2%
Gesamt	Anzahl	151	19	170
	%	88,8%	11,2%	100,0%

Tabelle 13: Kreuztabelle zur Verteilung der Füllungshomogenität in Abhängigkeit von der Fülllänge bei Verwendung der Einstifttechnik mit BC Sealer.

7.3.4 PAI im Kontrollbild 1 nach WF

Die Verteilung der PAI-Codes im ersten postoperativen Kontrollbild nach Wurzelkanalfüllung wurde dichotom ausgewertet. Hierbei wurden die Codes 1–2 als klinisch unauffällige Befunde und die Codes 3–5 als pathologische Befunde gewertet.

In beiden Techniken überwogen höhere PAI-Werte (Code 3–5). Bei Anwendung der lateralen Kondensation mit AH Plus lag deren Anteil bei 60,7 %, während für die Einstifttechnik mit BC Sealer ein Anteil von 68,2 % beobachtet wurde. Entsprechend traten niedrigere PAI-Werte (Code 1–2) seltener auf (AH Plus: 39,3 %; BC Sealer: 31,8 %).

Ein statistisch signifikanter Unterschied in der Verteilung der PAI-Kategorien zwischen den verwendeten Obturationstechniken konnte nicht nachgewiesen werden ($p = 0,153$).

Die Effektstärke (Phi-Koeffizient = 0,078) weist auf einen sehr schwachen Zusammenhang hin (Tabelle 14, Abbildung 13).

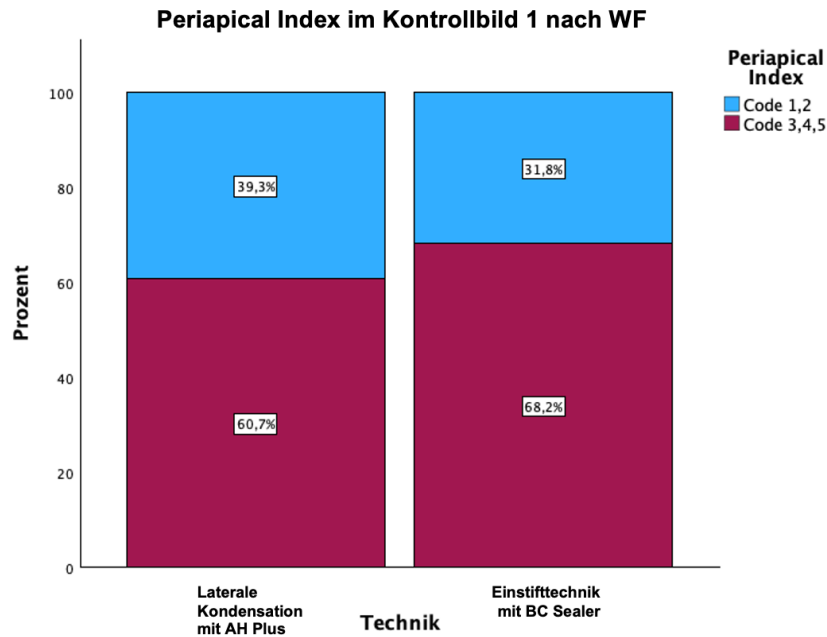


Abbildung 13: Prozentuale Verteilung der dichotomisierten PAI-Kategorien (Code 1–2 vs. Code 3–5) im ersten Kontrollbild nach Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik ($n = 333$).

Technik	PAI Code 1-2 n (%)	PAI Code 3-5 n (%)	Gesamt n	χ^2 (df)	p-Wert	Phi-Koeffizient
Laterale Kondensation mit AH Plus	64 (39,3 %)	99 (60,7 %)	163			
Einstifttechnik mit BC Sealer	54 (31,8 %)	116 (68,2 %)	170			
Gesamt	118 (35,4 %)	215 (64,6 %)	333	2,045 (1)	0,153	0,078

Tabelle 14: Kreuztabelle und Chi-Quadrat-Test zur Verteilung der dichotomisierten PAI-Kategorien (Code 1–2 vs. Code 3–5) im ersten Kontrollbild nach Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik ($n = 333$).

7.4 Verteilung postoperativer Komplikationen

Zur Beurteilung potenzieller therapieassoziierter Ereignisse wurde das Auftreten postoperativer Komplikationen getrennt nach Fülltechnik und Ausbildungsstand der Behandler bis 18 Monate nach WF analysiert. Berücksichtigt wurden sowohl akute Komplikationen (Schmerzen, Schwellungen) als auch spätere Behandlungsfolgen (Revisionen, Extraktionen, Wurzelspitzenresektionen).

Behandlungen mit lateraler Kondensation und dem Sealer AH Plus zeigten insgesamt ein hohes Maß an Behandlungsstabilität. Bei den approbierten Behandlern verliefen 87 % der Fälle komplikationsfrei. In der Gruppe der fortgeschrittenen Studierenden lag der Anteil bei 80 %, bei Studierenden zu Beginn der klinischen Ausbildung bei 78 %. Am häufigsten traten Extraktionen (13%) und postoperative Schmerzen (6%) auf. Einzelne Fälle von Revisionen, Frakturen und Schwellungen wurden ebenfalls dokumentiert, wobei sich hier keine systematische Häufung zeigte. Die Gesamtrate interventionserfordernder Ereignisse blieb in allen Behandlergruppen unterhalb der 15 %-Schwelle (Tabelle 15, Abbildung 14).

Bei Verwendung der Einstifttechnik bestätigte sich dieses Bild weitgehend. Die Mehrheit der Fälle verlief ebenfalls ohne klinische Auffälligkeiten. Der Anteil komplikationsfreier Verläufe lag bei approbierten Behandlern bei 82 %, bei Studierenden zum Start der klinischen Ausbildung bei 80 % und in der Gruppe der fortgeschrittenen Studierenden bei 70 %. Auffällig war in dieser Gruppe eine erhöhte Rate an Extraktionen (18 %). Schmerzen wurden in bis zu 10 % der Fälle gemeldet, während Revisionen und WSR selten auftraten (2%). Frakturen wurden ausschließlich in der Gruppe der Studierenden zum Start der klinischen Ausbildung gemacht. In der Gesamtheit zeigte sich über beide Techniken hinweg ein stabiler klinischer Verlauf mit überwiegend komplikationsfreien Ergebnissen. Der Vergleich zwischen lateraler Kondensation und Einstifttechnik verdeutlichte keine systematisch unterschiedlichen Risikoprofile, obwohl einzelne Komplikationstypen gruppenspezifisch variieren. Auffällig ist jedoch, dass approbierte Behandler in beiden Techniken prozentual die höchsten Anteile komplikationsfreier Verläufe aufwiesen (Tabelle 16, Abbildung 15).

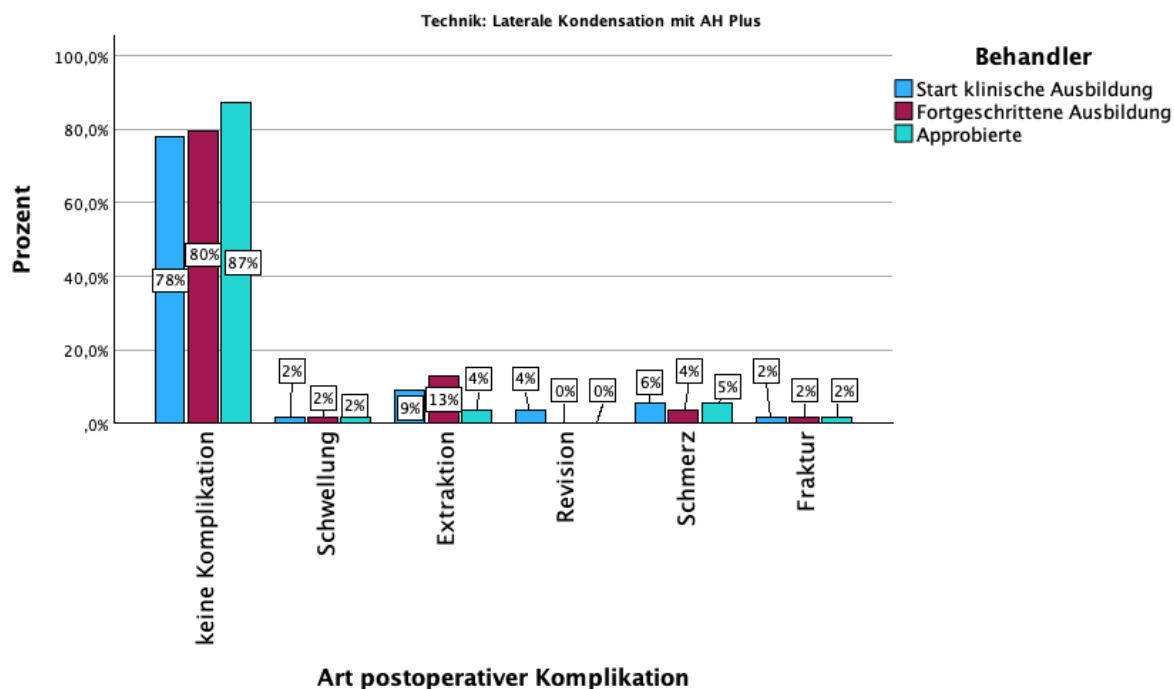


Abbildung 14: Balkendiagramm zur Häufigkeit postoperativer Komplikationen nach Anwendung von der lateralen Kondensation, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler in Prozent. X-Achse: postoperative Komplikation, Y-Achse: Anteil der Fälle in Prozent (n = 163).

Laterale Kondensation mit AH Plus

Behandler	keine Komplikation	Schwellung	Extraktion	Revision	Schmerz	WSR	Fraktur	Gesamt
Start klinische Ausbildung	42	1	5	2	3	0	1	54
Fortgeschrittene Ausbildung	43	1	7	0	2	0	1	54
Approbierte	48	1	2	0	3	0	1	55
Gesamt	133	3	14	2	8	0	3	163

Tabelle 15: Postoperative Komplikationen nach Wurzelkanalbehandlung (absolute Häufigkeiten), differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden und Art der Komplikation bei der lateralen Kondensation.

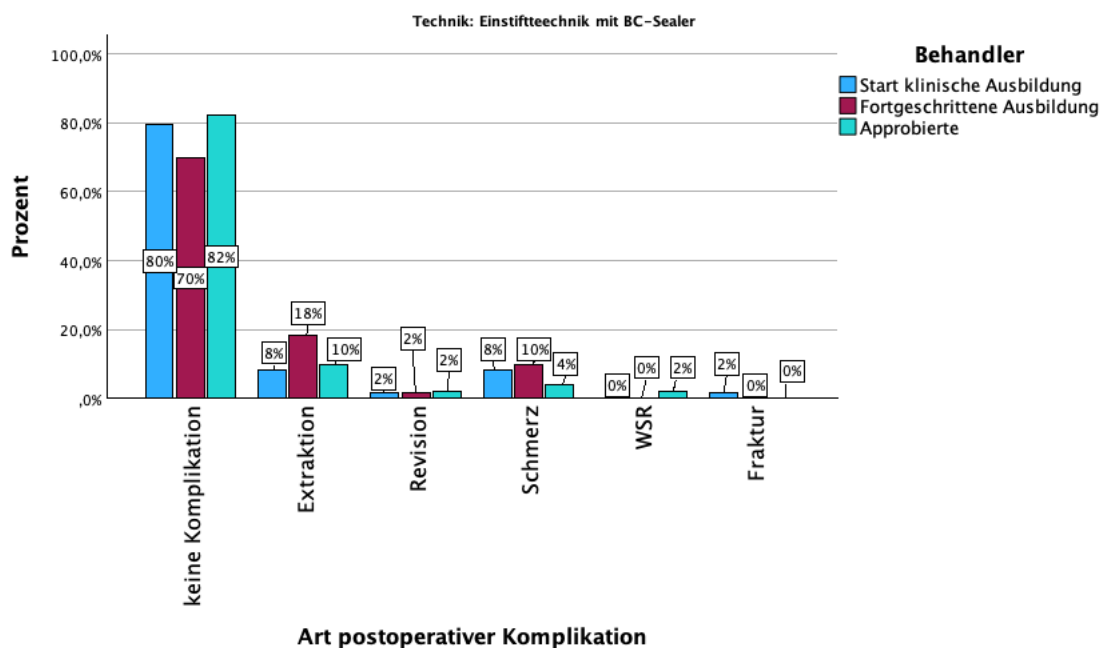


Abbildung 15: Balkendiagramm zur Art postoperativer Komplikationen nach Anwendung der Einstifttechnik, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler in Prozent. X-Achse: postoperative Komplikation, Y-Achse: Anteil der Fälle in Prozent (n = 170).

Einstifttechnik mit BC Sealer

Behandler	keine Komplikation	Schwellung	Extraktion	Revision	Schmerz	WSR	Fraktur	Gesamt
Start klinische Ausbildung	47	0	5	1	5	0	1	59
Fortgeschrittene Ausbildung	42	0	11	1	6	0	0	60
Approbierte	42	0	5	1	2	1	0	51
Gesamt	131	0	21	3	13	1	1	170

Tabelle 16: Postoperative Komplikationen nach Wurzelkanalbehandlung (absolute Häufigkeiten), differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden und Art der Komplikation bei der Einstifttechnik.

7.4.1 Zeitpunkt aufgetretener postoperativer Komplikation

Zur differenzierten Analyse des zeitlichen Auftretens postoperativer Komplikationen wurden diese in vier postoperative Intervalle unterteilt: ≤ 1 Woche, >1 Woche bis ≤ 3 Monate, >3 Monate bis ≤ 6 Monate sowie >6 Monate bis ≤ 18 Monate. Die Auswertung erfolgte getrennt nach Fülltechnik und Qualifikationsstufe der Behandler: Start der klinischen Ausbildung, fortgeschrittene klinische Ausbildung und approbierte Zahnärzte. Die Komplikationen umfassten das Auftreten von Schmerzen, Schwellungen, Revisionen, Extraktionen, Wurzelspitzenresektionen.

Bei Verwendung der lateralen Kondensation war ein ansteigender Trend im Auftreten von Komplikationen im Langzeitverlauf erkennbar. Das Intervall >6 Monate bis ≤ 18 Monate zeigte dabei in allen Behandlergruppen die höchsten Inzidenzen. Dies betraf Behandler zu Beginn der klinischen Ausbildung mit 13,0 %, Studierende im fortgeschrittenen klinischen Studienabschnitt mit 9,3 % und Approbierte mit 7,3 %. Ein erster Inzidenzanstieg wurde für Studierende im fortgeschrittenen klinischen Studienabschnitt bereits im Zeitfenster >1 Woche bis ≤ 3 Monate beobachtet (7,4 %), während die unmittelbare postoperative Phase (≤ 1 Woche) mit einer sehr niedrigen Rate belastet war (maximal 1,9 %) (Tabelle 19, Abbildung 16).

Für die Einstifttechnik wurde ein ausgeprägteres Spätkomplikationsprofil beobachtet. Insbesondere Studierende im fortgeschrittenen klinischen Studienabschnitt zeigten im Zeitraum >6 Monate bis ≤ 18 Monate mit 18,6 % die höchste Einzelinzidenz auf, gefolgt von Studenten zu Beginn der klinischen Ausbildung (13,6 %) und Approbierten (7,8 %).

Zusätzlich zeigte sich bei Behandlern im fortgeschrittenen Studienabschnitt ein erhöhter Frühkomplikationsanteil innerhalb der ersten postoperativen Woche (6,7 %), wohingegen die mittleren Intervalle in allen Gruppen vergleichsweise niedrige Raten aufwiesen (0 – 6,8 %) (Tabelle 20, Abbildung 17).

Um mögliche Unterschiede zwischen den eingesetzten Obturationstechniken hinsichtlich postoperativer Komplikationen zu untersuchen, wurde ein Chi-Quadrat-Test herangezogen. Es ergab sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der lateralen Kondensation mit AH Plus und der Einstifttechnik mit BC Sealer (Pearson- $\chi^2(1) = 1,042$; $p = 0,307$; Cramer-V = 0,056) (Tabelle 17).

Auch zwischen den Ausbildungsgruppen ließ sich hinsichtlich des Auftretens postoperativer Komplikationen kein statistisch signifikanter Unterschied feststellen (Pearson- $\chi^2(2) = 3,606$; $p = 0,165$; Cramer-V = 0,104) (Tabelle 18).

Insgesamt weisen die Daten auf ein überwiegend verzögertes Auftreten postoperativer Komplikationen hin, wobei die Langzeitintervalle (>6 Monate) in beiden Technikgruppen die höchsten Komplikationsraten zeigen.

Die Einstifttechnik war dabei vor allem in der Gruppe klinisch fortgeschrittener Studierender mit einer erhöhten Spätkomplikationsrate assoziiert. Frühkomplikationen traten vergleichsweise selten auf, jedoch mit auffälligen Einzelwerten bei der Einstifttechnik mit BC Sealer ebenfalls in der Gruppe der klinisch fortgeschrittenen Studierenden.

Technik	Keine Komplikation n (%)	Komplikation n (%)	Gesamt n	χ^2 (df)	p-Wert	Cramer-V
Laterale Kondensation mit AH Plus	133 (81,6 %)	30 (18,4 %)	163			
Einstifttechnik mit BC Sealer	131 (77,1 %)	39 (22,9 %)	170			
Gesamt	264 (79,3 %)	69 (20,7 %)	333	1,042 (1)	0,307	0,056

Tabelle 17: Kreuztabelle und Chi-Quadrat-Test zur Verteilung postoperativer Komplikationen in Abhängigkeit von der verwendeten Obturationstechnik.

Behandler	Keine Komplikation n (%)	Komplikation n (%)	Gesamt n	χ^2 (df)	p-Wert	Cramer-V
Start klinische Ausbildung	89 (78,8 %)	24 (21,2 %)	113			
Fortgeschrittene Ausbildung	85 (74,6 %)	29 (25,4 %)	114			
Approbierte	90 (84,9 %)	16 (15,1 %)	106			
Gesamt	264 (79,3 %)	69 (20,7 %)	333	3,606 (2)	0,165	0,104

Tabelle 18: Kreuztabelle und Chi-Quadrat-Test zur Verteilung postoperativer Komplikationen in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler, technikunabhängig.

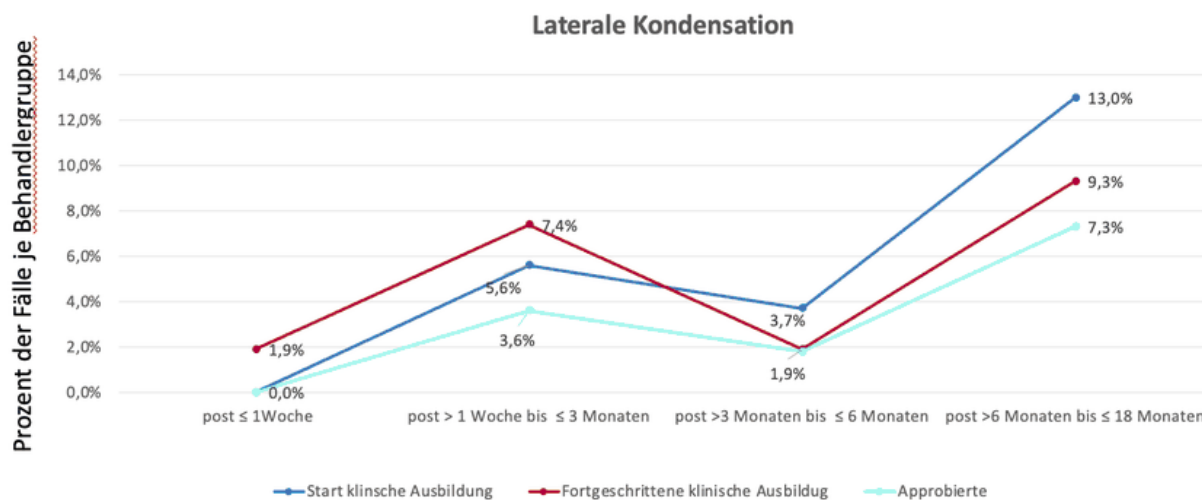


Abbildung 16: Zeitlicher Verlauf postoperativer Komplikationen in Prozent, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden. Dargestellt sind die Anteile der Fälle je Behandlergruppe über definierte Nachbeobachtungsintervalle. Technik Laterale Kondensation (n = 163).

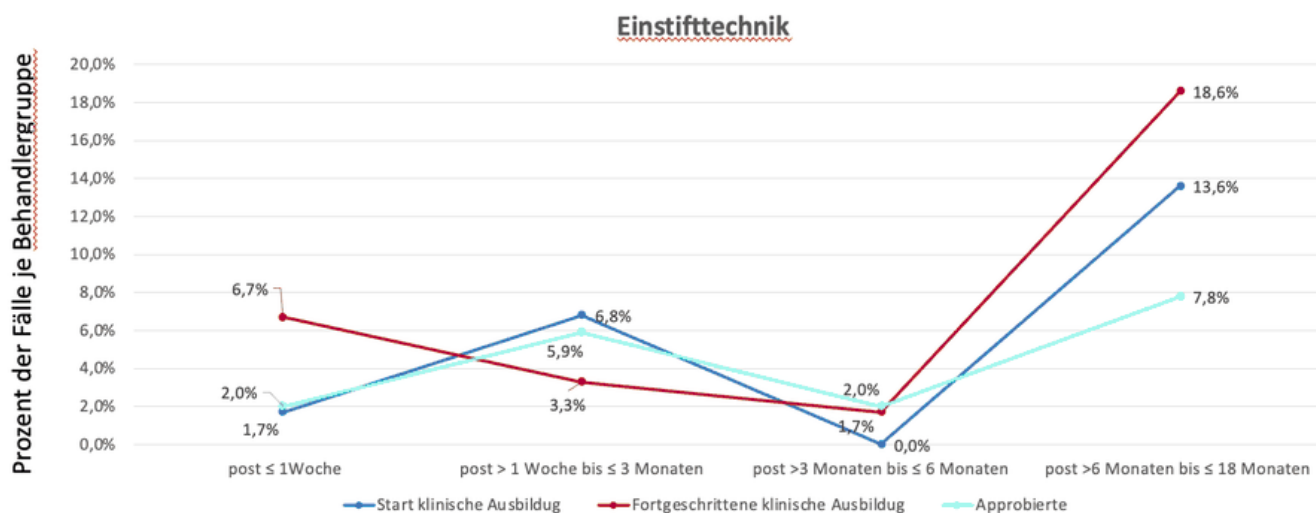


Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf postoperativer Komplikationen in Prozent, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden. Dargestellt sind die Anteile der Fälle je Behandlergruppe über definierte Nachbeobachtungsintervalle. Technik: Einstifttechnik, (n = 170).

Laterale Kondensation mit AH Plus

Behandler	keine Komplikation	post ≤ 1 Woche	post > 1 Woche bis ≤ 3 Monaten	post > 3 Monaten bis ≤ 6 Monaten	post > 6 Monaten bis ≤ 18 Monaten	Gesamt
Start klinische Ausbildung	42	0	3	2	7	54
Fortgeschrittene Ausbildung	43	1	4	1	5	54
Approbierte	48	0	2	1	4	55
Gesamt	133	1	9	4	16	163

Tabelle 19: Zeitpunkt des Auftretens postoperativer Komplikationen nach Wurzelkanalfüllung mit lateraler Kondensation mit AH Plus, absolute Häufigkeiten.

Einstifttechnik mit BC Sealer

Behandler	keine Komplikation	Post ≤ 1 Woche	post > 1 Woche bis ≤ 3 Monaten	post > 3 Monaten bis ≤ 6 Monaten	post > 6 Monaten bis ≤ 18 Monaten	Gesamt
Start klinische Ausbildung	46	1	4	0	8	59
Fortgeschrittene Ausbildung	42	4	2	1	11	60
Approbierte	42	1	3	1	4	51
Gesamt	130	6	9	2	23	170

Tabelle 20: Zeitpunkt des Auftretens postoperativer Komplikationen nach Wurzelkanalfüllung mit Einstifttechnik mit BC Sealer, absolute Häufigkeiten.

7.4.2 Behandlungssitzungen

Zur Erfassung des therapeutischen Aufwands wurde die Anzahl der Behandlungssitzungen nach verwendeter Obturationstechnik und Qualifikationsniveau der Behandler analysiert.

Bei der lateralen Kondensation mit AH Plus ergab sich eine durchschnittliche Sitzungszahl von 3,69 (SD = 2,00) bei einem Median von 3,0. Die Werte reichten von einer bis zu 17 Sitzungen, wobei die Verteilung rechtsschief war und somit auf einzelne verlängerte Behandlungsverläufe hinwies. Der Schwerpunkt lag in allen Behandlergruppen bei drei bis fünf Sitzungen. Besonders bei den Approbierten trat die Mehrzahl der Fälle mit zwei Sitzungen auf (37 %), während bei den fortgeschrittenen Studierenden vier Sitzungen am häufigsten dokumentiert wurden (Tabelle 21, 23). Für die Einstifttechnik mit BC Sealer lag der Mittelwert bei 4,20 Sitzungen (SD = 2,04) und der Median bei 4,0. Die Spannweite betrug eine bis zwölf Sitzungen. Auch hier zeigte sich eine rechtsschiefe Verteilung mit einem Häufigkeitsschwerpunkt bei drei bis vier Sitzungen. Zwischen den Behandlergruppen bestanden nur geringe Unterschiede. Insgesamt zeigte sich damit eine leicht höhere durchschnittliche Sitzungszahl (Tabelle 21, 22).

Technik	n	Mittel-wert	Median	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Laterale Kondensation mit AH Plus	163	3,69	3,0	2,00	1	17
Einstifttechnik mit BC Sealer	170	4,20	4,0	2,04	1	12

Tabelle 21: Zusammenfassende Tabelle zur Anzahl der Behandlungssitzungen in Abhängigkeit von der verwendeten Wurzelkanalfülltechnik (Laterale Kondensation n = 163, Einstifttechnik n = 170).

Die Prüfung der Normalverteilung mittels Shapiro-Wilk-Test ergab für beide Techniken eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung ($p < 0,001$, siehe Tabelle 33,34). Daher wurde für den Gruppenvergleich ein nichtparametrischer Mann-Whitney-U-Test verwendet. Der Mann-Whitney-U-Test zeigte einen signifikanten Unterschied in der Anzahl der Behandlungssitzungen zwischen beiden Techniken ($U = 16001,5$; $p = 0,013$), wobei die Einstifttechnik mit einer signifikant höheren Anzahl an Behandlungssitzungen assoziiert war. Der Unterschied ist jedoch numerisch gering und daher von eingeschränkter klinischer Relevanz.

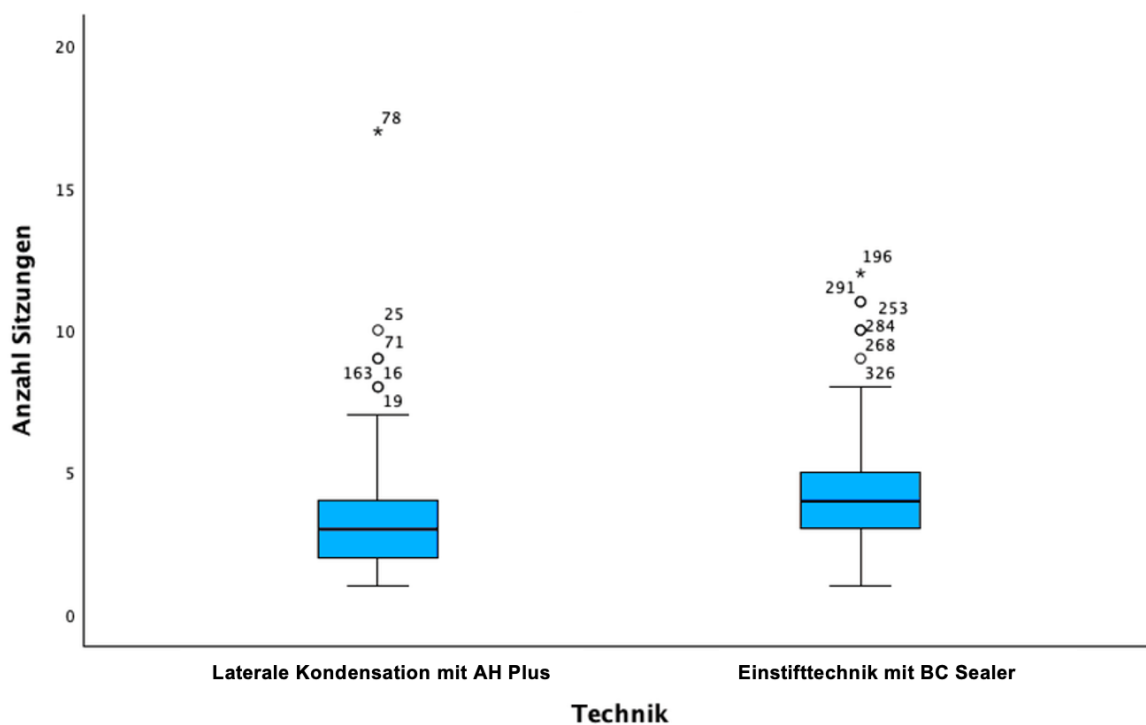


Abbildung 18: Boxplot zur Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen nach verwendeter Wurzelkanalfülltechnik. Dargestellt sind Median, Interquartilsbereich, Spannweite sowie Ausreißer für die laterale Kondensation mit AH Plus (n = 163) und die Einstifttechnik mit BC Sealer (n = 170).

Einstifttechnik mit BC Sealer

Behandler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Gesamt
Start klinische Ausbildung	1	7	21	16	2	8	2	1	0	0	0	1	59
Fortgeschrittene Ausbildung	1	5	12	14	12	6	2	6	0	2	0	0	60
Approbierte	3	12	11	12	2	7	0	1	1	0	2	0	51
Gesamt Einstifttechnik	5	24	44	42	16	21	4	8	1	2	2	1	170

Tabelle 22: Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen bei Anwendung der Einstifttechnik mit BC Sealer, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden. Dargestellt sind die absoluten Fallzahlen pro Sitzungsanzahl sowie die Gesamtverteilung.

Behandler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	17	Gesamt
Start klinische Ausbildung	1	9	14	15	6	4	2	1	1	1	0	54
Fortgeschrittene Ausbildung	3	7	10	15	9	6	2	0	1	0	1	54
Approbierte	6	20	14	11	1	1	1	1	0	0	0	55
Gesamt Laterale Kondensation	10	36	38	41	16	11	5	2	2	1	1	163

Tabelle 23: Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen bei Anwendung der lateralen Kondensation mit AH Plus, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden. Dargestellt sind absolute Fallzahlen pro Sitzungsanzahl sowie die Gesamtverteilung.

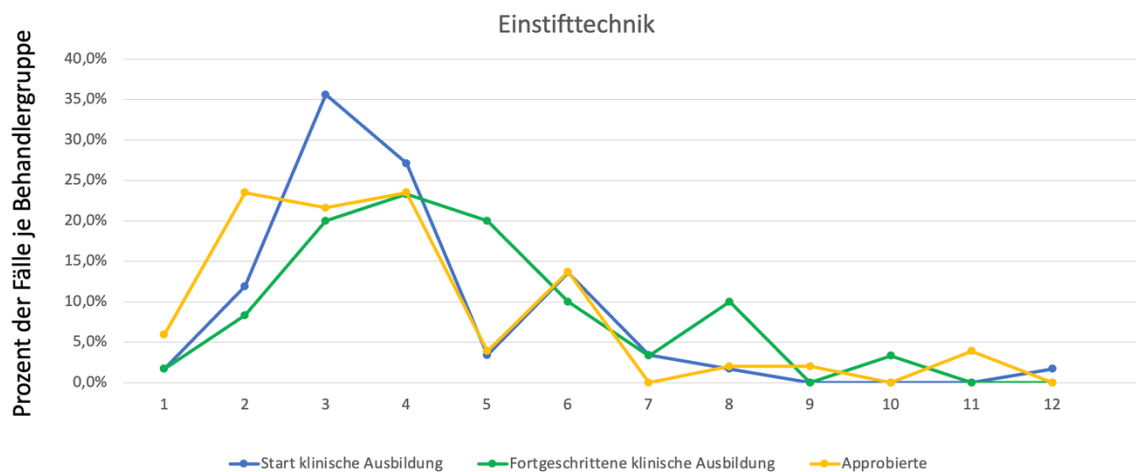


Abbildung 19: Prozentuale Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen bei Anwendung der Einstifttechnik, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden.

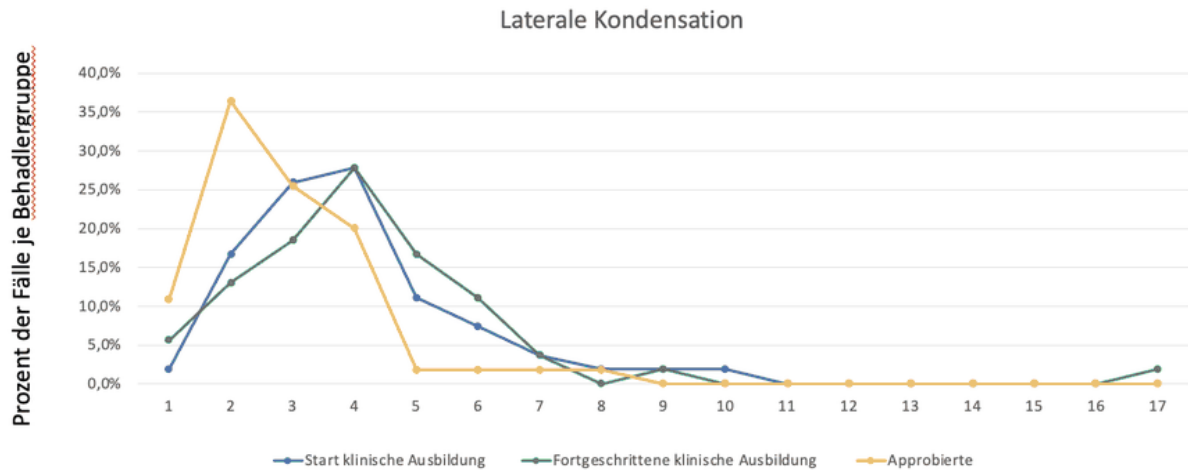


Abbildung 20: Prozentuale Verteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen bei Anwendung der lateralen Kondensation, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandelnden.

7.5 Einfluss der Fülltechnik auf das Auftreten postoperativer Komplikationen

Zur Hypothesenprüfung wurde die Nullhypothese (H_0) formuliert, dass die Verwendung der weniger techniksensitiven Einstifttechnik im Vergleich zur lateralen Kondensation bei unerfahrenen Behandlern keinen signifikanten Vorteil hinsichtlich des Auftretens postoperativer Komplikationen bis zu 18 Monaten nach erfolgter Wurzelkanalfüllung darstellt. Als primärer Endpunkt diente das dichotome Auftreten einer postoperativen Komplikation (Schmerzen, Schwellung, Revision, Wurzelspitzenresektion, Fraktur oder Extraktion).

Die Auswertung erfolgte getrennt nach Ausbildungsstufe (Beginn der klinischen Ausbildung, fortgeschrittene klinische Ausbildung, Approbierte), indem für jede Stufe 2×2-Kreuztabellen erstellt wurden, die die Häufigkeit „Komplikation: ja/nein“ nach Technik gegenüberstellen. Mittels Pearson-Chi-Quadrat-Test wurde geprüft, ob die beobachteten Häufigkeitsunterschiede statistisch signifikant sind. Das Signifikanzniveau wurde bei $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Insgesamt traten bei 69 von 333 Zähnen (20,7 %) postoperative Komplikationen auf. 30 in der AH-Plus-Gruppe (18,4 %) und 39 in der BC-Sealer-Gruppe (22,9 %).

Zu Beginn der klinischen Ausbildung traten Komplikationen bei 12/54 Zähnen (22,2 %) unter AH Plus und bei 12/59 Zähnen (20,3 %) unter BC Sealer auf. Dabei zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied ($\chi^2 = 0,060$; $p = 0,807$; Phi-Koeffizient = 0,069).

In der fortgeschrittenen klinischen Ausbildung lagen die Komplikationsraten bei 11/54 (20,4 %) für AH Plus und 18/60 (30,0 %) für BC Sealer, ebenfalls ohne signifikanten Unterschied ($\chi^2 = 1,389$; $p = 0,238$; Phi-Koeffizient = 0,110).

Bei den approbierten Behandlern ergab sich mit 7/55 (12,7 %) gegenüber 9/51 (17,6 %) ebenfalls kein statistisch signifikanter Unterschied ($\chi^2 = 0,500$; $p = 0,480$; Phi-Koeffizient = 0,078).

Zusammenfassend zeigte sich in keiner der untersuchten Behandlergruppen ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der verwendeten Obturationstechnik und dem Auftreten postoperativer Komplikationen. Die Effektstärken lagen im Bereich sehr geringer Zusammenhänge, sodass auch unter Berücksichtigung der Effektgröße kein relevanter Einfluss der Technik erkennbar war.

Zusätzlich wurde unabhängig vom Ausbildungsstand der Behandler ein Gesamtvergleich zwischen den verwendeten Obturationstechniken durchgeführt. Dabei traten postoperative Komplikationen bei 30/163 Zähnen (18,4 %) unter Anwendung von AH Plus und bei 39/170 Zähnen (22,9 %) unter Verwendung von BC Sealer auf. Der Pearson-Chi-Quadrat-Test zeigte keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den beiden Techniken ($\chi^2 = 1,042$; $p = 0,307$). Auch die Effektstärke war mit einem Phi-Koeffizienten von 0,056 als sehr gering einzustufen (Tabelle 24, Abbildung 21, 22).

Insgesamt ergaben sich keine Hinweise darauf, dass die Wahl der Obturationstechnik das Risiko für postoperative Komplikationen im Beobachtungszeitraum von bis zu 18 Monaten beeinflusst. Die Nullhypothese wird somit beibehalten.

Behandlergruppe	Laterale Kondensation (AH Plus) Komplikationen n/N (%)	Einstifttechnik (BC Sealer) Komplikationen n/N (%)	χ^2 (df)	p-Wert	Phi-Koeffizient
Start klinische Ausbildung	12/54 (22,2 %)	12/59 (20,3 %)	0,060 (1)	0,807	0,069
Fortgeschrittene klinische Ausbildung	11/54 (20,4 %)	18/60 (30,0 %)	1,389 (1)	0,238	0,110
Approbierte	7/55 (12,7 %)	9/51 (17,6 %)	0,500 (1)	0,480	0,078
Gesamt	30/163 (18,4 %)	39/170 (22,9 %)	1,042 (1)	0,307	0,056

Tabelle 24: Postoperative Komplikationen (≤ 18 Monate) insgesamt sowie nach Obturationstechnik und Ausbildungsstand der Behandler (n/N, %, Chi-Quadrat-Test, Phi).

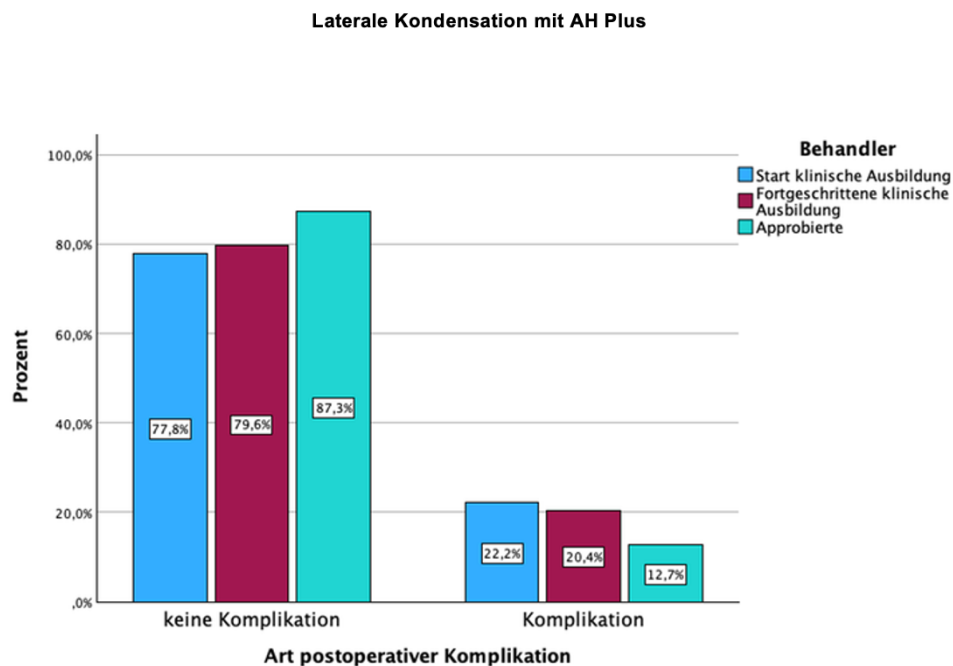


Abbildung 21: Anteil postoperativer Komplikationen bei Verwendung von der lateralen Kondensation mit AH Plus, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler in Prozent.

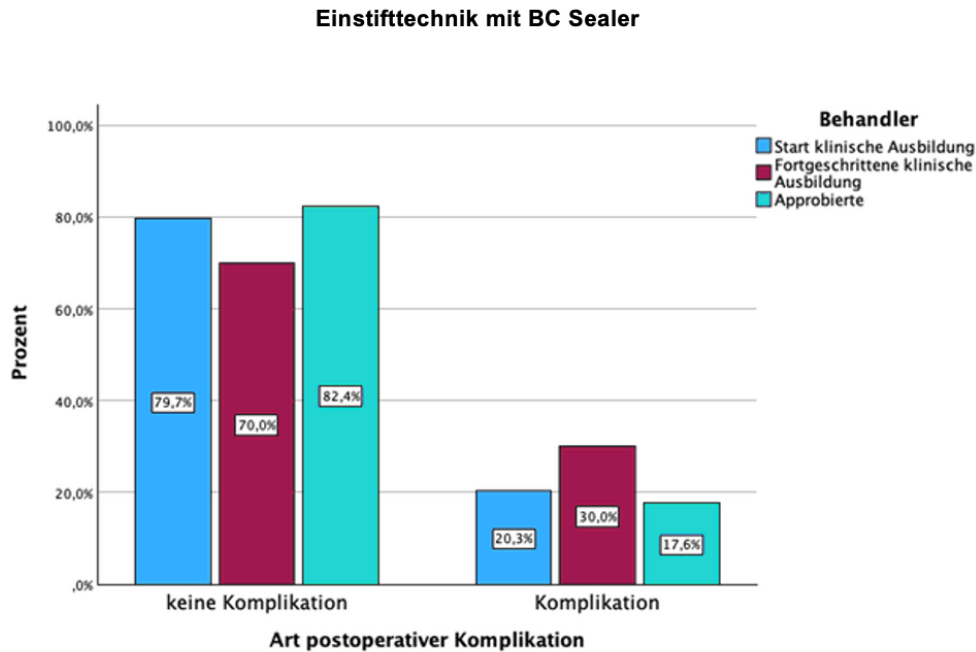


Abbildung 22: Anteil postoperativer Komplikationen bei Verwendung von der Einstifttechnik mit BC Sealer, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler (in Prozent).

7.6 Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Abhängigkeit von der Obturationstechnik

Im Rahmen der Analyse wurde geprüft, ob ein Zusammenhang zwischen der eingesetzten Wurzelkanalfülltechnik und der röntgenologisch beurteilten Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung besteht. Die radiologische Bewertung der Füllungen erfolgte dichotom, unterschieden in „ideal“ und „nicht ideal“. Ideale Wurzelkanalfüllungen stellten sich röntgenologisch als homogen mit einer Länge bis an den radiologischen Apex oder $\leq 2\text{mm}$ vor den radiologischen Apex reichend dar. Als nicht ideal wurden Wurzelkanalfüllungen klassifiziert, die $>2\text{ mm}$ vor dem radiologischen Apex endeten, über den Apex hinaus extrudiert waren und/oder eine inhomogene Struktur aufwiesen. Insgesamt flossen 333 Behandlungsfälle in die statistische Auswertung ein (laterale Kondensation mit AH Plus: $n = 163$; Einstifttechnik mit BC Sealer: $n = 170$). Zur Prüfung eines möglichen Zusammenhangs zwischen der verwendeten Fülltechnik und der röntgenologisch beurteilten Gesamtqualität wurde der Pearson-Chi-Quadrat-Test angewendet, das Signifikanzniveau lag bei $\alpha = 0,05$.

Die Ergebnisse zeigten, dass bei Anwendung der lateralen Kondensation 55,2 % der Füllungen als ideal bewertet wurden, während 44,8 % als nicht ideal eingestuft wurden. Bei

der Einstifttechnik mit BC Sealer lag der Anteil idealer Füllungen bei 54,7 %, der Anteil nicht idealer Füllungen bei 45,3 %.

Der Chi-Quadrat-Test ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Techniken ($\chi^2 = 0,009$, $p = 0,926$) (Tabelle 25, Abbildung 23).

Die getrennte Analyse nach Ausbildungsstand bestätigte die zuvor beobachteten Ergebnisse, da sich auch innerhalb der einzelnen Behandlergruppen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Techniken hinsichtlich der Gesamtqualität zeigten (Beginn der klinischen Ausbildung: $p = 0,727$; fortgeschrittene Ausbildung: $p = 0,243$; bei Approbierten: $p = 0,579$, Tabelle 26).

Ergänzend wurde technikspezifisch geprüft, ob der Ausbildungsstand innerhalb der jeweiligen Technikgruppe einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtqualität hatte. Für die laterale Kondensation mit AH Plus zeigte sich eine tendenzielle Abnahme der idealen Füllungen mit zunehmendem Ausbildungsstand (Start klinische Ausbildung: 63,0 %; Fortgeschrittene: 59,3%; Approbierte: 43,6 %), ohne jedoch statistische Signifikanz zu erreichen ($\chi^2(2) = 4,650$; $p = 0,098$; Cramér-V = 0,169). Ein vergleichbares Muster zeigte sich für die Einstifttechnik mit BC Sealer (Start klinische Ausbildung: 66,1 %; Fortgeschrittene: 48,3 %; Approbierte: 49,0 %; $\chi^2(2) = 4,741$; $p = 0,093$; Cramér-V = 0,167), ebenfalls ohne statistische Signifikanz. Damit ließ sich in beiden Technikgruppen kein signifikanter Einfluss des Ausbildungsstands auf die Gesamtqualität nachweisen (Tabelle 27, Abbildung 24, 25).

Technik	Nicht ideale Gesamtqualität n (%)	Ideale Gesamtqualität n (%)	Gesamt n	χ^2 (df)	p-Wert	Phi-Koeffizient
Laterale Kondensation mit AH Plus	73 (44,8 %)	90 (55,2 %)	163			
Einstifttechnik mit BC Sealer	77 (45,3 %)	93 (54,7 %)	170			
Gesamt	150 (45,0%)	183 (55,0%)	333			
Vergleich AH Plus vs. BC Sealer				0,009 (1)	0,926	0,005

Tabelle 25: Zusammenhang zwischen Obturationstechnik und röntgenologisch beurteilter Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung (ideal vs. nicht ideal) einschließlich Chi-Quadrat-Test und Effektmaß (Phi) (n = 333).

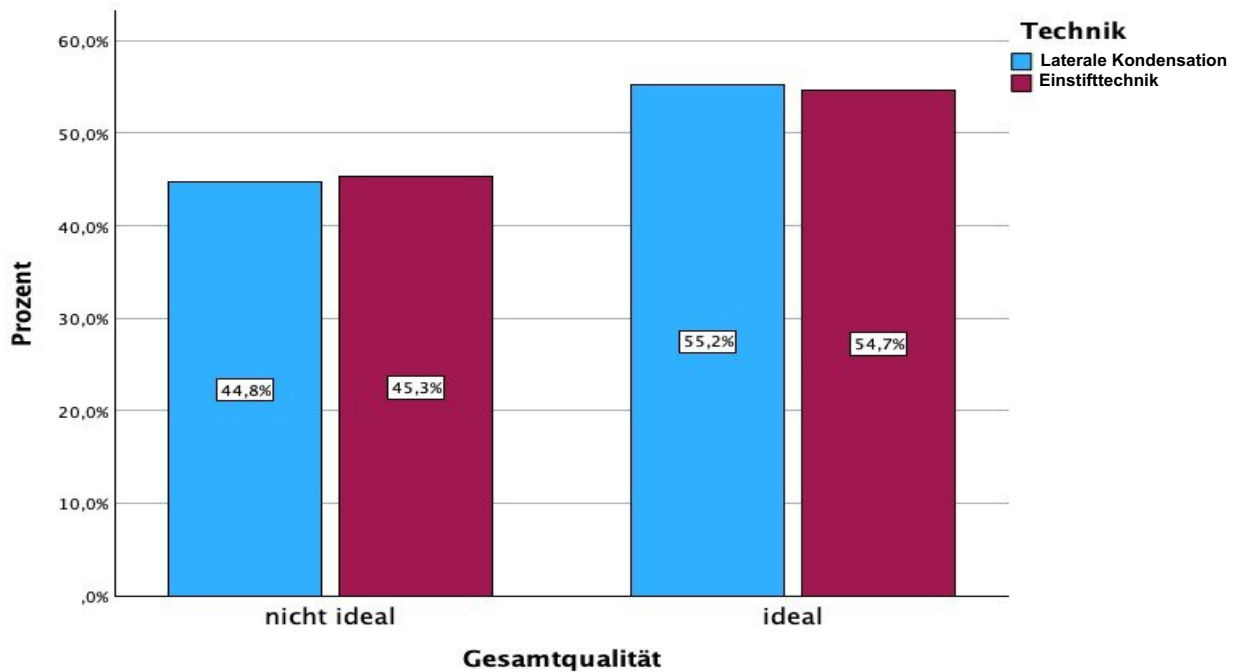


Abbildung 23: Balkendiagramm zur Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Prozent, differenziert nach verwendeter Technik in Prozent. X-Achse: Gesamtqualität („ideal“/„nicht ideal“) Y-Achse: der prozentuale Anteil der Fälle (n = 333)

Behandlergruppe	Laterale Kondensation mit AH Plus ideal n/N (%)	Einstifttechnik mit BC Sealer ideal n/N (%)	χ^2 (df)	p-Wert	Phi-Koeffizient
Beginn klinische Ausbildung	34/54 (63,0%)	39/59 (66,1 %)	0,121 (1)	0,727	0,033
Fortgeschrittene Ausbildung	32/54 (59,3 %)	29/60 (48,3 %)	1,364 (1)	0,243	0,109
Approbierte	24/55 (43,6 %)	25/51 (49,0 %)	0,309 (1)	0,579	0,054

Tabelle 26: Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Abhängigkeit von der Obturationstechnik, stratifiziert nach Ausbildungsstand (n, %, Chi-Quadrat-Test, Phi).

Behandlergruppe	Technik	Ideal n (%)	Nicht ideal n (%)	Gesamt n (%)	χ^2 (df)	p-Wert	Cramér-V
Start klinische Ausbildung	Laterale Kondensation	34 (63,0%)	20 (37,0%)	54 (100%)			
	Einstifttechnik	39 (66,1%)	20 (33,9%)	59 (100%)			
Fortgeschrittene Ausbildung	Laterale Kondensation	32 (59,3%)	22 (40,7%)	54 (100%)			
	Einstifttechnik	29 (48,3%)	31 (51,7%)	60 (100%)			
Approbierte	Laterale Kondensation	24 (43,6%)	31 (56,4%)	55 (100%)			
	Einstifttechnik	25 (49,0%)	26 (51,0%)	51 (100%)			
Vergleich Behandlergruppen innerhalb lateraler Kondensation					4,650 (2)	0,098	0,169
Vergleich Behandlergruppen innerhalb Einstifttechnik					4,741 (2)	0,093	0,167

Tabelle 27: Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler, getrennt nach Obturationstechnik, einschließlich Chi-Quadrat-Test und Effektmaß (Cramér-V).

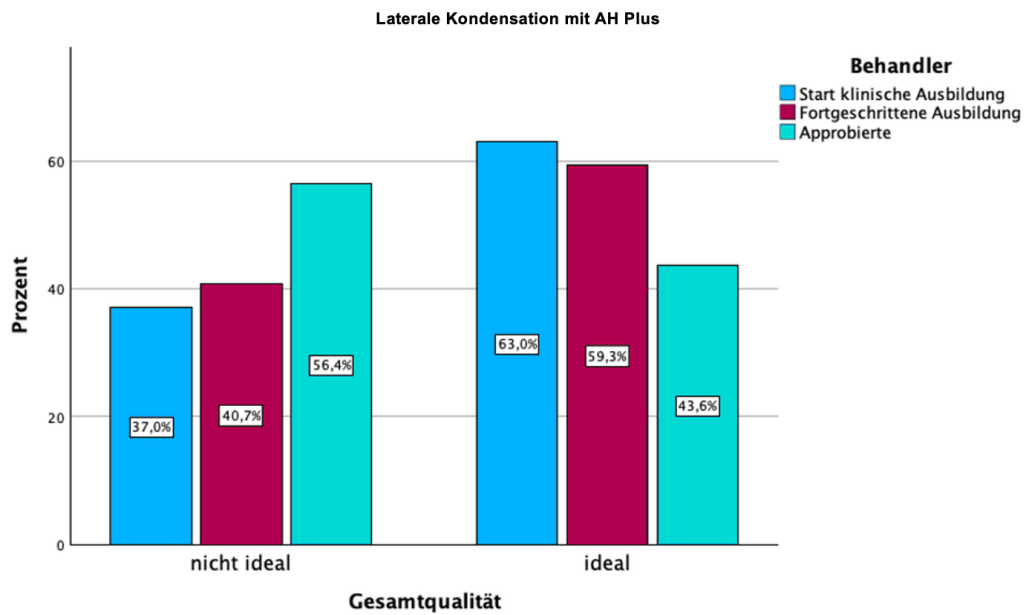


Abbildung 24: Prozentuale Verteilung der röntgenologisch beurteilten Gesamtqualität der Wurzelfüllung („ideal“ vs. „nicht ideal“) bei Anwendung der lateralen Kondensation mit AH Plus, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler (n = 163).

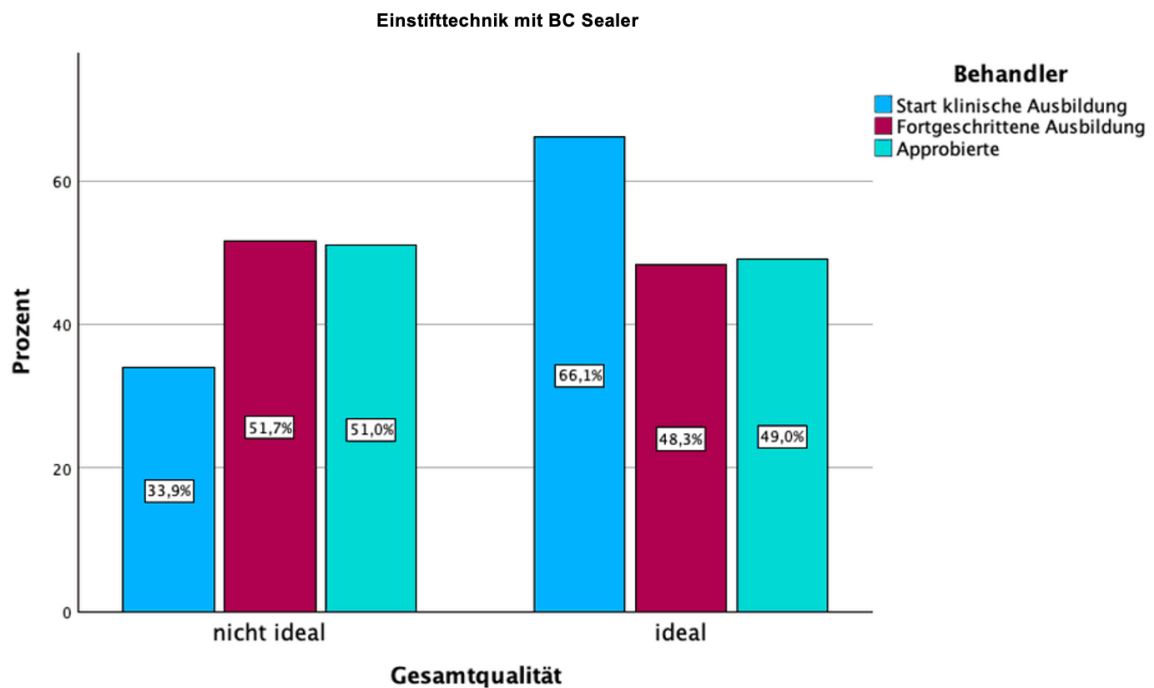


Abbildung 25: Prozentuale Verteilung der röntgenologisch beurteilten Gesamtqualität der Wurzelfüllung („ideal“ vs. „nicht ideal“) bei Verwendung von BC-Sealer, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler (n = 170).

7.7 Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler unabhängig von der verwendeten Technik

Zur Beantwortung der Fragestellung wurde geprüft, ob sich die röntgenologisch beurteilte Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandler unterscheidet. Die Gesamtqualität wurde dabei anhand einer kombinierten Bewertung von Füllungslänge und Homogenität der Wurzelfüllung beurteilt. Als ideal galt eine Wurzelfüllung, die am radiologischen Apex oder bis maximal 2 mm davor endete und gleichzeitig keine radiologisch erkennbaren Hohlräume aufwies. Wurzelfüllungen, die eines oder beide dieser Kriterien nicht erfüllten, wurden als nicht ideale Gesamtqualität eingestuft.

Die Beurteilung erfolgte unabhängig von der verwendeten Obturationstechnik und wurde dichotom in „ideal“ und „nicht ideal“ eingeteilt.

Dabei zeigte sich, dass zu Beginn der klinischen Ausbildung 64,6 % der Wurzelfüllungen als ideal bewertet wurden, während dieser Anteil in der fortgeschrittenen klinischen Ausbildung bei 53,5 % und bei den approbierten Behandlern bei 46,2 % lag. Entsprechend nahm der Anteil nicht idealer Wurzelfüllungen mit steigendem Ausbildungsstand zu.

Zur statistischen Prüfung wurde der Pearson-Chi-Quadrat-Test angewendet. Dieser ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den Behandlergruppen hinsichtlich der Gesamtqualität der Wurzelfüllung ($\chi^2 = 7,607$; $df = 2$; $p = 0,022$). Die Effektstärke war mit einem Cramér-V von 0,151 als gering einzustufen.

Zur weiteren Differenzierung wurden ergänzend paarweise Vergleiche zwischen den Behandlergruppen durchgeführt. Dabei zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen Studierenden zu Beginn der klinischen Ausbildung und approbierten Behandlern ($p = 0,006$), während sich zwischen den übrigen Gruppen keine signifikanten Unterschiede ergaben (Beginn vs. fortgeschrittene Ausbildung: $p = 0,089$; fortgeschrittene Ausbildung vs. Approbierte: $p = 0,280$) (Tabelle 28, Abbildung 26).

Behandlergruppe	Ideal n (%)	Nicht ideal n (%)	Gesamt n	χ^2 (df)	p-Wert	Phi-Koeffizient
Beginn klinische Ausbildung	73 (64,6%)	40 (35,4%)	113			
Fortgeschrittene Ausbildung	61 (53,5%)	53 (46,5%)	114			
Approbierte	49 (46,2%)	57 (53,8%)	106			
Gesamt	183 (55,0%)	150 (45,%)	333	7,607 (2)	0,022*	0,151
Beginn klinische Ausbildung vs. Approbierte				7,485 (1)	0,006*	0,185
Beginn klinische Ausbildung vs. Fortgeschrittene				2,887 (1)	0,089	0,113
Fortgeschrittene vs. Approbierte				1,165 (1)	0,280	0,073

*Tabelle 28: Kreuztabelle zur Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von Behandlergruppe, technikenunabhängig, einschließlich Chi-Quadrat-Test. * $p < 0,05$ statistisch signifikant.*

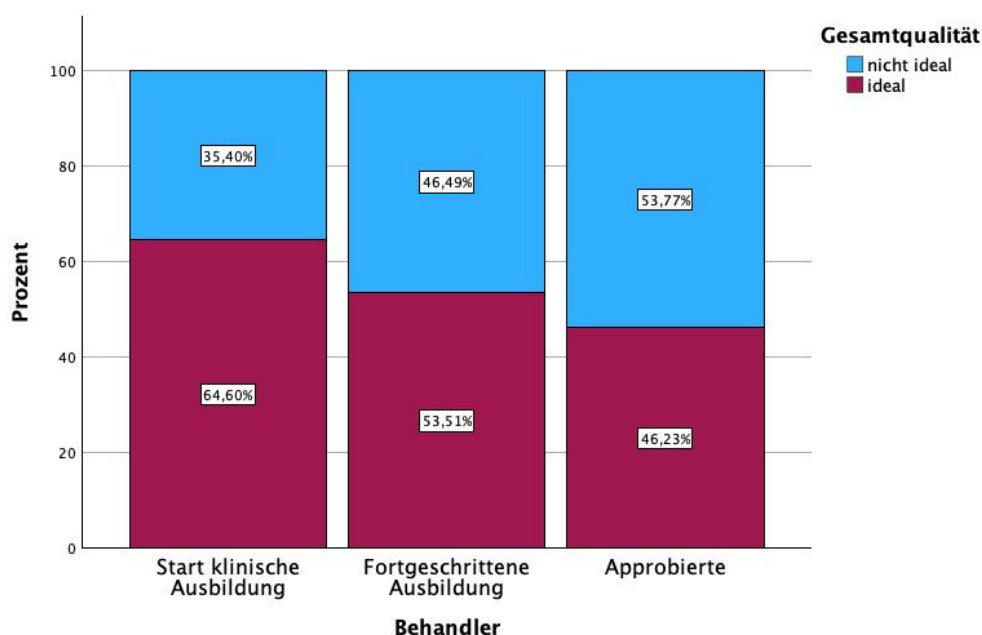


Abbildung 26: Balkendiagramm zur Verteilung Gesamtqualität der Wurzelfüllung in Prozent, differenziert nach Ausbildungsstand der Behandler, technikunabhängig (n = 333).

8 Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss zweier Obturationstechniken sowie des Ausbildungsstandes der Behandler auf die Qualität der Wurzelkanalfüllung und das Auftreten postoperativer Komplikationen an mehrwurzeligen Zähnen zu untersuchen. Grundlage bildete ein retrospektiv erhobenes Patientenkollektiv aus der Poliklinik für Zahnerhaltungskunde der Universitätsmedizin Mainz. Bewertet wurden sowohl röntgenologische Parameter der Füllungsqualität als auch klinische Verlaufsdaten im Zeitraum von bis zu 18 Monaten nach erfolgter Behandlung.

8.1 Zusammensetzung des Patientenkollektivs

Die vorliegende Studie basiert auf einem Kollektiv von 333 Fällen aus der Poliklinik für Parodontologie und Zahnerhaltung der Universitätsmedizin Mainz, erhoben im Zeitraum vom 1. Januar 2014 bis zum 31. Juli 2021. Die Anzahl eingeschlossener Fälle ergibt sich aus der konsequenten Anwendung definierter Ein- und Ausschlusskriterien und ist vor diesem Hintergrund als angemessen zu bewerten. Da die Studie ausschließlich mehrwurzelige Zähne einbezog und Revisionsbehandlungen sowie Weisheitszähne ausgeschlossen wurden, war eine gewisse Reduktion der potenziell verfügbaren Fälle methodisch bedingt. Gleichzeitig ermöglicht die erzielte Fallzahl eine statistisch belastbare Aufteilung in Behandlungsgruppen nach Technik und Ausbildungsstand, was für die Beantwortung der zentralen Fragestellungen dieser Arbeit entscheidend war. In der endodontischen Ausbildungsforschung variieren

Kollektivgrößen erheblich. Barrieshi-Nusair et al. (2004) untersuchten 284 Zähne eines Mischkollektivs aus ein- und mehrwurzeligen Zähnen (124). Kelbauskas et al. (2009) analysierten ebenfalls 276 Zähne eines gemischten Kollektivs (125), sodass die vorliegende Fallzahl von 333 ausschließlich mehrwurzeligen Zähnen im oberen Bereich vergleichbarer universitärer Untersuchungen liegt und trotz der selektiven Einschlusskriterien aussagekräftige Gruppenvergleiche erlaubt.

Die Entscheidung, ausschließlich mehrwurzelige Zähne einzubeziehen und Weisheitszähne auszuschließen, erfolgte vor dem Hintergrund ihrer besonderen klinischen Relevanz und erhöhten Komplexität. Epidemiologische Daten zeigen, dass Wurzelkanalbehandlungen in europäischen Versorgungssystemen häufig an Molaren durchgeführt werden und die Behandlung dieser Zahngruppe im studentischen Ausbildungskontext mit einer erhöhten Fehleranfälligkeit verbunden ist (126, 127). Durch die Beschränkung auf mehrwurzelige Zähne entsteht zudem ein hinsichtlich der Fallkomplexität homogeneres Kollektiv, das eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb der Studiengruppen gewährleistet als ein Mischkollektiv aus ein- und mehrwurzeligen Zähnen.

Die Entscheidung, den Zahn als Analyseeinheit zu wählen, ist sowohl methodisch als auch klinisch begründet. Zwar ermöglicht eine Auswertung auf Kanalebene eine differenziertere Analyse technischer Details, jedoch ist der Behandlungserfolg auf Zahnebene zu beurteilen, da ein Misserfolg einzelner Wurzeln zum Verlust des gesamten Zahnes führen kann (123, 128-130). Vor diesem Hintergrund wurden auch Patienten mit mehreren endodontisch behandelten Zähnen als unabhängige Fälle in die Analyse einbezogen, da jeder Zahn eine eigenständige klinische Einheit mit individueller Ausgangssituation und Behandlungsdynamik darstellt.

Das untersuchte Kollektiv wies eine homogene anamnestische Struktur auf: Mit 86,2 % unauffälliger Befunde und nur vereinzelt vertretenen Risikofaktoren, vorwiegend Parodontitis (8,7 %) und Diabetes mellitus (2,1 %), ist eine relevante Verzerrung der Ergebnisse durch systemische Einflussfaktoren als unwahrscheinlich einzustufen. Gleichzeitig schränkt die geringe Prävalenz dieser Faktoren die Übertragbarkeit auf Risikopatientenkollektive ein, da sowohl Diabetes mellitus als auch Rauchen den endodontischen Heilungsverlauf nachweislich negativ beeinflussen können (131).

Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass ein erheblicher Anteil der eingeschlossenen Zähne bereits präoperativ eine röntgenologisch nachweisbare apikale Parodontitis aufwies (AH Plus: 57,1 %; BC Sealer: 62,9 %). Dieses Verteilungsmuster erscheint im Kontext klinischer endodontischer Behandlungen plausibel, da die Indikation zur Wurzelkanalbehandlung häufig gerade bei bestehender apikaler Parodontitis gestellt wird (1). Die vergleichbare Verteilung

zwischen den beiden Behandlungsgruppen spricht zudem gegen eine relevante Verzerrung der Ergebnisse durch unterschiedliche Ausgangsbefunde.

8.2 Studiendesign

Die vorliegende Arbeit basiert auf einem retrospektiven Studiendesign, das die Auswertung klinisch-radiologisch dokumentierter Behandlungsverläufe sowie der radiologisch beurteilten Qualität von Wurzelkanalfüllungen auf Grundlage vorhandener Routinedaten ermöglicht. Ein solcher Ansatz erlaubt die Analyse realer Versorgungsbedingungen im universitären Behandlungskontext, ist jedoch zugleich mit methodischen Einschränkungen verbunden. Insbesondere hängt die Vollständigkeit und Qualität der erhobenen Daten maßgeblich von der klinischen Dokumentationspraxis ab, wodurch potenzielle Informationsverluste nicht vollständig ausgeschlossen werden können (50).

Zur Sicherstellung einer konsistenten und auswertbaren Datengrundlage wurden ausschließlich Fälle mit vollständig und qualitativ ausreichend dokumentierten Unterlagen in die Analyse eingeschlossen. Dies führte zu einer Reduktion des initialen Datensatzes von 491 auf 333 Fälle, gewährleistet jedoch eine homogene und valide Datenbasis.

Der Beobachtungszeitraum zur Erfassung postoperativer Komplikationen betrug 18 Monate nach abgeschlossener Wurzelkanalfüllung. Im Vergleich zu den Empfehlungen wissenschaftlicher Fachgesellschaften ist dieser Zeitraum als begrenzt einzustufen, da für eine abschließende Beurteilung periapikaler Heilungsprozesse Nachbeobachtungszeiten von bis zu vier bis fünf Jahren empfohlen werden (1, 45).

Gleichwohl erlaubt der gewählte Zeitraum die Erfassung sowohl akuter als auch mittelfristiger klinischer Ereignisse und liegt damit im unteren Bereich vergleichbarer klinischer Studien, deren Nachbeobachtungsintervalle eine erhebliche Spannweite aufweisen (57, 129).

Die Begrenzung des Beobachtungszeitraums ist primär durch das retrospektive Studiendesign bedingt, da keine standardisierte Nachuntersuchung erfolgte und die Analyse auf vorhandene Routinedaten beschränkt war. Zudem ist zu berücksichtigen, dass in retrospektiven Analysen die Verfügbarkeit von Verlaufsdaten mit zunehmendem zeitlichem Abstand abnimmt, da eine systematische Nachverfolgung der Patienten nicht erfolgt und die Auswertung ausschließlich auf dokumentierte Wiedervorstellungen angewiesen ist (57).

Die radiologische Qualitätsbewertung erfolgte anhand konventioneller intraoraler Röntgenaufnahmen, die für alle eingeschlossenen Fälle in diagnostisch ausreichender Qualität vorlagen. Dieses Verfahren stellt den klinischen Standard dar und ist auch in der

wissenschaftlichen Literatur als etabliertes Instrument zur Beurteilung der technischen Qualität von Wurzelkanalfüllungen anerkannt (124, 125, 132, 133). Zur Sicherstellung der Bewertungsqualität wurde die Auswertung durch zwei kalibrierte Untersucher durchgeführt. Die Interrater-Reliabilität lag mit einem Cohen's Kappa von 0,82 im Bereich einer guten Übereinstimmung und belegt die Reproduzierbarkeit der erhobenen Befunde. Vergleichbare Untersuchungen berichten ähnliche Werte und bestätigen damit die Zuverlässigkeit dieses methodischen Vorgehens (127).

Die statistische Auswertung erfolgte unter Verwendung etablierter inferenzstatistischer Verfahren bei einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$. Kategoriale Variablen wurden mittels Chi-Quadrat-Test analysiert, während für ordinal skalierte Variablen nach Prüfung auf Normalverteilung nichtparametrische Verfahren (Mann-Whitney-U-Test) zur Anwendung kamen.

Die Wahl dieser Verfahren entspricht dem Datenniveau der erhobenen Variablen und ermöglicht eine adäquate Analyse gruppenbezogener Unterschiede. Vergleichbare methodische Ansätze finden sich auch in Studien zur Bewertung der technischen Qualität endodontischer Behandlungen im studentischen Kontext, wodurch die gewählte statistische Vorgehensweise zusätzlich gestützt wird (124, 125).

8.3 Röntgenbilder

Die Bewertung der Wurzelkanalfüllungen basierte auf konventionellen intraoralen Röntgenaufnahmen. Dieses Verfahren ist in der endodontischen Diagnostik etabliert und erlaubt eine standardisierte Einschätzung von Füllungslänge, Materialhomogenität und periapikalem Status (132-134). Da diese Parameter klinisch nicht unmittelbar beurteilbar sind, bildet das Röntgenbild nach wie vor die zentrale Grundlage zur objektiven Überprüfung der technischen Ausführung endodontischer Maßnahmen (132, 135).

Neben der diagnostischen Erstbeurteilung erfüllt die Aufnahme eine dokumentarische und forensische Funktion: Sie ermöglicht die Nachvollziehbarkeit des therapeutischen Vorgehens und stellt eine rechtlich relevante Behandlungsunterlage dar. Die Auswertung erfolgte nach vorangegangener Kalibrierung der Untersuchenden, wodurch eine einheitliche und reproduzierbare Bewertung gewährleistet war.

Als potenzielle Limitation ist jedoch die Varianz in der Qualität der Röntgenaufnahmen zu nennen. Da es sich um eine retrospektive Studie handelt, wurden die Aufnahmen im klinischen Routinebetrieb von verschiedenen Behandlern angefertigt, sodass Unterschiede im Projektionswinkel sowie in der Filmpositionierung, bedingt durch anatomische Gegebenheiten des Patienten oder eingeschränkte Kooperation nicht vollständig ausgeschlossen werden

können. Diese Varianz in der Aufnahmequalität kann die Beurteilbarkeit der Füllungslänge , -homogenität sowie des periapikalen Status beeinflussen.

Die Aussagekraft intraoraler Röntgenaufnahmen ist jedoch begrenzt. Als zweidimensionales Verfahren unterliegt die Projektion Überlagerungen und Verzerrungen, welche die Darstellung der Wurzelkanalmorphologie, mesio-distaler Strukturen und der Knochendicke beeinträchtigen können (136, 137).

Enge oder anatomisch komplexe Kanalabschnitte lassen sich häufig nur eingeschränkt abbilden und erscheinen nicht selten unauffällig, obwohl strukturelle Veränderungen vorliegen (138). Auch die Beurteilung periapikaler Veränderungen weist eine relevante Variabilität auf, da die tatsächliche Ausdehnung entzündlicher Prozesse sowohl über- als auch unterschätzt werden kann (139).

Histologische Untersuchungen verdeutlichen diese Limitation: Selbst radiologisch unauffällige Wurzelkanalfüllungen können histopathologische Zeichen einer Entzündung aufweisen (140). Damit zeigt sich die grundsätzliche Diskrepanz zwischen bildgebender Darstellung und biologischem Befund.

Trotz dieser bekannten Einschränkungen stellt die intraorale Röntgenaufnahme das klinisch angemessene Standardverfahren zur retrospektiven Qualitätsbewertung dar. Dreidimensionale Verfahren wie die digitale Volumentomographie bieten zwar eine höhere diagnostische Sensitivität, sind jedoch gemäß dem Position Statement der ESE aufgrund der erhöhten Strahlenexposition nur in Ausnahmefällen indiziert und wurden in keiner der genannten Vergleichsstudien eingesetzt (136).

8.4 Radiologische Qualitätsparameter

Die folgenden Abschnitte dienen neben der methodischen Einordnung der radiologischen Qualitätsparameter zugleich der Beantwortung der Nebenfragestellungen dieser Arbeit. Die Ergebnisse werden dabei im Hinblick auf Unterschiede zwischen den untersuchten Obturationstechniken sowie den Einfluss des Ausbildungsstands der Behandler diskutiert.

8.4.1 Homogenität der Wurzelkanalfüllung

Die Homogenität der Wurzelkanalfüllung stellt einen zentralen Parameter zur Beurteilung der technischen Qualität der Obturation dar. Eine gleichmäßig dichte Füllung ohne erkennbare Hohlräume oder Materialunregelmäßigkeiten wird als Voraussetzung für den bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanalsystems angesehen und ist in den Leitlinien der ESE als wesentliches Qualitätsmerkmal definiert (1).

In der vorliegenden Untersuchung wurden Wurzelkanalfüllungen als homogen bewertet, wenn sie im zweidimensionalen Röntgenbild eine gleichmäßig dichte, röntgenopake Struktur ohne sichtbare Unregelmäßigkeiten oder Voids aufwiesen. Die Bewertung erfolgte dichotom in den Kategorien „homogen“ und „inhomogen“. Ein vergleichbares Vorgehen findet sich in der Literatur insofern, als die radiologische Qualität von Wurzelkanalfüllungen häufig anhand der Dichte beziehungsweise des Vorhandenseins von Voids beurteilt und anschließend in Kategorien wie „akzeptabel“ versus „nicht akzeptabel“ überführt wird (133, 137, 141).

Die Aussagekraft dieser Beurteilung ist jedoch durch die Verwendung zweidimensionaler Röntgenaufnahmen limitiert, da Überlagerungseffekte die Erkennung von Hohlräumen einschränken können (137).

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen für beide untersuchten Obturationstechniken einen hohen Anteil homogener Wurzelkanalfüllungen. Für die Einstifttechnik mit BC Sealer wurden 88,8 % der Füllungen als homogen bewertet, für die laterale Kondensation mit AH Plus 85,9 %. Der Unterschied von 2,9 Prozentpunkten erwies sich als statistisch nicht signifikant ($p = 0,420$) und ist auch hinsichtlich der Effektstärke als gering einzustufen. Dies spricht dafür, dass sich beide Techniken in ihrer Fähigkeit, eine homogene Füllung zu erzeugen, auf einem vergleichbaren Niveau bewegen.

Im Vergleich zur Literatur liegen die in der vorliegenden Studie erzielten Homogenitätswerte im oberen Bereich der berichteten Ergebnisse. Kelbauskas et al. (2009) berichteten eine akzeptable Dichte in 79,5 % der 258 untersuchten Wurzelkanäle ein- und mehrwurzeliger Zähne (125). Ähnliche Ergebnisse ergab die Untersuchung von Barrieshi-Nusair et al. (2004) mit 72,6 % akzeptabel dichter Wurzelkanalfüllungen der 912 analysierten Wurzelkanäle von ein- und mehrwurzeligen Zähnen (124). Noch deutlich niedrigere Werte ergab die Studie von Ilgüy et al. (2013) die mit 47,3 % homogen obturierte Zähne ermittelte (128). Vor diesem Hintergrund ist die in der vorliegenden Untersuchung erreichte Homogenitätsrate von insgesamt 87,4 % als überdurchschnittlich hoch einzuordnen. Diese Unterschiede sind jedoch nicht ausschließlich als Hinweis auf eine höhere technische Qualität zu interpretieren, sondern müssen im Kontext methodischer Unterschiede betrachtet werden.

Die genannten Studien basieren überwiegend auf Mischkollektiven aus ein- und mehrwurzeligen Zähnen und bewerten die Qualität häufig auf Kanal- oder Wurzelebene. Demgegenüber erfolgte in der vorliegenden Untersuchung eine Bewertung auf Zahnebene bei ausschließlicher Einbeziehung mehrwurzeliger Zähne, was die Vergleichbarkeit einschränkt und tendenziell zu unterschiedlichen Bewertungsniveaus führen kann.

Der fehlende signifikante Unterschied zwischen den beiden Verfahren deutet darauf hin, dass unter standardisierten Ausbildungsbedingungen die erzielte Homogenität weniger von der gewählten Obturationstechnik als vielmehr von der korrekten Durchführung der Behandlung abhängig ist. Unterstützt wird diese Annahme durch die geringen Unterschiede zwischen den Techniken sowie die insgesamt hohen Homogenitätsraten.

Der tendenziell höhere Anteil homogener Füllungen bei Verwendung des kalziumsilikatbasierten Sealers kann durch materialbedingte Eigenschaften erklärt werden. Kalziumsilikatbasierte Sealer weisen eine hohe Fließfähigkeit und Adaptationsfähigkeit an die Kanalwände auf, wodurch eine gleichmäßige Verteilung des Materials begünstigt wird (8, 63, 97). Demgegenüber ist die laterale Kondensation stärker von der mechanischen Verdichtung der Guttapercha abhängig, sodass die resultierende Dichte der Füllung in höherem Maße durch die operative Technik beeinflusst wird (36, 108). Die geringen Unterschiede zwischen den Verfahren legen jedoch nahe, dass sich diese material- und technikbedingten Effekte im klinischen Alltag weitgehend ausgleichen.

Die stratifizierte Analyse nach Ausbildungsstand zeigte ebenfalls keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Behandlergruppe und Homogenität ($p = 0,324$). Auffällig ist jedoch, dass Studierende zu Beginn der klinischen Ausbildung mit 91,2 % (AH Plus) beziehungsweise 94,9 % (BC Sealer) die höchsten Homogenitätsraten erzielten, während approbierte Behandler mit 83,6 % beziehungsweise 86,3 % niedrigere Werte aufwiesen. Dieser Befund kann plausibel durch die intensivere Supervision sowie die Zuweisung weniger komplexer Fälle in frühen Ausbildungsphasen erklärt werden, während erfahrene Behandler häufiger schwierigere anatomische Situationen behandeln.

Insgesamt zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass beide Obturationstechniken hinsichtlich der Homogenität zu vergleichbaren Resultaten führen. Die Homogenität stellt damit ein geeignetes Maß zur Beurteilung der technischen Qualität dar, erlaubt jedoch im untersuchten Kollektiv keine Differenzierung zwischen den angewandten Verfahren.

8.4.2 Länge der Wurzelkanalfüllung

In der vorliegenden Untersuchung zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied in der Füllungslängenverteilung zwischen den beiden Obturationstechniken ($\chi^2 = 14,159$; $df = 3$; $p = 0,003$; $\Phi = 0,206$). Beide Verfahren wiesen dabei charakteristische, jedoch entgegengesetzte Abweichungsmuster auf. Die laterale Kondensation mit AH Plus war häufiger mit zu kurzen Füllungen assoziiert (27,0 % vs. 16,5 %), während die Einstifttechnik mit BC Sealer signifikant häufiger apikale Extrusionen zeigte (21,2 % vs. 9,8 %; $p = 0,004$). Gleichzeitig wurden apexnahe Füllungen (≤ 2 mm vor Apex) bei der Einstifttechnik häufiger erreicht (34,1 % vs. 27,0 %). Dieser Unterschied war Teil der insgesamt statistisch signifikanten Unterschiede in der Füllungslängenverteilung zwischen den Techniken.

Die Effektstärke ($\Phi = 0,206$) weist dabei auf einen moderaten Zusammenhang hin, sodass der statistisch signifikante Unterschied nicht zwangsläufig mit einer hohen klinischen Relevanz gleichzusetzen ist. Vielmehr ist eine differenzierte Betrachtung erforderlich, da die einzelnen Kategorien der Füllungslänge unterschiedlich stark mit dem Behandlungserfolg assoziiert sind. Während zu kurze Füllungen potenziell einen unzureichenden apikalen Verschluss bedingen, ist die klinische Bedeutung apikaler Extrusionen, insbesondere bei Verwendung kalziumsilikatbasierter Sealer, weniger eindeutig.

Der erhöhte Anteil zu kurzer Füllungen bei der lateralen Kondensation lässt sich plausibel durch die höhere Techniksensitivität dieser Methode erklären. Die korrekte Adaptation des Masterpoints sowie die schrittweise laterale Verdichtung erfordern ein hohes Maß an Präzision, wodurch insbesondere im Ausbildungskontext systematische Verkürzungen der Füllung begünstigt werden können (36, 91). Diese Interpretation wird durch die Literatur gestützt: Barrieshi-Nusair et al. (2004) berichteten bei Studierenden einen Anteil zu kurzer Füllungen von 34,5 %, wobei die Auswertung auf Kanalebene erfolgte und jeder Wurzelkanal als eigenständige Bewertungseinheit gewertet wurde. Er et al. (2006) beschrieben ebenfalls eine vergleichsweise geringe Rate adäquat langer Füllungen bei gleichzeitig erhöhten Anteilen zu kurzer und überfüllter Kanäle. Die Ergebnisse wurden hierbei auf Zahnebene berichtet, bei der der Zahn als übergeordnete Einheit unabhängig von der Anzahl seiner Wurzelkanäle in die Bewertung eingeht (124, 133). Ergänzend zeigen Studien, dass insbesondere Molaren und gekrümmte Kanäle mit erhöhten Fehlerraten assoziiert sind, was die Übertragbarkeit dieser Limitationen auf das vorliegende Kollektiv zusätzlich plausibilisiert (124, 132). Auffällig ist, dass die in der vorliegenden Studie beobachtete Rate zu kurzer Füllungen unterhalb dieser Werte liegt. Dies könnte auf strukturiertere Behandlungsprotokolle, engere Supervision oder eine selektivere Fallauswahl hinweisen. Gleichzeitig verdeutlicht der Vergleich, dass die Problematik zu kurzer Füllungen kein isoliertes Ergebnis darstellt, sondern ein konsistentes Muster innerhalb studentischer Ausbildungssituationen ist.

Im Gegensatz dazu ist der signifikant höhere Anteil apikaler Extrusionen bei der Einstifttechnik primär als material- und systemimmanentes Phänomen zu interpretieren. Da die Abdichtung in dieser Technik überwiegend durch den Sealer erfolgt, kann bereits eine geringe Diskrepanz zwischen Masterpoint und Kanalgeometrie zu einer apikalen Verlagerung des Materials führen (91, 109). Die hohe Fließfähigkeit kalziumsilikatbasierter Sealer verstärkt diesen Effekt zusätzlich (8, 97). Die Literatur beschreibt teils deutlich höhere Extrusionsraten. Chybowski et al. (2018) berichteten eine Extrusionsrate von 47,4 %, was die grundsätzliche Neigung dieser Materialien zur apikalen Überpressung unterstreicht (142). Dass der im vorliegenden Kollektiv beobachtete Wert deutlich darunter liegt, spricht für eine vergleichsweise kontrollierte Anwendung, relativiert jedoch nicht die grundsätzliche Tendenz dieser Technik.

Die klinische Relevanz dieser Extrusionen ist differenziert zu bewerten. Während klassische endodontische Konzepte eine Überfüllung als prognostisch ungünstig einstufen, zeigen neuere Untersuchungen, dass kalziumsilikatbasierte Sealer aufgrund ihrer Biokompatibilität und bioaktiven Eigenschaften nicht zwangsläufig mit einem schlechteren Outcome assoziiert sind (1, 97, 104). Dennoch bleibt festzuhalten, dass die Vermeidung einer Extrusion weiterhin als technisches Qualitätskriterium gilt, sodass die erhöhte Extrusionsrate trotz möglicherweise begrenzter klinischer Konsequenz als methodischer Nachteil zu werten ist.

Die Analyse des Ausbildungsstands liefert zusätzliche Hinweise auf die Techniksensitivität der Verfahren. Während bei der lateralen Kondensation ein signifikanter Zusammenhang mit der Füllungslänge bestand, zeigte sich dieser bei der Einstifttechnik nicht. Dies spricht dafür, dass die Einstifttechnik weniger stark von der individuellen Erfahrung des Behandlers abhängig ist. Gleichzeitig ist der beobachtete Anstieg apikaler Extrusionen bei approbierten Behandlern kritisch zu interpretieren, da er auf eine erhöhte Fallkomplexität, aber möglicherweise auch auf eine geringere Kontrolle der apikalen Begrenzung hinweist. Damit wird deutlich, dass Erfahrung nicht zwangsläufig zu einer Reduktion technischer Abweichungen führt, sondern vielmehr mit einer Verschiebung der Fehlermuster einhergehen kann.

Im Vergleich zur Literatur bewegen sich die vorliegenden Ergebnisse insgesamt innerhalb der für studentische Kollektive berichteten Spannbreiten (124, 133). Die beobachtete erhöhte Extrusionsrate bei Verwendung kalziumsilikatbasierter Sealer stellt dabei eine technik- und materialspezifische Besonderheit dar, die konsistent mit den bekannten Materialeigenschaften kalziumsilikatbasierter Sealer ist (8, 97, 142).

Die Beurteilung der Füllungslänge erfolgte auf Basis zweidimensionaler Röntgenaufnahmen und unterliegt damit methodischen Einschränkungen wie Überlagerungen und begrenzter Detektionsgenauigkeit (133, 137, 143). Darüber hinaus erfolgte die Auswertung auf Zahnebene, wodurch kanalspezifische Abweichungen nicht differenziert erfasst werden

konnten. Insbesondere bei mehrwurzeligen Zähnen kann dies zu einer Unterschätzung lokaler Fehlpositionierungen führen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass beide Obturationstechniken mit spezifischen, systematisch unterschiedlichen Fehlerprofilen verbunden sind. Die laterale Kondensation weist eine höhere Anfälligkeit für zu kurze Füllungen auf, während die Einstifttechnik verstärkt zu apikalen Extrusionen neigt. Die höhere Rate apexnaher Füllungen bei der Einstifttechnik spricht für eine grundsätzlich zuverlässigere Erreichung der Arbeitslänge, geht jedoch mit einem erhöhten Risiko der Überpressung einher. Ob diese Unterschiede langfristig klinisch relevant sind, bleibt angesichts der begrenzten Nachbeobachtungszeit offen und sollte in prospektiven Studien mit größeren Kollektiven und längeren Nachbeobachtungszeiträumen weiter untersucht werden.

8.5 Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung in Abhängigkeit von Obturationstechnik und Ausbildungsstand

Die Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllungen wurde anhand der röntgenologisch beurteilbaren Parameter Füllungslänge und Homogenität bestimmt. Eine adäquate Ausführungsqualität lag vor, wenn eine gleichmäßig dichte, randständige Obturation ohne erkennbare Hohlräume vorlag und die Füllung ≤ 2 mm vor dem röntgenologischen Apex endete. Dieses Vorgehen entspricht den etablierten Bewertungskriterien vergleichbarer Untersuchungen und orientiert sich an den Qualitätsrichtlinien der ESE, die eine vollständige, homogene und der ursprünglichen Kanalform angepasste Obturation als wesentliches technisches Qualitätsmerkmal definieren (1, 123). Die methodische Grundlage der Bewertung stimmt mit dem internationalen Konsens überein, der die Kombination aus apexnaher Füllungslänge und homogener Materialdichte als zentrale Komponenten einer technisch korrekten Obturation hervorhebt (123). Die Bewertung erfolgte auf Grundlage des unmittelbar postoperativ angefertigten Röntgenbildes, wodurch eine standardisierte und reproduzierbare Einschätzung der Ausführungsqualität möglich war.

In der vorliegenden Untersuchung wurden insgesamt 55,0 % der 333 Wurzelkanalfüllungen als ideal bewertet, während 45,0 % die definierten Qualitätskriterien nicht erfüllten. Dieser Befund ist vor dem Hintergrund zu bewerten, dass ausschließlich mehrwurzelige Zähne einbezogen wurden. Ribeiro et al. (2018) wiesen in ihrer Metaanalyse über 24 Studien einen deutlichen Einfluss der Zahnposition auf die Füllungsqualität nach: Während bei Frontzähnen noch 52 % der Füllungen als adäquat bewertet wurden, sank dieser Anteil bei Prämolaren auf 49 % und bei Molaren auf lediglich 26 % (122). Die in der vorliegenden Studie erzielte Gesamtqualität von 55,0 % liegt damit deutlich über dem metaanalytischen Mittelwert für Molaren. Dieser Befund ist angesichts der ausschließlichen Einbeziehung mehrwurzeliger

Zähne positiv zu bewerten und deutet auf die strukturierte Ausbildung sowie die enge Supervision im universitären Behandlungssetting hin. Barrieshi-Nusair et al. (2004) berichteten in ihrer Untersuchung an 542 Zähnen mit 912 Wurzeln über eine adäquate Gesamtqualität von 47,4 % bei ausschließlicher Anwendung der lateralen Kondensation, was die vorliegenden Ergebnisse weiter in einen günstigen Kontext einordnet (124).

Hinsichtlich des Einflusses der Obturationstechnik auf die Gesamtqualität zeigte sich in der vorliegenden Studie kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der lateralen Kondensation mit AH Plus (55,2 % ideal) und der Einstifttechnik mit BC Sealer (54,7 % ideal; $\chi^2 = 0,009$; $p = 0,926$). Der p-Wert von 0,926 verdeutlicht die ausgeprägte Übereinstimmung beider Techniken hinsichtlich der Gesamtqualität, ein Befund, der angesichts der grundlegenden Unterschiede in Applikationsprinzip und Sealereigenschaften zu diskutieren ist. Hörsted-Bindslev et al. (2007) untersuchten in einer In-vitro-Studie an extrahierten Molaren 36 lateral kondensierte und 38 mit Einstifttechnik gefüllte Wurzelkanäle und kamen zu einem vergleichbaren Ergebnis: In beiden Projektionsebenen wurden jeweils 52–53 % der Füllungen als ausreichend bewertet, ohne signifikanten Technikeinfluss ($p > 0,4$) (132). Dass auch in der vorliegenden klinischen Studie beide Techniken trotz ihrer unterschiedlichen Applikationsprinzipien vergleichbare Gesamtqualitäten erzielen konnten, lässt sich auf die spezifischen Materialeigenschaften des BC Sealers zurückführen: Dieser weist eine ausgeprägte Fließfähigkeit auf, die eine tiefe Penetration in Dentintubuli und anatomische Unregelmäßigkeiten ermöglicht, und bildet durch seine biokeramischen Eigenschaften chemische Bindungen zum Wurzeldentin aus (8, 97). Drukteinis (2021) beschreibt, dass hydraulische, kalziumsilikatbasierte Sealer in Kombination mit der Einstifttechnik durch den hydraulischen Druck beim Einsetzen des Masterpoints eine dreidimensionale Versiegelung des Kanalsystems ermöglichen können, die der mechanischen Kondensation bei der lateralen Kondensation vergleichbar ist (109). Die Einstifttechnik kompensiert damit ihre geringere mechanische Verdichtung durch die günstigen Fließ- und Bindefähigkeiten des BC Sealers, was erklärt, warum trotz unterschiedlicher Obturationsprinzipien vergleichbare Gesamtqualitäten erzielt wurden. Barcelos Só et al. (2024) bestätigen diesen Befund in einer Metaanalyse von In-vitro-Studien mit Micro-CT-Auswertung, wobei zu berücksichtigen ist, dass diese Studien überwiegend einwurzelige Zähne unter Laborbedingungen untersuchten und daher nur eingeschränkt mit dem vorliegenden klinischen Setting vergleichbar sind (111).

Die stratifizierte Analyse nach Ausbildungsstand ergab, dass innerhalb keiner der drei Behandlergruppen signifikante Unterschiede zwischen den Techniken hinsichtlich der Gesamtqualität bestanden (Beginn klinische Ausbildung: $p = 0,727$; fortgeschrittene Ausbildung: $p = 0,243$; Approbierte: $p = 0,579$). Die ergänzende technikspezifische Analyse zeigte für beide Techniken eine tendenzielle, jedoch statistisch nicht signifikante Abnahme der

idealen Füllungen mit zunehmendem Ausbildungsstand (AH Plus: $\chi^2(2) = 4,650$; $p = 0,098$; BC Sealer: $\chi^2(2) = 4,741$; $p = 0,093$). Dies legt nahe, dass die Wahl der Obturationstechnik unabhängig vom Erfahrungsniveau des Behandlers keinen entscheidenden Einfluss auf die erzielte Füllungsqualität hat. Klinisch unterstützt dieses Ergebnis die Einstifttechnik als gleichwertige Alternative zur lateralen Kondensation auch im studentischen Ausbildungskontext, vor allem angesichts ihrer einfacheren Handhabung und des damit verbundenen geringeren Zeitaufwands (109, 132).

Auffällig war hingegen, dass die Gesamtqualität mit steigendem Ausbildungsstand nicht zunahm, sondern tendenziell abnahm. Studierende zu Beginn der klinischen Ausbildung erzielten mit 64,6 % den höchsten Anteil idealer Füllungen, gefolgt von Studierenden in fortgeschrittener Ausbildung mit 53,5 %, während Approbierte lediglich 46,2 % ideale Füllungen aufwiesen. Dieser Befund erreichte statistische Signifikanz ($\chi^2 = 7,607$; $p = 0,022$). Die Effektstärke war mit einem Cramér-V von 0,151 jedoch als gering einzustufen. Eine mögliche Erklärung liegt in der intensiveren Supervision der Studierenden im Anfangssemester sowie der Zuweisung einfacherer Fälle in der frühen Ausbildungsphase, beispielsweise Zähne mit guter Zugänglichkeit, geringer Kanalkrümmung und nicht obliterierten Wurzelkanälen. Studien belegen, dass eine engmaschige Betreuung durch spezialisierte Endodontologen die Füllungsqualität im studentischen Ausbildungskontext signifikant verbessert (127, 129). Ayhan et al. (2025) beschreiben darüber hinaus, dass strukturierte Betreuung und standardisierte Behandlungsabläufe im vorklinischen und früh-klinischen Ausbildungsabschnitt maßgeblich zur Qualität der erzielten Füllungen beitragen (127). Approbierte hingegen behandeln häufiger komplexere Fälle ohne direkte Supervision, was sich negativ auf die erzielte Füllungsqualität auswirken kann. Polyzos et al. (2018) bestätigen, dass der Ausbildungsstand allein kein zuverlässiger Prädiktor für die Füllungsqualität ist (129).

Die Gesamtqualität wurde ausschließlich anhand des unmittelbar postoperativen Röntgenbildes beurteilt, sodass keine Aussagen über die langfristige Stabilität der Füllungsqualität oder eine Korrelation mit dem klinischen Behandlungsergebnis getroffen werden können. Zudem beschränkte sich die Bewertung auf zweidimensionale Röntgenaufnahmen, die projektionsbedingten Einschränkungen unterliegen und eine subjektive Variabilität der Beurteilung nicht vollständig ausschließen (133, 137, 143).

8.6 Postoperative Komplikationen und Hypothesenprüfung

In der vorliegenden Untersuchung wurden postoperative Komplikationen retrospektiv und dichotom erfasst, indem innerhalb eines Beobachtungszeitraums von 18 Monaten nach abgeschlossener Wurzelkanalfüllung dokumentiert wurde, ob ein klinisch relevantes Ereignis oder eine nachfolgende Intervention auftrat (z. B. Schmerzen, Schwellungen, Frakturen, Revision, Wurzelspitzenresektion, Extraktion). Dieses Vorgehen orientiert sich an patientenrelevanten Endpunkten, wie sie auch in methodischen Übersichten und Leitlinien betont werden. Die *ESE* empfiehlt den Behandlungserfolg nicht ausschließlich radiologisch, sondern unter Berücksichtigung klinischer Symptome und des Interventionsbedarfs zu beurteilen. Darüber hinaus verweisen Outcome-Analysen auf die Bedeutung symptom- und interventionsbezogener Ereignisse als Teil einer umfassenden Erfolgsbewertung (1, 118).

Die Entscheidung, einen Zeitraum von 18 Monaten einzubeziehen, beruht auf der Annahme, dass sich innerhalb dieses Intervalls sowohl akute als auch persistierende Komplikationen manifestieren können, die den klinischen Erfolg beeinflussen. Frühere Arbeiten konzentrierten sich dagegen überwiegend auf kurzfristige Beschwerden, insbesondere postoperative Schmerzen innerhalb der ersten 24–72 Stunden (113, 114). Diese Studien zeigen übereinstimmend, dass die meisten Schmerzen rasch abklingen und nur von geringer bis mittlerer Intensität sind, sodass eine ausschließliche Betrachtung dieser Frühphase das tatsächliche Komplikationsgeschehen unzureichend abbildet.

Die hier gewählte Definition schließt deshalb auch Spätkomplikationen ein, die eine therapeutische Intervention erfordern. Dadurch wird ein umfassenderes Verständnis postoperativer Verläufe ermöglicht, das sowohl subjektive Symptome (z. B. Schmerzen, Schwellung) als auch objektivierbare Folgeereignisse (z. B. Revision, Wurzelspitzenresektion, Extraktion) berücksichtigt. Während sogenannte Flare-ups in der Literatur typischerweise als akute, zwischen den Behandlungssitzungen auftretende Schmerz- oder Entzündungsreaktionen beschrieben werden, bezieht sich das in dieser Arbeit angewandte Konzept auf Ereignisse nach Abschluss der Behandlung (114). Damit wird das klassische Verständnis akuter Zwischenfälle auf den posttherapeutischen Zeitraum erweitert und ein differenzierteres Bild klinisch relevanter Komplikationen gewonnen. Durch die dichotome Klassifikation konnten Komplikationen einheitlich und reproduzierbar erfasst werden, was den etablierten methodischen Ansätzen klinischer Studien im Bereich der Endodontie entspricht (59, 144).

Die Gesamtkomplikationsrate betrug 18,4 % (30/163) für die laterale Kondensation mit AH Plus und 22,9 % (39/170) für die Einstifttechnik mit BC Sealer, ohne statistisch signifikanten Unterschied ($\chi^2 = 1,042$; $p = 0,307$; $\Phi = 0,056$). Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass der

periapikale Status im unmittelbar postoperativen Kontrollbild in beiden Gruppen vergleichbar war: Der Anteil pathologischer PAI-Befunde (Code 3–5) betrug 60,7 % bei AH Plus und 68,2 % bei BC Sealer, ohne statistisch signifikanten Unterschied ($p = 0,153$; $\Phi = 0,078$). Da radiologische Heilungsvorgänge periapikaler Läsionen erfahrungsgemäß mehrere Monate bis Jahre erfordern, bildet der PAI unmittelbar nach Wurzelkanalfüllung primär den prätherapeutischen Ausgangsbefund ab und ist nicht als Qualitätsmerkmal der Obturation zu interpretieren (32, 33). Die vergleichbaren PAI-Verteilungen beider Gruppen belegen die Homogenität des Patientenkollektivs hinsichtlich des prätherapeutischen periapikalen Zustands und stützen die Vergleichbarkeit beider Behandlungsgruppen. Eine abschließende Beurteilung des Behandlungserfolgs anhand des PAI wäre erst nach einem Nachbeobachtungszeitraum von mindestens vier bis fünf Jahren möglich, wie von der ESE empfohlen (1). Zur Einordnung dieser Raten ist zu berücksichtigen, dass vergleichbare Studien, die postoperative klinische Ereignisse über einen mittelfristigen Zeitraum erfassten, ähnliche Größenordnungen beschreiben. Polyzos et al. (2018) berichteten in ihrer 2- bis 5-jährigen Nachuntersuchung an 244 Zähnen von Studierenden, dass 27,2 % der Wurzeln einen unerwünschten Behandlungsausgang aufwiesen (129). Da in dieser Studie jedoch radiologische Heilungsparameter als Endpunkt dienten und nicht klinisch relevante Ereignisse wie Schmerzen oder Revisionen, ist ein direkter Vergleich eingeschränkt. Die vorliegende Studie verfolgte einen patientenzentrierten Ansatz, indem ausschließlich Ereignisse, die eine Wiedervorstellung oder Intervention erforderten, als Komplikation gewertet wurden, was dem Konzept einer umfassenden klinischen Erfolgsbewertung entspricht (34).

Die stratifizierte Analyse nach Ausbildungsstand bestätigte den Gesamtbefund: In keiner der drei Behandlergruppen zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Techniken hinsichtlich postoperativer Komplikationen. Bei Studierenden zu Beginn der klinischen Ausbildung lagen die Komplikationsraten bei 22,2 % (AH Plus) gegenüber 20,3 % (BC Sealer; $p = 0,807$), bei fortgeschrittenen Studierenden bei 20,4 % gegenüber 30,0 % ($p = 0,238$) und bei approbierten Behandlern bei 12,7 % gegenüber 17,6 % ($p = 0,480$). Die Effektstärken lagen in allen Gruppen im Bereich sehr geringer Zusammenhänge ($\Phi = 0,069$ bis $0,110$), sodass auch unter Berücksichtigung der Effektgröße kein klinisch relevanter Einfluss der Technik erkennbar war.

Die numerisch höhere Komplikationsrate der Einstifttechnik in der Gruppe der fortgeschrittenen Studierenden (30,0 % vs. 20,4 %) ist angesichts des fehlenden statistischen Signifikanzniveaus und der geringen Effektstärke nicht überinterpretierbar.

Inhaltlich lässt sich dieser Trend möglicherweise dadurch erklären, dass fortgeschrittene Studierende komplexere Fälle behandelten, was unabhängig von der Technik zu höheren Komplikationsraten beitragen kann.

In diesem Zusammenhang ist auch die Anzahl der Behandlungssitzungen zu berücksichtigen. Die Einstifttechnik mit BC Sealer war mit einer signifikant höheren Sitzungszahl assoziiert als die laterale Kondensation (Median 4,0 vs. 3,0; $p = 0,013$), wobei der absolute Unterschied numerisch gering ausfiel. Approbierte Behandler benötigten in beiden Techniken weniger Sitzungen als Studierende, was auf die zunehmende klinische Erfahrung sowie den Wegfall obligatorischer Kontrollsitzungen durch betreuende Zahnärzte im Ausbildungskontext zurückzuführen ist. Einschränkend ist zudem anzumerken, dass anhand der dokumentierten Sitzungszahl die tatsächliche Behandlungszeit nicht ermittelt werden konnte, da die Dauer der einzelnen Sitzungen retrospektiv nicht erfasst wurde. Die Anzahl der Sitzungen erlaubt daher keine direkte Aussage über den tatsächlichen zeitlichen Aufwand der jeweiligen Obturationstechnik. Die ausbleibende Erhöhung der Komplikationsrate trotz höherer Sitzungszahl in der BC-Sealer-Gruppe bestätigt frühere Beobachtungen, die keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich postoperativer Komplikationen zwischen ein- und mehrzeitiger Wurzelkanalbehandlung nachweisen konnten (48, 145). Zudem deuten Befunde darauf hin, dass mehrzeitige Behandlungen mit einem geringeren Flare-up-Risiko assoziiert sein können als einzeitige Behandlungen (145).

Außerdem ist bekannt, dass der erhöhte Sealeranteil bei der Einstifttechnik in Kombination mit kalziumsilikatbasierten Sealern zu häufigeren apikalen Extrusionen führen kann, die kurzfristig mit entzündlichen Reaktionen assoziiert sein können, langfristig jedoch meist ohne klinische Relevanz bleiben (97, 104, 142).

Die vorliegenden Ergebnisse werden durch klinische Studien gestützt, die speziell den Vergleich zwischen kalziumsilikatbasierten und epoxidharzbasierten Sealern hinsichtlich postoperativer Beschwerden untersuchten. In einer randomisierten klinischen Studie zeigte sich kein signifikanter Unterschied in Inzidenz oder Intensität postoperativer Schmerzen zwischen kalziumsilikatbasiertem Sealer mit der Einstifttechnik und AH Plus während des 7-tägigen Beobachtungszeitraums ($p > 0,05$) (146). Eine weitere randomisierte klinische Studie, die die Einstifttechnik mit kalziumsilikatbasiertem Sealer und der warm vertikalen Kondensation mit AH Plus verglich, fand bei einem mittleren Follow-up von 17 Monaten vergleichbare Schmerzverteilungen zwischen den Gruppen ($p = 0,973$). Hinsichtlich des Behandlungserfolgs, definiert als Abnahme des PAI-Scores und Auflösung der Symptome, zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Techniken, unabhängig davon, ob weite oder strenge Erfolgskriterien angelegt wurden (147).

Diese Befunde zeigen, dass die Überlegenheit einer Technik hinsichtlich des klinischen Outcomes auch in kontrollierten Studien nicht nachweisbar ist, was die vorliegenden Ergebnisse inhaltlich stützt und erklärt, warum trotz der radiologisch beobachteten technikspezifischen Unterschiede in der Füllungslänge keine Unterschiede im Komplikationsgeschehen auftraten.

Die fehlenden Unterschiede zwischen den Obturationstechniken hinsichtlich postoperativer Komplikationen sprechen dafür, dass die Wahl der Fülltechnik innerhalb des untersuchten klinischen Settings keinen dominierenden Einfluss auf den kurzfristigen bis mittelfristigen Behandlungserfolg besitzt. Vielmehr scheint das postoperative Outcome multifaktoriell bestimmt zu werden. So gelten die suffiziente chemomechanische Aufbereitung, die Reduktion der intrakanalären Mikroorganismen vor der Obturation sowie der präoperative periapikale Status als bedeutende prognostische Faktoren für den endodontischen Behandlungserfolg (4, 42, 59). Es ist daher plausibel, dass diese Faktoren neben der allgemeinen Fallkomplexität einen größeren Einfluss auf den klinischen Verlauf ausüben als die Wahl der Obturationstechnik. Dies könnte auch erklären, weshalb trotz der radiologisch beobachteten Unterschiede in der Füllungslänge kein relevanter Unterschied im klinischen Komplikationsgeschehen festgestellt werden konnte.

Darüber hinaus deutet der fehlende Einfluss der Technik über alle Ausbildungsstufen hinweg darauf hin, dass die weniger techniksensitive Einstifttechnik unter Ausbildungsbedingungen kein erhöhtes klinisches Risiko verursacht. Gleichzeitig ergaben sich jedoch auch keine Hinweise auf einen klinischen Vorteil gegenüber der lateralen Kondensation. Die ursprüngliche Annahme, dass insbesondere unerfahrene Behandler von der vereinfachten Handhabung der Einstifttechnik profitieren könnten, konnte anhand der vorliegenden Daten somit nicht bestätigt werden.

Kritisch anzumerken ist, dass die retrospektive Erfassung postoperativer Komplikationen auf dokumentierten Wiedervorstellungen basierte. Komplikationen, die nicht zu einer erneuten Vorstellung in der Klinik führten, wie beispielsweise selbstlimitierende Schmerzereignisse, konnten nicht erfasst werden, was möglicherweise zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Komplikationsrate führt. Darüber hinaus erlaubt der Beobachtungszeitraum von 18 Monaten keine Aussagen über Langzeitkomplikationen, die gemäß den Empfehlungen der ESE erst nach vier bis fünf Jahren vollständig beurteilbar sind (1).

Zusammenfassend liefern die vorliegenden Ergebnisse keine Evidenz dafür, dass die Wahl der Obturationstechnik das Risiko postoperativer Komplikationen innerhalb von 18 Monaten nach Wurzelkanalfüllung beeinflusst. Die Ergebnisse liefern somit keine Evidenz für einen

klinischen Vorteil der Einstifttechnik hinsichtlich postoperativer Komplikationen, sodass die Nullhypothese beibehalten wird.

8.7 Limitationen

Die vorliegende Untersuchung weist mehrere methodische Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

Als grundlegende Einschränkung ist das retrospektive Studiendesign zu nennen. Die Datenerhebung basierte ausschließlich auf vorhandenen Routinedaten aus Patientenakten und digitalen Dokumentationssystemen, ohne dass eine prospektive Erfassung klinischer Parameter erfolgte. Dies bedingt, dass die Vollständigkeit und Qualität der verfügbaren Daten von der jeweiligen klinischen Dokumentationspraxis abhängig ist. Eine nachträgliche Überprüfung der tatsächlichen Behandlungsabläufe war nicht möglich. So konnte retrospektiv nicht kontrolliert werden, ob beispielsweise Spülprotokolle konsequent eingehalten, Zwischenschritte korrekt durchgeführt oder klinische Standards einheitlich umgesetzt wurden. Außerdem wurden die bei der Wurzelkanalaufbereitung verwendeten Feilensysteme nicht in die Analyse einbezogen, da die zugrunde liegende Dokumentation keine eindeutige Zuordnung der verwendeten Systeme zuließ. Diese intraoperativen Faktoren können sowohl die Qualität der Obturation als auch das postoperative Komplikationsgeschehen beeinflussen, waren jedoch im Rahmen des gewählten Studiendesigns nicht verifizierbar. Ebenso konnten individuelle Unterschiede zwischen den Behandlern sowie Variationen in der Intensität der klinischen Supervision nicht vollständig standardisiert werden. Zwar sind bei den Behandlungen durch die Studierenden gewisse Teilschritte vorzuzeigen, jedoch variiert die zeitliche Supervision individuell.

Die Zuweisung der Patienten zu den Behandlungsgruppen erfolgte nicht randomisiert, sondern ergab sich aus der zum Behandlungszeitpunkt in der Poliklinik verwendeten Obturationstechnik. Unterschiede in der Fallkomplexität zwischen den Gruppen können daher nicht vollständig ausgeschlossen werden. Zu berücksichtigen ist zudem, dass die Einführung der Einstifttechnik mit kalziumsilikatbasiertem Sealer zeitlich nach der Anwendung der lateralen Kondensation erfolgte, sodass zeitabhängige Effekte wie eine zunehmende klinische Erfahrung der Behandler oder Veränderungen in den Behandlungsabläufen nicht vollständig kontrolliert werden konnten. Auch Unterschiede in der anatomischen und klinischen Komplexität der behandelten Zähne, etwa hinsichtlich Kanalgeometrie, Wurzelkrümmung oder dem Vorliegen periapikaler Läsionen, stellen potenzielle Störfaktoren dar, die sowohl die Behandlungsdauer als auch das Risiko postoperativer Komplikationen beeinflussen können. Hinsichtlich der Erfassung postoperativer Komplikationen ist einschränkend anzumerken, dass diese ausschließlich auf dokumentierten Wiedervorstellungen in der universitären Poliklinik basierte. Komplikationen, die außerhalb dieser Einrichtung behandelt wurden,

konnten nicht erfasst werden. Es ist daher anzunehmen, dass ein Teil der Patienten bei Beschwerden alternative Versorgungsstrukturen in Anspruch nahmen, ohne dass diese Ereignisse in die Auswertung einfließen. Darüber hinaus wurden selbstlimitierende Beschwerden, wie kurzfristige Schmerzeignisse oder leichte Schwellungen ohne Interventionsbedarf, systematisch nicht dokumentiert, was zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Komplikationsrate geführt haben dürfte.

Erschwerend kommt hinzu, dass eine standardisierte Erfassung der Symptomschwere, beispielsweise mittels visueller Analogskala fehlte, sodass eine differenzierte Bewertung der klinischen Relevanz der Komplikationen nicht möglich war.

Die radiologische Qualitätsbewertung erfolgte ausschließlich anhand zweidimensionaler intraoraler Röntgenaufnahmen. Dieses Verfahren unterliegt projektionsbedingten Einschränkungen und erlaubt keine dreidimensionale Beurteilung der Füllungsqualität. Vor allem können Hohlräume oder Unregelmäßigkeiten in der bucco-lingualen Ebene sowie in komplexen Kanalverläufen nicht zuverlässig abgebildet werden. Obwohl dreidimensionale Verfahren wie die digitale Volumentomographie eine höhere diagnostische Sensitivität aufweisen, ist deren routinemäßiger Einsatz zur Qualitätskontrolle nach Wurzelkanalbehandlung aufgrund der erhöhten Strahlenexposition nicht indiziert (136). Darüber hinaus unterliegt die radiologische Beurteilung trotz Kalibrierung einer gewissen subjektiven Variabilität, die auch bei guter Interrater-Reliabilität ($Kappa = 0,82$) nicht vollständig ausgeschlossen werden kann.

Schließlich ist der Beobachtungszeitraum von 18 Monaten als limitierend einzustufen. Langzeitkomplikationen sowie vollständige periapikale Heilungsprozesse lassen sich innerhalb dieses Zeitraums nicht abschließend beurteilen. Gemäß den Empfehlungen der ESE sind hierfür Nachbeobachtungszeiträume von vier bis fünf Jahren erforderlich (1). Die vorliegenden Ergebnisse erlauben daher primär Aussagen über das kurz- bis mittelfristige Komplikationsgeschehen. Die Übertragbarkeit der Befunde auf die allgemein Zahnärztliche Versorgung ist eingeschränkt, da die Behandlungen unter universitären Bedingungen mit standardisierter Supervision durchgeführt wurden.

Trotz dieser Einschränkungen stellt die vorliegende Untersuchung aufgrund der konsequenten Anwendung definierter Ein- und Ausschlusskriterien, der Kalibrierung der Untersucher sowie der Analyse eines für universitäre Studien angemessenen Kollektivs von 333 Fällen eine methodisch solide Grundlage zur Beantwortung der formulierten Fragestellungen dar.

8.8 Schlussfolgerung und Ausblick

Die vorliegende retrospektive Untersuchung an 333 mehrwurzeligen Zähnen zeigt, dass die Einstifttechnik mit kalziumsilikatbasiertem Sealer (BC Sealer) hinsichtlich der radiologischen Füllungsqualität und des postoperativen Komplikationsgeschehens eine gleichwertige Alternative zur lateralen Kondensation mit epoxidharzbasiertem Sealer (AH Plus) darstellt. Weder hinsichtlich der Gesamtqualität der Wurzelkanalfüllung noch hinsichtlich des Auftretens postoperativer Komplikationen innerhalb von 18 Monaten nach Behandlungsabschluss ergaben sich statistisch signifikante Unterschiede zwischen den beiden Techniken. Die H_1 -Hypothese wird damit verworfen, die H_0 -Hypothese beibehalten.

Die Gleichwertigkeit beider Techniken zeigte sich dabei unabhängig vom Ausbildungsstand der Behandler. Studierende zu Beginn der klinischen Ausbildung, fortgeschrittene Studierende und approbierte Behandler erzielten mit beiden Verfahren vergleichbare Ergebnisse, ohne dass die Technikwahl einen entscheidenden Einfluss auf die Füllungsqualität hatte. Der Ausbildungsstand allein erwies sich damit nicht als ausschlaggebender Prädiktor für die erzielte Behandlungsqualität. Die auffällig hohe Gesamtqualität der Anfangssemester-Studierenden deutet darauf hin, dass strukturierte Supervision und standardisierte Ausbildungsbedingungen einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätssicherung leisten können.

Für die klinische Lehre legen die vorliegenden Ergebnisse nahe, dass die Einstifttechnik mit kalziumsilikatbasiertem Sealer als gleichwertige und technisch weniger anspruchsvolle Alternative in der endodontischen Ausbildung integriert werden kann. Ihre einfachere Handhabung und der geringere Zeitaufwand in der Obturationsdurchführung könnten insbesondere im studentischen Ausbildungskontext Vorteile bieten, ohne dass dabei Abstriche bei der Behandlungsqualität oder dem klinischen Outcome in Kauf genommen werden müssen.

Für zukünftige Untersuchungen wären prospektiv angelegte Studien mit längeren Nachbeobachtungszeiträumen von mindestens vier bis fünf Jahren empfehlenswert, um den Langzeiterfolg beider Techniken abschließend beurteilen zu können. Eine kombinierte klinisch-radiologische Erfassung der Behandlungsergebnisse unter Einbeziehung standardisierter Symptombdokumentation und regelmäßiger Recalluntersuchungen würde eine differenziertere Bewertung postoperativer Verläufe ermöglichen. Darüber hinaus wäre die Etablierung standardisierter Behandlungsabläufe, beispielsweise hinsichtlich des Aufbereitungsprotokolls, der Kanalspülung und der Sealer-Applikation, wünschenswert, um behandlerbedingte Variablen zu minimieren und die Vergleichbarkeit zukünftiger Studien zu verbessern.

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit basiert auf einer retrospektiven Analyse röntgenologischer und klinischer Daten von Wurzelkanalbehandlungen an mehrwurzeligen Zähnen im universitären Ausbildungskontext. Ziel war es, die laterale Kondensation mit AH Plus und die Einstifttechnik mit kalziumsilikatbasiertem Sealer hinsichtlich ihrer radiologischen Qualität, postoperativen Komplikationen sowie ihrer Eignung für die studentische Ausbildung zu vergleichen. Klinische Vergleichsdaten aus dem universitären Lehrkontext an mehrwurzeligen Zähnen lagen bislang nur begrenzt vor. Bestehende Studien konzentrierten sich überwiegend auf radiologische Qualitätsparameter oder Überlebensanalysen, während ein direkter Vergleich beider Techniken hinsichtlich postoperativer Komplikationsraten im Ausbildungskontext bislang fehlte.

Die Ergebnisse zeigen, dass beide Obturationstechniken zu vergleichbaren Resultaten hinsichtlich der Gesamtqualität führen. Diese wurde dabei anhand einer kombinierten Bewertung von Füllungslänge und Homogenität der Wurzelfüllung beurteilt. Als ideal galt eine Wurzelfüllung, die am radiologischen Apex oder bis maximal 2 mm davor endete und gleichzeitig keine radiologisch erkennbaren Hohlräume aufwies. Wurzelfüllungen, die eines oder beide dieser Kriterien nicht erfüllten, wurden als nicht ideale Gesamtqualität eingestuft. Während sich für die Homogenität keine signifikanten Unterschiede nachweisen ließen, zeigten sich bei der Füllungslänge unterschiedliche, jedoch charakteristische Abweichungsmuster. Die laterale Kondensation war häufiger mit unterfüllten Kanälen assoziiert, wohingegen bei der Einstifttechnik vermehrt apikale Extrusionen beobachtet wurden. Diese Unterschiede führten jedoch nicht zu einer unterschiedlichen Gesamtbewertung der Füllungsqualität.

Auch im Hinblick auf postoperative Komplikationen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Techniken festgestellt werden. Die beobachteten Komplikationsraten liegen im Bereich der in der Literatur beschriebenen Werte und bestätigen, dass die Wahl der Obturationstechnik keinen entscheidenden Einfluss auf das kurz- bis mittelfristige klinische Outcome hat.

Der Ausbildungsstand der Behandler zeigte hingegen einen Einfluss auf die erzielte Qualität. Auffällig war, dass Studierende in frühen Ausbildungsphasen die höchsten Anteile idealer Wurzelkanalfüllungen erreichten. Dies ist vermutlich auf eine intensivere Supervision sowie auf eine geringere Fallkomplexität zurückzuführen. Mit zunehmender klinischer Erfahrung scheint hingegen die steigende Schwierigkeit der behandelten Fälle einen kompensierenden Effekt zu haben, sodass sich insgesamt keine lineare Verbesserung der Ergebnisqualität ergibt.

Vor dem Hintergrund des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstands ordnen sich die vorliegenden Ergebnisse in eine wachsende Zahl von Studien ein, die keine Überlegenheit

einer spezifischen Obturationstechnik nachweisen konnten. Die Einstifttechnik mit kalziumsilikatbasiertem Sealer zeigt unter klinischen Bedingungen eine mit der etablierten lateralen Kondensation vergleichbare Leistungsfähigkeit.

Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass die Einstifttechnik aufgrund ihrer einfacheren Handhabung eine geeignete Alternative im endodontischen Ausbildungskontext darstellt, ohne dabei Einbußen in der Behandlungsqualität oder Patientensicherheit zu verursachen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund moderner Materialentwicklungen und der zunehmenden klinischen Relevanz kalziumsilikatbasierter Sealer von Bedeutung.

Gleichzeitig sind die Limitationen des retrospektiven Studiendesigns zu berücksichtigen. Vor allem die fehlende Randomisierung, mögliche Unterschiede in der Fallkomplexität sowie der begrenzte Beobachtungszeitraum erlauben keine abschließenden Aussagen zum Langzeiterfolg. Zukünftige prospektive Studien mit standardisierten Behandlungsprotokollen und längeren Follow-up-Zeiträumen sind erforderlich, um die vorliegenden Ergebnisse weiter zu validieren.

Insgesamt trägt die vorliegende Arbeit dazu bei, die klinische Bewertung moderner Obturationstechniken im universitären Ausbildungskontext zu präzisieren und liefert eine Grundlage für die Weiterentwicklung endodontischer Ausbildungskonzepte.

10 Literaturverzeichnis

1. European Society of Endodontology. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J.* 2006;39(12):921-30.
2. León-López M, Cabanillas-Balsera D, Martín-González J, Montero-Mirallas P, Saúco-Márquez JJ, Segura-Egea JJ. Prevalence of root canal treatment worldwide: A systematic review and meta-analysis. *Int Endod J.* 2022;55(11):1105-27.
3. Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung. Jahrbuch 2024: Statistische Basisdaten zur vertragszahnärztlichen Versorgung. Köln: KZBV; 2024.
4. Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K. Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature -- Part 2. Influence of clinical factors. *Int Endod J.* 2008;41(1):6-31.
5. Nair PNR. Pathogenesis of apical periodontitis and the causes of endodontic failures. *Crit Rev Oral Biol Med.* 2004;15(6):348-81.
6. Burns LE, Kim J, Wu Y, Alzwaideh R, McGowan R, Sigurdsson A. Outcomes of primary root canal therapy: An updated systematic review of longitudinal clinical studies published between 2003 and 2020. *Int Endod J.* 2022;55(7):714-31.
7. Young GR, Parashos P, Messer HH. The principles of techniques for cleaning root canals. *Aust Dent J.* 2007;52(1 Suppl):S52-63.
8. Komabayashi T, Colmenar D, Cvach N, Bhat A, Primus C, Imai Y. Comprehensive review of current endodontic sealers. *Dent Mater J.* 2020;39(5):703-20.
9. Šimundić Munitić M, Poklepović Perićić T, Utrobičić A, Bago I, Puljak L. Antimicrobial efficacy of commercially available endodontic bioceramic root canal sealers: A systematic review. *PLoS One.* 2019;14(10):e0223575.
10. Burry JC, Stover S, Eichmiller F, Bhagavatula P. Outcomes of Primary Endodontic Therapy Provided by Endodontic Specialists Compared with Other Providers. *J Endod.* 2016;42(5):702-5.
11. Ng YL, Mann V, Gulabivala K. Tooth survival following non-surgical root canal treatment: a systematic review of the literature. *Int Endod J.* 2010;43(3):171-89.
12. Castellet-Enkel B, Nguyen JM, Armengol V, Volteau C, Laboux O, Lombrail P, et al. A recall program for the outcome of conventional root canal treatment performed in a teaching hospital. *Acta Odontol Scand.* 2013;71(6):1399-409.
13. Hamasha AA, Hatiwsh A. Quality of life and satisfaction of patients after nonsurgical primary root canal treatment provided by undergraduate students, graduate students and endodontic specialists. *Int Endod J.* 2013;46(12):1131-9.
14. Hülsmann M, Heppeler J. Epidemiologische Aspekte der Parodontitis apicalis. *Endodontie* 2008;17(1):19-21.
15. Fabricius L, Dahlén G, Holm SE, Möller AJ. Influence of combinations of oral bacteria on periapical tissues of monkeys. *Scand J Dent Res.* 1982;90(3):200-6.

16. Reeves R, Stanley HR. The relationship of bacterial penetration and pulpal pathosis in carious teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1966;22(1):59-65.
17. Love RM. Bacterial penetration of the root canal of intact incisor teeth after a simulated traumatic injury. *Endod Dent Traumatol.* 1996;12(6):289-93.
18. Langeland K, Rodrigues H, Dowden W. Periodontal disease, bacteria, and pulpal histopathology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1974;37(2):257-70.
19. Behrends J, Bischofberger J, Deutzmann R, Ehmke H, Frings S, Grissmer S, et al. *Duale Reihe Physiologie.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2010. 193-222 p.
20. Siqueira JFJ. *Treatment of Endodontic Infections.* 1 ed. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH; 2011.
21. Abbott PV, Yu C. A clinical classification of the status of the pulp and the root canal system. *Aust Dent J.* 2007;52(1 Suppl):S17-31.
22. Krell KV, Rivera EM. A six year evaluation of cracked teeth diagnosed with reversible pulpitis: treatment and prognosis. *J Endod.* 2007;33(12):1405-7.
23. Ricucci D, Loghin S, Siqueira JF, Jr. Correlation between clinical and histologic pulp diagnoses. *J Endod.* 2014;40(12):1932-9.
24. Kong YY, Feige U, Sarosi I, Bolon B, Tafuri A, Morony S, et al. Activated T cells regulate bone loss and joint destruction in adjuvant arthritis through osteoprotegerin ligand. *Nature.* 1999;402(6759):304-9.
25. Lacey DL, Timms E, Tan HL, Kelley MJ, Dunstan CR, Burgess T, et al. Osteoprotegerin ligand is a cytokine that regulates osteoclast differentiation and activation. *Cell.* 1998;93(2):165-76.
26. Klein DC, Raisz LG. Prostaglandins: stimulation of bone resorption in tissue culture. *Endocrinology.* 1970;86(6):1436-40.
27. Bertolini DR, Nedwin GE, Bringman TS, Smith DD, Mundy GR. Stimulation of bone resorption and inhibition of bone formation in vitro by human tumour necrosis factors. *Nature.* 1986;319(6053):516-8.
28. Nguyen L, Dewhirst FE, Hauschka PV, Stashenko P. Interleukin-1 beta stimulates bone resorption and inhibits bone formation in vivo. *Lymphokine Cytokine Res.* 1991;10(1-2):15-21.
29. Pourhajibagher M, Bahador A. An in vivo evaluation of microbial diversity before and after the photo-activated disinfection in primary endodontic infections: Traditional phenotypic and molecular approaches. *Photodiagnosis Photodyn Ther.* 2018;22:19-25.
30. Gomes BP, Lilley JD, Drucker DB. Associations of endodontic symptoms and signs with particular combinations of specific bacteria. *Int Endod J.* 1996;29(2):69-75.
31. Fransson H, Dawson V. Tooth survival after endodontic treatment. *Int Endod J.* 2023;56 Suppl 2:140-53.
32. Ørstavik D, Kerekes K, Eriksen HM. The periapical index: a scoring system for radiographic assessment of apical periodontitis. *Endod Dent Traumatol.* 1986;2(1):20-34.

33. Radwanski M, Pietrzycka K, Eyüboğlu TF, Özcan M, Lukomska-Szymanska M. Clinical outcome of non-surgical root canal treatment using different sealers and techniques of obturation in 237 patients: A retrospective study. *Clin Oral Investig*. 2024;28(9):479.
34. Duncan HF, Nagendrababu V, El-Karim I, Dummer PMH. Outcome measures to assess the effectiveness of endodontic treatment for pulpitis and apical periodontitis for use in the development of European Society of Endodontology S3-level clinical practice guidelines: A consensus-based development. *Int Endod J*. 2021;54(12):2184-94.
35. Pineda F, Kuttler Y. Mesiodistal and buccolingual roentgenographic investigation of 7,275 root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1972;33(1):101-10.
36. Hellwig E, Schäfer E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung : Prüfungswissen Kariologie und Parodontologie. Köln, Germany: Deutscher Ärzte-Verlag; 2023.
37. Anderegg AL, Hajdarevic D, Wolf TG. Interradicular Canals in 213 Mandibular and 235 Maxillary Molars by Means of Micro-computed Tomographic Analysis: An Ex Vivo Study. *J Endod*. 2022;48(2):234-9.
38. Weine F. Endodontic therapy. 3rd ed. St. Louis: CV Mosby Co.; 1982.
39. Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1984;58(5):589-99.
40. Torres A, Jacobs R, Lambrechts P, Brizuela C, Cabrera C, Concha G, et al. Characterization of mandibular molar root and canal morphology using cone beam computed tomography and its variability in Belgian and Chilean population samples. *Imaging Sci Dent*. 2015;45(2):95-101.
41. Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ. The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*. 1965;20:340-9.
42. Bystrom A, Happonen RP, Sjogren U, Sundqvist G. Healing of periapical lesions of pulpless teeth after endodontic treatment with controlled asepsis. *Endod Dent Traumatol*. 1987;3(2):58-63.
43. Bürklein S, Schäfer E. Präparationsbedingte Wurzelkanalbegradigungen - Eine kritische Bewertung. *Endodontie* 2015;24(1):37-50.
44. Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH. Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics*. 2005;10(1):30-76.
45. Geurtsen W, Heidemann D, Löst C, Petschelt A, Raab W, Schäfer E, et al. Zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen. *Dtsch Zahnarztl Z*. 2000;56:1-4.
46. Field JW, Gutmann JL, Solomon ES, Rakusin H. A clinical radiographic retrospective assessment of the success rate of single-visit root canal treatment. *Int Endod J*. 2004;37(1):70-82.
47. Hannahan JP, Eleazer PD. Comparison of success of implants versus endodontically treated teeth. *J Endod*. 2008;34(11):1302-5.

48. Peters LB, Wesselink PR. Periapical healing of endodontically treated teeth in one and two visits obturated in the presence or absence of detectable microorganisms. *Int Endod J.* 2002;35(8):660-7.
49. Pekruhn RB. The incidence of failure following single-visit endodontic therapy. *J Endod.* 1986;12(2):68-72.
50. Llana C, Nicolescu T, Perez S, Gonzalez de Pereda S, Gonzalez A, Alarcon I, et al. Outcome of Root Canal Treatments Provided by Endodontic Postgraduate Students. A Retrospective Study. *J Clin Med.* 2020;9(6):1994.
51. Friedman S, Abitbol S, Lawrence HP. Treatment outcome in endodontics: the Toronto Study. Phase 1: initial treatment. *J Endod.* 2003;29(12):787-93.
52. Kojima K, Inamoto K, Nagamatsu K, Hara A, Nakata K, Morita I, 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(1):95-9.
53. Shakiba B, Hamedy R, Pak JG, Barbizam JV, Ogawa R, White SN. Influence of increased patient age on longitudinal outcomes of root canal treatment: a systematic review. *Gerodontology.* 2017;34(1):101-9.
54. Landys Borén D, Jonasson P, Kvist T. Long-term survival of endodontically treated teeth at a public dental specialist clinic. *J Endod.* 2015;41(2):176-81.
55. Rodig T, Vu MT, Kanzow P, Haupt F. Long-term survival of endodontically treated teeth: A retrospective analysis of predictive factors at a German dental school. *J Dent.* 2025;156:105662.
56. Kwak Y, Choi J, Kim K, Shin SJ, Kim S, Kim E. The 5-Year Survival Rate of Nonsurgical Endodontic Treatment: A Population-based Cohort Study in Korea. *J Endod.* 2019;45(10):1192-9.
57. Stoll R, Betke K, Stachniss V. The influence of different factors on the survival of root canal fillings: a 10-year retrospective study. *J Endod.* 2005;31(11):783-90.
58. Kebke S, Fransson H, Brundin M, Mota de Almeida FJ. Tooth survival following root canal treatment by general dental practitioners in a Swedish county - a 10-year follow-up study of a historical cohort. *Int Endod J.* 2021;54(1):5-14.
59. Ng YL, Mann V, Gulabivala K. A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: part 1: periapical health. *Int Endod J.* 2011;44(7):583-609.
60. Iqbal A. The Factors Responsible for Endodontic Treatment Failure in the Permanent Dentitions of the Patients Reported to the College of Dentistry, the University of Aljouf, Kingdom of Saudi Arabia. *J Clin Diagn Res.* 2016;10(5):Zc146-8.
61. Dammaschke T, Nykiel K, Sagheri D, Schäfer E. Influence of coronal restorations on the fracture resistance of root canal-treated premolar and molar teeth: a retrospective study. *Aust Endod J.* 2013;39(2):48-56.
62. Spångberg L. Endodontic filling materials. In: Smith D, Williams D, editors. *Biocompatibility of Dental Materials* Boca Raton CRC Press; 1982. p. 223–57.
63. Ørstavik D. Materials used for root canal obturation: technical, biological and clinical testing. *Endodontic Topics.* 2006;12(1):25-38.

64. Geurtsen W, Leyhausen G. Biological aspects of root canal filling materials - histocompatibility, cytotoxicity, and mutagenicity. *Clin Oral Investig*. 1997;1:5-11.
65. Combe EC, Cohen BD, Cummings K. Alpha- and beta-forms of gutta-percha in products for root canal filling. *Int Endod J*. 2001;34(6):447-51.
66. Lohbauer U, Gambarini G, Ebert J, Dasch W, Petschelt A. Calcium release and pH-characteristics of calcium hydroxide plus points. *Int Endod J*. 2005;38(10):683-9.
67. Lui JN, Sae-Lim V, Song KP, Chen NN. In vitro antimicrobial effect of chlorhexidine-impregnated gutta percha points on *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J*. 2004;37(2):105-13.
68. Chogle S, Mickel AK, Huffaker SK, Neibaur B. An in vitro assessment of iodoform gutta-percha. *J Endod*. 2005;31(11):814-6.
69. Grossman LI. *Endodontic practice*. 8th ed. Philadelphia: Lea & Febiger; 1974.
70. Shipper G, Ørstavik D, Teixeira FB, Trope M. An evaluation of microbial leakage in roots filled with a thermoplastic synthetic polymer-based root canal filling material (Resilon). *J Endod*. 2004;30(5):342-7.
71. Kowalewska A, Majewska-Smolarek K. Eugenol-Based Polymeric Materials-Antibacterial Activity and Applications. *Antibiotics (Basel)*. 2023;12(11).
72. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M. Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against *Enterococcus faecalis*. *J Endod*. 2009;35(7):1051-5.
73. Kim HR, Kim YK, Kwon TY. Post space preparation timing of root canals sealed with AH Plus sealer. *Restor Dent Endod*. 2017;42(1):27-33.
74. Coltène/Whaledent. *Guttaflow instruction for use*. Coltène/Whaledent Inc.; 2008.
75. Bouillaguet S, Shaw L, Barthelemy J, Krejci I, Wataha JC. Long-term sealing ability of Pulp Canal Sealer, AH-Plus, GuttaFlow and Epiphany. *Int Endod J*. 2008;41(3):219-26.
76. Hosoya N, Takahashi G, Arai T, Nakamura J. Calcium concentration and pH of the periapical environment after applying calcium hydroxide into root canals in vitro. *J Endod*. 2001;27(5):343-6.
77. Gatewood RS. Endodontic materials. *Dent Clin North Am*. 2007;51(3):695-712, vii.
78. Desai S, Chandler N. Calcium hydroxide-based root canal sealers: a review. *J Endod*. 2009;35(4):475-80.
79. Kumar RV, Shruthi C. Evaluation of the sealing ability of resin cement used as a root canal sealer: An in vitro study. *J Conserv Dent*. 2012;15(3):274-7.
80. Branstetter J, von Fraunhofer JA. The physical properties and sealing action of endodontic sealer cements: a review of the literature. *J Endod*. 1982;8(7):312-6.
81. Allan NA, Walton RC, Schaeffer MA. Setting times for endodontic sealers under clinical usage and in vitro conditions. *J Endod*. 2001;27(6):421-3.

82. McMichen FR, Pearson G, Rahbaran S, Gulabivala K. A comparative study of selected physical properties of five root-canal sealers. *Int Endod J*. 2003;36(9):629-35.
83. Bae WJ, Chang SW, Lee SI, Kum KY, Bae KS, Kim EC. Human periodontal ligament cell response to a newly developed calcium phosphate-based root canal sealer. *J Endod*. 2010;36(10):1658-63.
84. Han L, Okiji T. Uptake of calcium and silicon released from calcium silicate-based endodontic materials into root canal dentine. *Int Endod J*. 2011;44(12):1081-7.
85. Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF. Dentin-cement interfacial interaction: calcium silicates and polyalkenoates. *J Dent Res*. 2012;91(5):454-9.
86. Álvarez-Vásquez JL, Erazo-Guijarro MJ, Domínguez-Ordoñez GS, Ortiz-Garay É M. Epoxy resin-based root canal sealers: An integrative literature review. *Dent Med Probl*. 2024;61(2):279-91.
87. Chopra V, Davis G, Baysan A. Physico-Chemical Properties of Calcium-Silicate vs. Resin Based Sealers-A Systematic Review and Meta-Analysis of Laboratory-Based Studies. *Materials (Basel)*. 2021;15(1).
88. Abu Zeid ST, Alnoury A. Characterisation of the Bioactivity and the Solubility of a New Root Canal Sealer. *Int Dent J*. 2023;73(5):760-9.
89. Mak ST, Leong XF, Tew IM, Kumolosasi E, Wong L. In Vitro Evaluation of the Antibacterial Activity of EndoSeal MTA, iRoot SP, and AH Plus against Planktonic Bacteria. *Materials (Basel)*. 2022;15(6).
90. Stuart CH, Schwartz SA, Beeson TJ, Owatz CB. *Enterococcus faecalis*: its role in root canal treatment failure and current concepts in retreatment. *J Endod*. 2006;32(2):93-8.
91. Sonntag D, Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH, editors. *Das kleine 1×1 der Endodontie*. 1 ed. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH; 2024.
92. Sipert CR, Hussne RP, Nishiyama CK, Torres SA. In vitro antimicrobial activity of Fill Canal, Sealapex, Mineral Trioxide Aggregate, Portland cement and EndoRez. *Int Endod J*. 2005;38(8):539-43.
93. Leonardo MR, Bezerra da Silva LA, Filho MT, Santana da Silva R. Release of formaldehyde by 4 endodontic sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 1999;88(2):221-5.
94. Kayaoglu G, Erten H, Alaçam T, Ørstavik D. Short-term antibacterial activity of root canal sealers towards *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J*. 2005;38(7):483-8.
95. Pizzo G, Giammanco GM, Cumbo E, Nicolosi G, Gallina G. In vitro antibacterial activity of endodontic sealers. *J Dent*. 2006;34(1):35-40.
96. Alsofi L. Bioactivity and Element Composition of Three Endodontic Root Canal Sealers. *J Contemp Dent Pract*. 2025;26(1):62-70.
97. Candeiro GT, Correia FC, Duarte MA, Ribeiro-Siqueira DC, Gavini G. Evaluation of radiopacity, pH, release of calcium ions, and flow of a bioceramic root canal sealer. *J Endod*. 2012;38(6):842-5.

98. Yang R, Tian J, Huang X, Lei S, Cai Y, Xu Z, et al. A comparative study of dentinal tubule penetration and the retreatability of EndoSequence BC Sealer HiFlow, iRoot SP, and AH Plus with different obturation techniques. *Clin Oral Investig*. 2021;25(6):4163-73.
99. Verma A, Arora A, Taneja S. Comparative evaluation of dentinal tubule penetration and push-out bond strength of new injectable hydraulic calcium disilicate based root canal sealer: A single blinded in vitro study. *J Oral Biol Craniofac Res*. 2024;14(2):143-51.
100. Estivalet MS, de Araújo LP, Immich F, da Silva AF, Ferreira NS, da Rosa WLO, et al. Bioactivity Potential of Bioceramic-Based Root Canal Sealers: A Scoping Review. *Life (Basel)*. 2022;12(11).
101. Zhang W, Li Z, Peng B. Ex vivo cytotoxicity of a new calcium silicate-based canal filling material. *Int Endod J*. 2010;43(9):769-74.
102. Zhou HM, Shen Y, Zheng W, Li L, Zheng YF, Haapasalo M. Physical properties of 5 root canal sealers. *J Endod*. 2013;39(10):1281-6.
103. Qu W, Bai W, Liang YH, Gao XJ. Real temperature of the continuous-wave pluggers. *Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban*. 2015;47(5):834-7.
104. Giacomino CM, Wealleans JA, Kuhn N, Diogenes A. Comparative Biocompatibility and Osteogenic Potential of Two Bioceramic Sealers. *J Endod*. 2019;45(1):51-6.
105. Oltra E, Cox TC, LaCourse MR, Johnson JD, Paranjpe A. Retreatability of two endodontic sealers, EndoSequence BC Sealer and AH Plus: a micro-computed tomographic comparison. *Restor Dent Endod*. 2017;42(1):19-26.
106. AERA-Online GmbH. TotalFill BC Sealer – Produktinformation und Preis 2026 [zitiert am 25.01.2026, URL: <https://www.aera-online.de/Asps/Artikel.asp?gArtikelID=552649>].
107. AERA-Online GmbH. AH Plus Sealer – Produktinformation und Preis 2026 [zitiert am 25.01.2026, URL: <https://www.aera-online.de/Asps/Artikel.asp?gArtikelID=279715>].
108. El Sayed MA, El Sayed NM. Comparative Evaluation of Two Obturation Techniques and Three Endodontic Sealers in Filling Lateral Canals: An In Vitro Study. *J Contemp Dent Pract*. 2025;26(1):25-33.
109. Drukteinis S. Root canal obturation techniques with hydraulic calcium silicate-based materials. *Clinical Dentistry Reviewed*. 2021;5(1):22.
110. Nouroloyouni A, Samadi V, Salem Milani A, Noorolouny S, Valizadeh-Haghi H. Single Cone Obturation versus Cold Lateral Compaction Techniques with Bioceramic and Resin Sealers: Quality of Obturation and Push-Out Bond Strength. *Int J Dent*. 2023;2023:3427151.
111. Barcelos Só G, Abrahão NB, Weissheimer T, Lenzi TL, Reis Só MV, da Rosa RA. Effect of Obturation Techniques on the Quality of Root Canal Fillings: A Systematic Review and Meta-analysis of in Vitro Studies. *Iran Endod J*. 2024;19(2):61-74.
112. Mahmoud Hamdy Abada H, Abd El Rahman El Shreif M, Mohamed Ahmed Ghonimy F, Osama Abo El-Mal E, Saeed Abd Elmonem El Gemaie D. The effect of different obturation techniques on post-obturation pain and sealer extrusion in single-visit root canal treatment: a prospective clinical randomized study. *Clin Oral Investig*. 2025;29(10):445.

113. Pak JG, White SN. Pain prevalence and severity before, during, and after root canal treatment: a systematic review. *J Endod.* 2011;37(4):429-38.
114. Sathorn C, Parashos P, Messer H. The prevalence of postoperative pain and flare-up in single- and multiple-visit endodontic treatment: a systematic review. *Int Endod J.* 2008;41(2):91-9.
115. Torabinejad M, Kettering JD, McGraw JC, Cummings RR, Dwyer TG, Tobias TS. Factors associated with endodontic interappointment emergencies of teeth with necrotic pulps. *J Endod.* 1988;14(5):261-6.
116. Torabinejad M, Hong CU, Lee SJ, Monsef M, Pitt Ford TR. Investigation of mineral trioxide aggregate for root-end filling in dogs. *J Endod.* 1995;21(12):603-8.
117. Gillen BM, Looney SW, Gu L-S, Loushine BA, Weller RN, Loushine RJ, et al. Impact of the Quality of Coronal Restoration versus the Quality of Root Canal Fillings on Success of Root Canal Treatment: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Endod.* 2011;37(7):895-902.
118. AlRahabi MK. Evaluation of complications of root canal treatment performed by undergraduate dental students. *Libyan J Med.* 2017;12(1):1345582.
119. Pettiette MT, Metzger Z, Phillips C, Trope M. Endodontic complications of root canal therapy performed by dental students with stainless-steel K-files and nickel-titanium hand files. *J Endod.* 1999;25(4):230-34.
120. Panitvisai P, Parunnit P, Sathorn C, Messer HH. Impact of a retained instrument on treatment outcome: a systematic review and meta-analysis. *J Endod.* 2010;36(5):775-80.
121. Fuss Z, Lustig J, Katz A, Tamse A. An evaluation of endodontically treated vertical root fractured teeth: impact of operative procedures. *J Endod.* 2001;27(1):46-8.
122. Ribeiro DM, Réus JC, Felipe WT, Pacheco-Pereira C, Dutra KL, Santos JN, et al. Technical quality of root canal treatment performed by undergraduate students using hand instrumentation: a meta-analysis. *Int Endod J.* 2018;51(3):269-83.
123. Lynch CD, Burke FM. Quality of root canal fillings performed by undergraduate dental students on single-rooted teeth. *Eur J Dent Educ.* 2006;10(2):67-72.
124. Barrieshi-Nusair KM, Al-Omari MA, Al-Hiyasat AS. Radiographic technical quality of root canal treatment performed by dental students at the Dental Teaching Center in Jordan. *J Dent.* 2004;32(4):301-7.
125. Kelbauskas E, Andriukaitiene L, Nedzelskiene I. Quality of root canal filling performed by undergraduate students of odontology at Kaunas University of Medicine in Lithuania. *Stomatologija.* 2009;11(3):92-6.
126. Bjørndal L, Laustsen MH, Reit C. Root canal treatment in Denmark is most often carried out in carious vital molar teeth and retreatments are rare. *Int Endod J.* 2006;39(10):785-90.
127. Ayhan M, Yıldız T, Protogerou E. Evaluation and comparison of mandibular molar root canal filling quality performed by undergraduate preclinical dental students. *Sci Rep.* 2025;15(1):15149.

128. Ilgüy D, Ilgüy M, Fisekçioğlu E, Ersan N, Tanalp J, Dölekoglu S. Assessment of root canal treatment outcomes performed by Turkish dental students: results after two years. *J Dent Educ.* 2013;77(4):502-9.
129. Polyzos NK, Sarris KG, Pita AI, Mikrogeorgis GV, Lyroudia KM. Quality of Root Canal Fillings Performed by Undergraduate Students and the Related Factors on the Treatment Outcome: A 2- to 5-Year Follow-Up. *Eur Endod J.* 2018;3(3):179-85.
130. Eleftheriadis GI, Lambrianidis TP. Technical quality of root canal treatment and detection of iatrogenic errors in an undergraduate dental clinic. *Int Endod J.* 2005;38(10):725-34.
131. Segura-Egea JJ, Castellanos-Cosano L, Machuca G, López-López J, Martín-González J, Velasco-Ortega E, et al. Diabetes mellitus, periapical inflammation and endodontic treatment outcome. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2012;17(2):e356-61.
132. Hörsted-Bindslev P, Andersen MA, Jensen MF, Nilsson JH, Wenzel A. Quality of molar root canal fillings performed with the lateral compaction and the single-cone technique. *J Endod.* 2007;33(4):468-71.
133. Er O, Sagsen B, Maden M, Cinar S, Kahraman Y. Radiographic technical quality of root fillings performed by dental students in Turkey. *Int Endod J.* 2006;39(11):867-72.
134. Benenati FW, Khajotia SS. A radiographic recall evaluation of 894 endodontic cases treated in a dental school setting. *J Endod.* 2002;28(5):391-5.
135. Weiger R, Hitzler S, Hermle G, Löst C. Periapical status, quality of root canal fillings and estimated endodontic treatment needs in an urban German population. *Endod Dent Traumatol.* 1997;13(2):69-74.
136. Patel S, Durack C, Abella F, Roig M, Shemesh H, Lambrechts P, et al. European Society of Endodontology position statement: the use of CBCT in endodontics. *Int Endod J.* 2014;47(6):502-4.
137. Kersten HW, Wesselink PR, Thoden van Velzen SK. The diagnostic reliability of the buccal radiograph after root canal filling. *Int Endod J.* 1987;20(1):20-4.
138. Peters OA. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod.* 2004;30(8):559-67.
139. Wu MK, Shemesh H, Wesselink PR. Limitations of previously published systematic reviews evaluating the outcome of endodontic treatment. *Int Endod J.* 2009;42(8):656-66.
140. Green TL, Walton RE, Taylor JK, Merrell P. Radiographic and histologic periapical findings of root canal treated teeth in cadaver. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1997;83(6):707-11.
141. Elemam RF, Abdul Majid ZS, Groesbeck M, Azevedo ÁF. Quality of Root Canals Performed by the Inaugural Class of Dental Students at Libyan International Medical University. *Int J Dent.* 2015;2015:135120.
142. Chybowski EA, Glickman GN, Patel Y, Fleury A, Solomon E, He J. Clinical Outcome of Non-Surgical Root Canal Treatment Using a Single-cone Technique with Endosequence Bioceramic Sealer: A Retrospective Analysis. *J Endod.* 2018;44(6):941-5.

143. Eckerbom M, Andersson JE, Magnusson T. Interobserver variation in radiographic examination of endodontic variables. *Endod Dent Traumatol.* 1986;2(6):243-6.
144. de Chevigny C, Dao TT, Basrani BR, Marquis V, Farzaneh M, Abitbol S, et al. Treatment outcome in endodontics: the Toronto study--phase 4: initial treatment. *J Endod.* 2008;34(3):258-63.
145. Schwendicke F, Göstemeyer G. Single-visit or multiple-visit root canal treatment: systematic review, meta-analysis and trial sequential analysis. *BMJ Open.* 2017;7(2):e013115.
146. Shim K, Jang YE, Kim Y. Comparison of the Effects of a Bioceramic and Conventional Resin-Based Sealers on Postoperative Pain after Nonsurgical Root Canal Treatment: A Randomized Controlled Clinical Study. *Materials (Basel).* 2021;14(10).
147. Kim JH, Cho SY, Choi Y, Kim DH, Shin SJ, Jung IY. Clinical Efficacy of Sealer-based Obturation Using Calcium Silicate Sealers: A Randomized Clinical Trial. *J Endod.* 2022;48(2):144-51.

11 Anhang

11.1 Erhobene Variablen

Nr.	Variable	Beschreibung / Definition	Ausprägungen / Kodierung	Skalenniveau
1	Pseudo-ID	Pseudonymisierte Fallnummer	fortlaufende Nummer	nominal
2	Anzahl Wurzeln	Anzahl der Wurzeln des behandelten Zahns	numerisch	metrisch
3	Anzahl Kanäle	Anzahl der instrumentierten Wurzelkanäle	numerisch	metrisch
4	Behandlerstatus	Ausbildungsstand der behandelnden Person	1 = 7. Semester 2 = 10. Semester 3 = Approbierte 4 = mehrere Behandler	ordinal
5	Revision	Revisionsbehandlung	1 = Ja 2 = Nein	dichotom
6	Art postoperativer Komplikation	Art der aufgetretenen Komplikation	0 = keine Komplikation 1 = Schwellung 2 = Extraktion 3 = Revision 4 = Schmerzen 5 = WSR 6 = Fraktur	nominal
7	Zeitpunkt der Komplikation	Zeitpunkt des Auftretens	0 = keine Komplikation 1 = ≤ 1 Woche 2 = > 1 Woche – ≤ 3 Monate 3 = > 3 Monate – ≤ 6 Monate 4 = > 6 Monate	ordinal
8	Postendodontische Versorgung	Art der definitiven Versorgung	0 = keine Angabe 1 = Krone 2 = Füllung	nominal
9	Anzahl Sitzungen	Anzahl der Behandlungssitzungen	numerisch	metrisch

Nr.	Variable	Beschreibung / Definition	Ausprägungen / Kodierung	Skalenniveau
10	Fülltechnik	Verwendete Obturationstechnik	1 = Laterale Kondensation (AH Plus) 2 = Einstifttechnik (BC Sealer)	nominal
11	Anamnese	Relevante Allgemeinerkrankungen	0=unauffällig 1=Diabetes 2=Bisphosphonate 3=Rauchen 4= Alkoholabusus 5=Parodontitis 6=Endokarditisprophylaxeinnahme 7=Diabetes und Parodontitis 8=Rauche und Parodontitis 9=Endokarditis und Parodontitis 10= Bisphosphonate und Parodontitis 11=Diabetes und Bisphosphonate 12=Endokarditis und Diabetes 13=Endokarditis und Parodontitis	nominal
12	Kofferdam	Behandlung erfolgte unter Kofferdam	1=Ja 2= Nein	dichotom
13	Apikale Parodontitis	Radiologischer Nachweis apikaler Parodontitis vor Behandlung	1=Ja 2= Nein	dichotom
14	Puff		1= Ja 2=Nein	dichotom
15	Vertucci Typ I Kanal		1= Ja 2=Nein	dichotom
16	Suffizientes Kontrollbild 1	Vorhandensein eines verwertbaren Kontrollbildes nach WF	1= Ja 2=Nein	dichotom

Nr.	Variable	Beschreibung / Definition	Ausprägungen / Kodierung	Skalenniveau
17	Suffizientes Kontrollbild 2	Vorhandensein eines verwertbaren Kontrollbildes >6 Monate nach WF	1= Ja 2=Nein	dichotom
18	Länge der WF	Beziehung der WF zum Apex	1 = > 2 mm vor Apex 2 = ≤ 2 mm vor Apex 3 = am Apex 4=apikal Puff	ordinal
19	Homogenität der WF	Radiologische Homogenität	1 = homogen 2 = inhomogen	dichotom
20	Qualität der WF	Gesamtbewertung der Wurzelkanalfüllung	1 = ideal 2 = akzeptabel 3 = unzureichend	ordinal
21	PAI bezüglich Kontrollbild 1	Periapical Index bei Kontrollaufnahme nach WF	0=kein suff. Kontrollbild 1=Code 1 2=Code 2 3=Code 3 4=Code 4 5=Code 5	ordinal
22	PAI bezüglich Kontrollbild 2	Periapical Index bei Kontrollaufnahme >6 Monate nach WF	0=kein suff. Kontrollbild 1=Code 1 2=Code 2 3=Code 3 4=Code 4 5=Code 5	ordinal

Tabelle 29: Übersicht der im Rahmen der Studie erhobenen endodontischen und patientenbezogenen Variablen.

11.2 Wurzelfüllungslängen nach Ausbildungsstand

Die folgenden Abbildungen zeigen die deskriptive Verteilung der röntgenologisch beurteilten Wurzelfüllungslängen in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand der Behandlerinnen und Behandler. Dargestellt sind jeweils die relativen Häufigkeiten der Füllungslängen-Kategorien (> 2 mm vor Apex, ≤ 2 mm vor Apex, am radiologischen Apex, über den radiologischen Apex hinaus) getrennt nach den verwendeten Fülltechniken AH Plus und BC Sealer in Prozent.

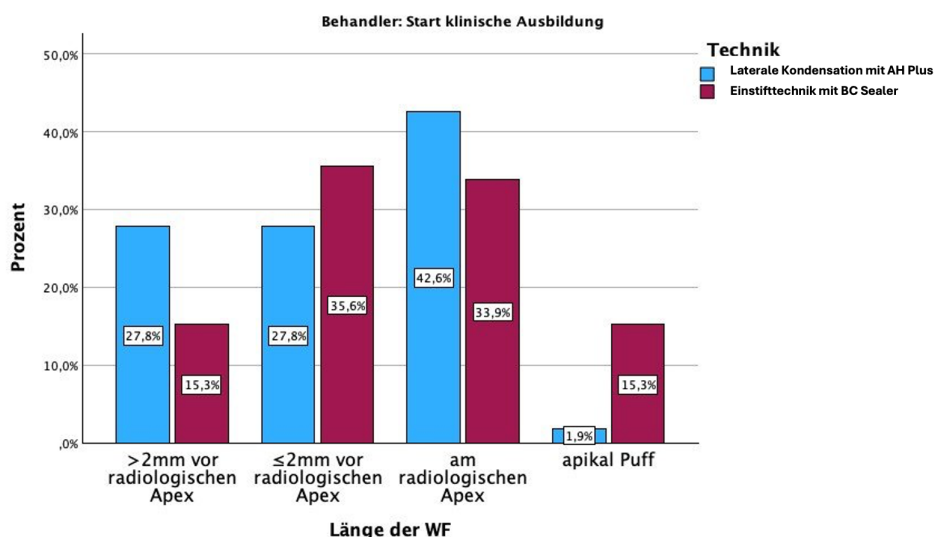


Abbildung 27: Balkendiagramm zur Verteilung der Wurzelfülllängen bei Behaltern zu Beginn der klinischen Ausbildung, differenziert nach Fülltechnik in Prozent. X-Achse: Länge der WF, Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (n = 113).

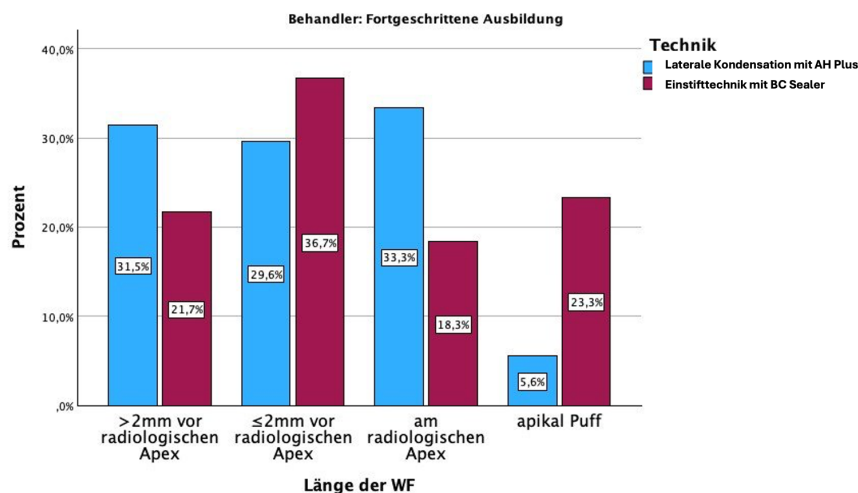


Abbildung 28: Verteilung der Wurzelfülllängen bei Behandlern in fortgeschrittener klinischer Ausbildung, differenziert nach Fülltechnik in Prozent. X-Achse: Länge der WF, Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (n = 114).

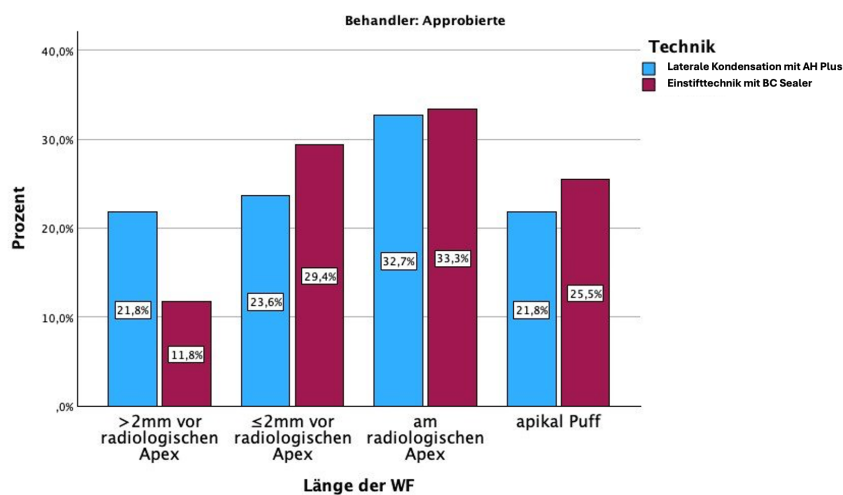


Abbildung 29: Verteilung der Wurzelfülllängen bei approbierten Behandlern, differenziert nach Fülltechnik in Prozent, X-Achse: Länge der WF, Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (n = 106).

11.3 Homogenität der Wurzelkanalfüllung nach Behandlergruppen

Zur ergänzenden Veranschaulichung sind nachfolgend die Verteilungen der Homogenität der Wurzelkanalfüllungen bei Behandlern unterschiedlicher Ausbildungsstufen dargestellt. Die Balkendiagramme zeigen die prozentuale Häufigkeit homogener und inhomogener Füllungen, differenziert nach der verwendeten Fülltechnik (AH Plus vs. BC Sealer).

Zur Prüfung eines signifikanten Unterschieds innerhalb der einzelnen Behandlergruppen nach Erfahrungsgrad wurde eine separate Prüfung vorgenommen.

Für Behandler zu Beginn der klinischen Ausbildung zeigte sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Fülltechnik und der Homogenität der Wurzelkanalfüllung (Pearson- $\chi^2(1) = 2,169$; $p = 0,141$). Die Effektstärke nach Cramér-V betrug $V = 0,139$ und weist auf einen schwachen Zusammenhang hin.

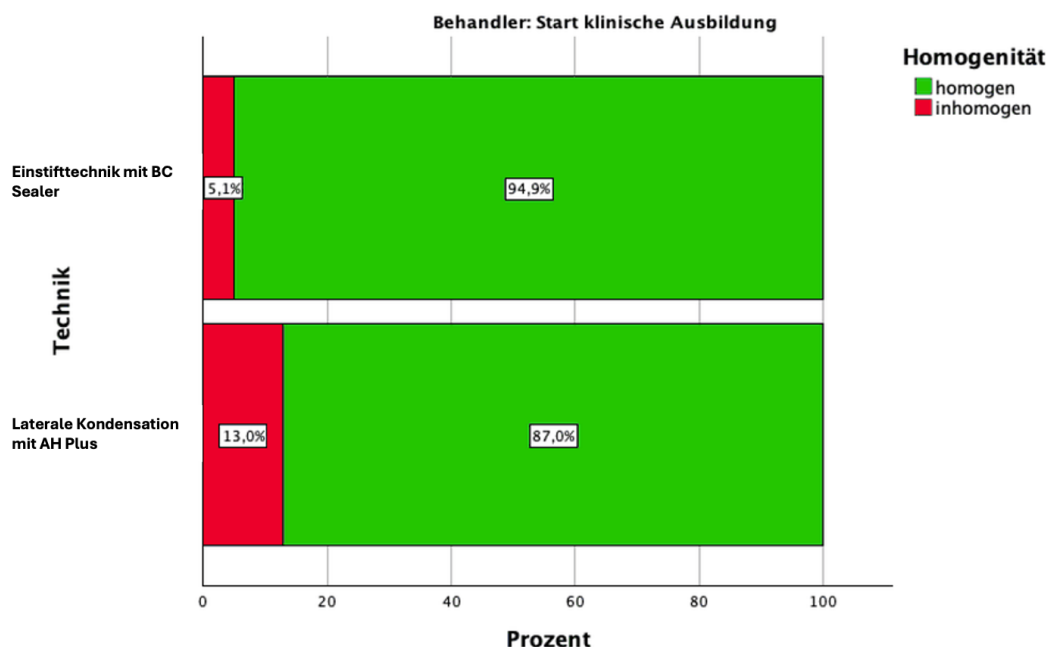


Abbildung 30: Balkendiagramm zum Vergleich der Füllungshomogenität zwischen AH Plus und BC-Sealer in Prozent in der Behandlergruppe zum Start der klinischen Ausbildung.

Laterale Kondensation (n = 54), Einstifttechnik (n = 59).

Test	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)	Exakte Sig. (zweiseitig)	Exakte Sig. (einseitig)
Pearson-Chi-Quadrat	2,169	1	,141		
Kontinuitätskorrektur	1,303	1	,254		
Likelihood-Quotient	2,212	1	,137		
Exakter Test nach Fisher				,190	,127
Zusammenhang linear-mit-linear	2,150	1	,143		
Anzahl der gültigen Fälle	113				

Tabelle 30: Chi-Quadrat-Test zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Wurzelkanalfülltechnik und Homogenität der Wurzelkanalfüllung bei Behandlern zu Beginn der klinischen Ausbildung (n = 113).

Auch bei Behandlern in fortgeschrittener klinischer Ausbildung ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den untersuchten Techniken (Pearson- $\chi^2(1) = 0,098$; $p = 0,755$). Die Effektstärke war mit Cramér-V = 0,029 als sehr gering einzustufen.

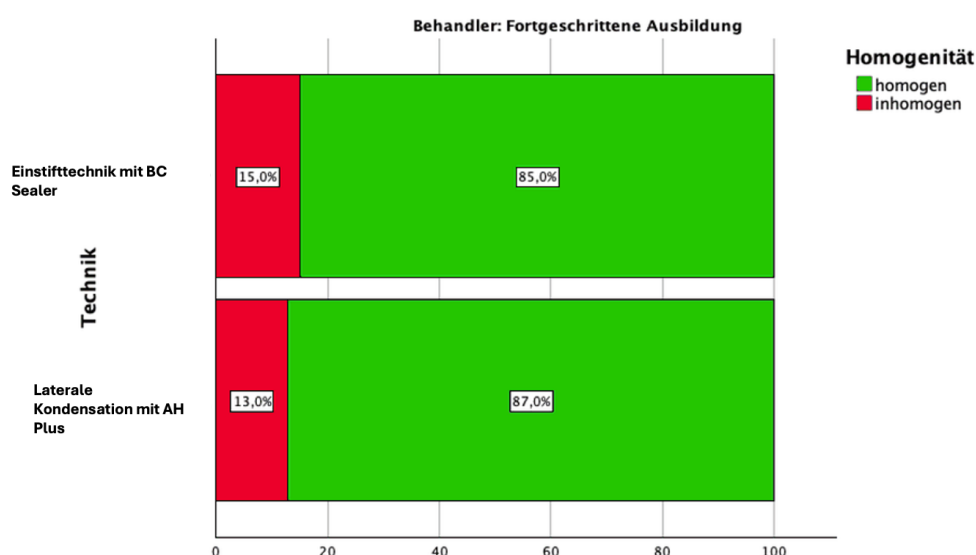


Abbildung 31: Balkendiagramm zum Vergleich der Füllungshomogenität zwischen lateraler Kondensation und Einstifttechnik in Prozent in der Behandlergruppe der fortgeschrittenen klinischen Ausbildung. Laterale Kondensation (n = 54), Einstifttechnik (n = 60).

Test	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)	Exakte Sig. (zweiseitig)	Exakte Sig. (einseitig)
Pearson-Chi-Quadrat	,098	1	,755		
Kontinuitätskorrektur	,002	1	,966		
Likelihood-Quotient	,098	1	,754		
Exakter Test nach Fisher				,794	,484
Zusammenhang linear-mit-linear	,097	1	,756		
Anzahl der gültigen Fälle	114				

Tabelle 31: Chi-Quadrat-Test zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Wurzelkanalfülltechnik und Homogenität der Wurzelkanalfüllung bei Behandlern in fortgeschrittener klinischen Ausbildung (n = 114).

Ebenso zeigte sich bei approbierten Behandlern kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der verwendeten Fülltechnik und der Homogenität der Wurzelkanalfüllung (Pearson- $\chi^2(1) = 0,144$; $p = 0,705$). Die Effektstärke nach Cramér-V betrug $V = 0,029$ und war ebenfalls als sehr schwach zu bewerten.

Insgesamt konnte somit in keiner der untersuchten Ausbildungsgruppen ein signifikanter Einfluss der Fülltechnik auf die Homogenität der Wurzelkanalfüllung nachgewiesen werden. Die beobachteten Unterschiede zwischen den Techniken waren durchweg gering und ohne klinisch relevante Effektstärke.

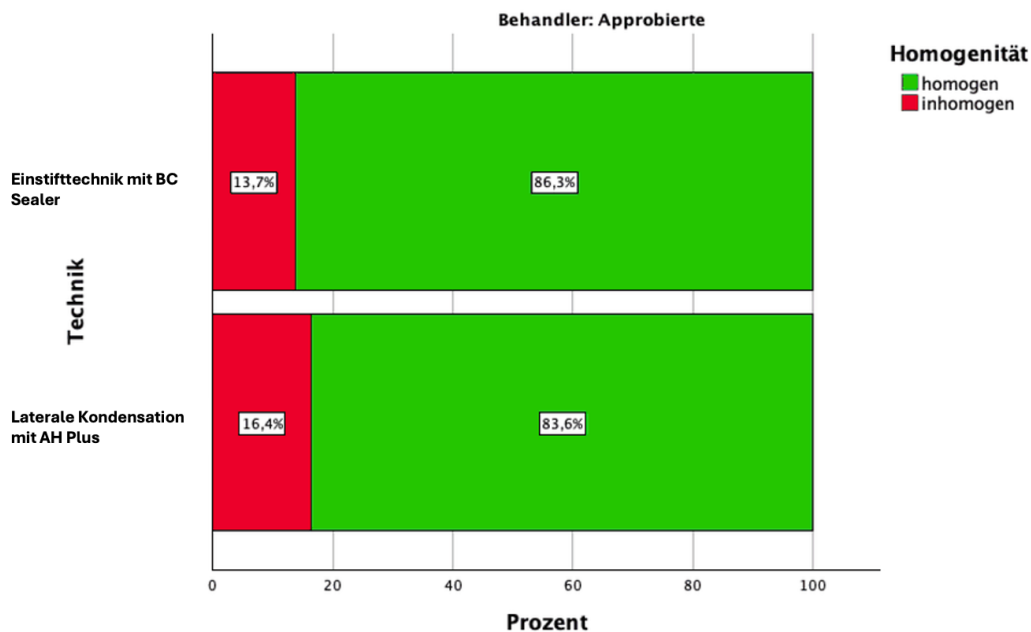


Abbildung 32: Balkendiagramm zum Vergleich der Füllungshomogenität zwischen lateraler Kondensation und Einstifttechnik in Prozent der approbierten Behandler laterale Kondensation ($n = 55$), Einstifttechnik ($n = 51$).

Test	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)	Exakte Sig. (zweiseitig)	Exakte Sig. (einseitig)
Pearson-Chi-Quadrat	,144	1	,705		
Kontinuitätskorrektur	,012	1	,914		
Likelihood-Quotient	,144	1	,704		
Exakter Test nach Fisher				,790	,458
Zusammenhang linear-mit-linear	,142	1	,706		
Anzahl der gültigen Fälle	106				

Tabelle 32: Chi-Quadrat-Test zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Wurzelkanalfülltechnik und Homogenität der Wurzelkanalfüllung bei Approbierten ($n = 106$).

11.4 Prüfung auf Normalverteilung der Anzahl der Behandlungssitzungen nach Obturationstechnik

Darstellung der deskriptiven Kennwerte (Mittelwert, Median, Standardabweichung, Spannweite, Interquartilsbereich, Schiefe, Kurtosis) sowie der Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov- und Shapiro-Wilk-Test) für die Anzahl der Behandlungssitzungen getrennt nach Obturationstechnik (Laterale Kondensation und Einstifttechnik). Für beide Gruppen zeigt sich eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung ($p < 0,001$).

Anzahl Sitzungen	Technik	Statistik	Wert	Standardfehler
	Laterale Kondensation mit AH Plus	Mittelwert	3,69	,157
		95% KI Untergrenze	3,38	
		95% KI Obergrenze	4,00	
		5% getrimmtes Mittel	3,53	
		Median	3,00	
		Varianz	4,004	
		Standardabweichung	2,001	
		Minimum	1	
		Maximum	17	
		Spannweite	16	
		Interquartilbereich	2	
		Schiefe	2,368	,190
		Kurtosis	11,726	,378
	Einstifttechnik mit BC Sealer	Mittelwert	4,20	,156
		95% KI Untergrenze	3,89	
		95% KI Obergrenze	4,51	
		5% getrimmtes Mittel	4,05	
		Median	4,00	
		Varianz	4,149	
		Standardabweichung	2,037	
		Minimum	1	
		Maximum	12	
		Spannweite	11	

		Interquartilbereich	2	
		Schiefe	1,251	,186
		Kurtosis	1,964	,370

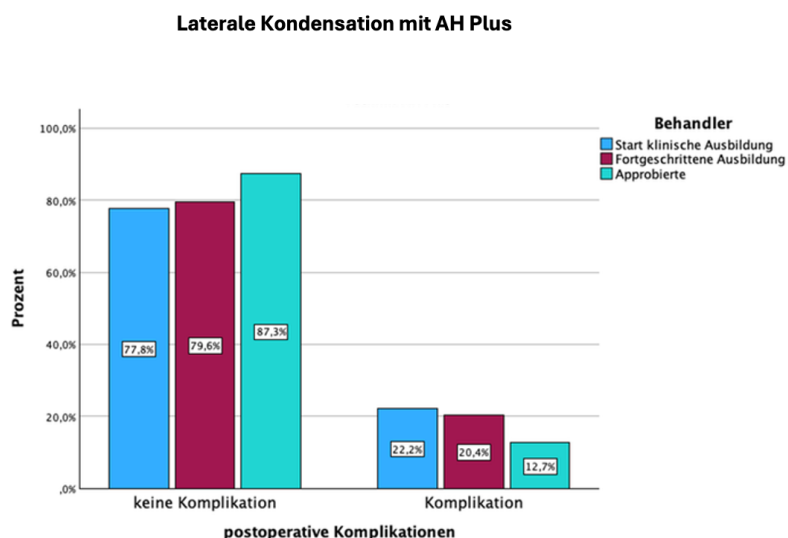
Tabelle 33: Deskriptive Statistik der Sitzungsanzahl differenziert nach Obturationstechnik

Technik	Kolmogorov-Smirnov Statistik	df	Signifikanz	Shapiro-Wilk Statistik	df	Signifikanz
Laterale Kondensation mit AH Plus	,206	163	<,001*	,820	163	<,001*
Einstifttechnik mit BC Sealer	,216	170	<,001*	,890	170	<,001*

Tabelle 34: Normalverteilungsprüfung (Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk) für die Anzahl der Behandlungssitzungen nach Obturationstechnik (signifikante Abweichung von der Normalverteilung ($p < 0,001$)).

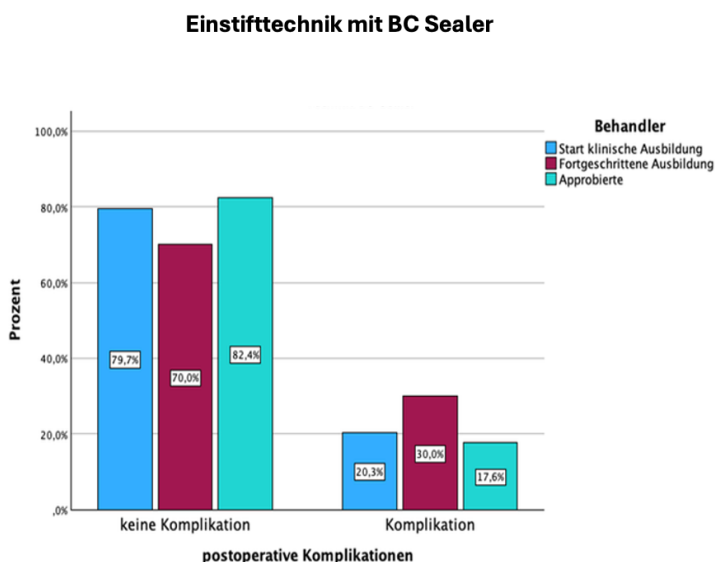
11.5 Auftreten postoperativer Komplikationen in Abhängigkeit vom Ausbildungsstand und Technik

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Anteile postoperativer Komplikationen bis 18 Monate nach Ausbildungsstufe (7. Semester, 10. Semester, Approbierte) und Fülltechnik (laterale Kondensation vs. Einstifttechnik). Die Darstellung ist deskriptiv und dient der Ergänzung des Haupttextes.



* Komplikation: Schmerzen, Schwellung, WSR, Revision, Fraktur, Exzision

Abbildung 33: Balkendiagramm zur Verteilung postoperativer Komplikationen bis 18 Monate nach Wurzelkanalfüllung, differenziert nach Ausbildungsstufe und Fülltechnik (AH Plus/laterale Kondensation). X-Achse: postoperative Komplikation; Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (laterale Kondensation $n = 163$).



* Komplikation: Schmerzen, Schwellung, WSR, Revision, Fraktur, Exzision

Abbildung 34: Balkendiagramm zur Verteilung postoperativer Komplikationen bis 18 Monate nach Wurzelkanalfüllung, differenziert nach Ausbildungsstufe und Fülltechnik (BC Sealer/Einstifttechnik). X-Achse: postoperative Komplikation; Y-Achse: Anteil der Behandlungsfälle in Prozent (Einstifttechnik $n = 170$).

12 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. dent. Marius Morlock für die wertvolle Betreuung und den stets konstruktiven Austausch in der ersten Phase meiner Promotionszeit. Die anregenden Gespräche und fachlichen Anregungen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein herzlicher Dank gilt Frau Dr. med. dent. Lisa Morlock, die die Betreuung dieser Dissertation übernommen hat und mich mit großem Engagement, wertvollen Ratschlägen und kontinuierlicher Unterstützung durch die weitere Promotionszeit begleitet hat.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. James Deschner für die wissenschaftliche Begleitung als erster Gutachter und die hilfreichen fachlichen Hinweise.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir das Zahnmedizinstudium ermöglicht, mich stets unterstützt und immer an mich geglaubt hat, ebenso meinem Partner. Ohne ihre Unterstützung wäre dieser Weg nicht möglich gewesen.

13 Tabellarischer Lebenslauf

Schulbildung

2003 – 2007: Theodor-Fliedner Grundschule, Meerbusch

2007 – 2015: Mataré-Gymnasium, Meerbusch

Abschluss: Allgemeine Hochschulreife, Juni 2015

Berufsausbildung

08/2015 – 01/2017: Ausbildung zur Zahnmedizinischen Fachangestellten

01/2017 – 08/2017: Tätigkeit als Zahnmedizinische Fachangestellte

Studium

2017 – 2023: Studium der Zahnmedizin

Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

November 2023: Staatsexamen Zahnmedizin

seit August 2021: Promotionsvorhaben an der Klinik für Parodontologie und Zahnerhaltung der Universitätsmedizin Mainz

Beruflicher Werdegang

02/2024 - 02/2026: Vorbereitungsassistentin

Seit März 2026: Angestellte Zahnärztin