

Aus der

Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Tübingen  
Abteilung Poliklinik für Zahnerhaltung  
Sektion Endodontologie

**Maschinelle Gleitpfadherstellung bei komplexer  
Wurzelkanalanatomie - Eine In-vitro-Studie an 3D-gedruckten  
Zähnen**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard Karls Universität  
zu Tübingen**

**vorgelegt von**

**Hofmann, Luise**

**2021**

Dekan:

Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter:

Privatdozent Dr. A. ElAyouti

2. Berichterstatter:

Privatdozent Dr. A. Badke

Tag der Disputation:

02.08.2021

Für meine Eltern

## Inhaltsverzeichnis

### Abbildungsverzeichnis

### Tabellenverzeichnis

### Abkürzungsverzeichnis

1. Einleitung.....	10
1.1. Grundlagen der Wurzelkanalbehandlung.....	10
1.1.1. Ätiologie endodontischer Erkrankungen.....	10
1.1.2. Indikationen und Kontraindikationen der Wurzelkanalbehandlung...	10
1.1.3. Ziele der Wurzelkanalbehandlung.....	11
1.2. Anforderungen an die Wurzelkanalaufbereitung und die Herausforderungen komplexer Kanalanatomie.....	11
1.3. Aufbereitungsinstrumente und Aufbereitungstechniken .....	18
1.3.1. Werkstoffkunde und Eigenschaften der manuellen Aufbereitungsinstrumente.....	18
1.3.1.1. Konventionelle Edelmetallinstrumente.....	18
1.3.1.2. Flexible Edelmetallinstrumente mit modifizierter Spitzengeometrie .....	19
1.3.1.3. Nickel-Titan-Handinstrumente .....	19
1.3.2. Werkstoffkunde und Eigenschaften der maschinellen Aufbereitungsinstrumente.....	20
1.3.2.1. Konstruktionsmerkmale .....	20
1.3.2.2. Konventionelle Nickel-Titan-Legierungen .....	21
1.3.2.3 Innovative Nickel-Titan-Legierungen .....	21
1.3.2.4. Die in dieser Studie eingesetzten maschinellen Instrumente...	22
1.3.3. Normung .....	24

1.3.4. Aufbereitungstechniken und Besonderheiten der maschinellen Aufbereitung .....	25
1.3.4.1. Aufbereitungstechniken .....	25
1.3.4.2. Balanced-force-Technik und Circumferential filing .....	25
1.3.4.3. Single-length-Technik in der maschinellen Aufbereitung .....	26
1.3.4.4. Rotierende und reziproke Aufbereitung .....	26
1.4. Der endodontische Gleitpfad.....	27
1.4.1. Präparation der Zugangskavität .....	27
1.4.2. Bedeutung des Gleitpfades .....	28
1.4.3. Scouting der Wurzelkanäle und manuelle Gleitpfadpräparation.....	29
1.4.4. Maschinelle Gleitpfadpräparation .....	29
1.5. Zusammenfassung und Fragestellung .....	31
2. Material und Methoden.....	32
2.1. Materialien.....	32
2.1.1. Stoppuhr.....	32
2.1.2. Endodontiemotor und Interim-Stand .....	32
2.1.3. Instrumente .....	33
2.1.3.1. Instrumente von VDW: R-PILOT (012,5), R25 blue (025), VDW.ROTATE (015, 020) .....	33
2.1.3.2. Instrumente von Komet: PathGlider (015), F360 (025) und Procodile (025).....	34
2.1.3.3. Instrumente von Coltene: HyFlex EDM Glidepath File (015) und HyFlex EDM (020).....	36
2.1.3.4. NiTi ISO 015 Handinstrumente .....	36
2.2. Versuchsvorbereitungen .....	37
2.2.1. Auswahl der Zähne und deren Einteilung in die Versuchsreihen .....	37
2.2.2. Vorbereitung und 3D-Druck der Zähne .....	39

2.3.2. Spezielle Durchführung in den einzelnen Versuchsgruppen nach Herstellerangaben .....	43
2.4. Auswertung .....	48
2.4.1. Auswertung des zeitlichen Aufwandes .....	48
2.4.2. Auswertung des Dentinabtrages und der erreichten Arbeitslänge ...	48
2.4.3. Auswertung der Arbeitssicherheit.....	49
2.5. Statistische Auswertung .....	49
3. Ergebnisse .....	50
3.1. Zeitlicher Aufwand.....	50
3.1.1. Die maschinellen Gleitpfadinstrumente .....	50
3.1.2. Die maschinellen Aufbereitungsinstrumente .....	52
3.1.3. Maschinelle Gleitpfad- vs. maschinelle Aufbereitungsinstrumente...	54
3.2. Dentinabtrag und Erreichen der Arbeitslänge .....	56
3.2.1. Die maschinellen Gleitpfadinstrumente .....	56
3.2.2. Die maschinellen Aufbereitungsinstrumente .....	62
3.2.3. Maschinelle Gleitpfad- vs. maschinelle Aufbereitungsinstrumente...	66
3.3. Arbeitssicherheit.....	71
3.3.2. Die maschinellen Gleitpfadinstrumente .....	71
3.3.3. Die maschinellen Aufbereitungsinstrumente .....	72
3.3.1. Maschinelle Gleitpfad- vs. maschinelle Aufbereitungsinstrumente...	73
4. Diskussion .....	75
4.1. Diskussion der Methode.....	75
4.1.1. Auswahl der Präparate.....	75
4.1.2. Auswahl der Methode.....	76
4.1.3. Rolle des Behandlers .....	78
4.2. Diskussion der Ergebnisse.....	78

4.2.1. Zeitlicher Aufwand.....	78
4.2.2. Dentinabtrag und Erreichen der Arbeitslänge .....	81
4.2.3. Arbeitssicherheit.....	86
5. Zusammenfassung .....	89
6. Literaturverzeichnis .....	91
7. Erklärung zum Eigenanteil.....	97
8. Danksagung .....	98
9. Lebenslauf.....	99

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung: Primärkrümmung (a) und Sekundärkrümmung (b).....	13
Abbildung 2: Bestimmung des Krümmungsradius: Großer Krümmungsradius (a) und kleiner Krümmungsradius (b).....	14
Abbildung 3: Schematische Darstellung der apikalen Perforation - Kanalabweichungen in Rot dargestellt .....	15
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Stufenbildung - Kanalabweichungen in Rot dargestellt .....	16
Abbildung 5: 1. Versuchsreihe: Wurzelkanäle mit einer Krümmung $<90^\circ$ .....	38
Abbildung 6: 2. Versuchsreihe: Wurzelkanäle mit einer Krümmung $\geq 90^\circ$ .....	38
Abbildung 7: 3. Versuchsreihe: Wurzelkanäle mit einer Hook-Konfiguration..	39
Abbildung 8: 3D-Rekonstruktion des Zahnes und des Kanalsystems aus Micro CT-Daten.....	40
Abbildung 9: Bearbeitungsschritte: Intakter Zahn mit Schnittlinien (a), Zahn in Pulp-Slice-Form mit Trepanationsöffnung und definierter Dentindicke im Bereich der Außenkrümmung (b).....	41
Abbildung 10: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand .....	51
Abbildung 11: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand - Interaktion zwischen Aufbereitungsart und Krümmung.....	52
Abbildung 12: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (9. - 18. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand .....	53
Abbildung 13: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (9. - 18. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand - Interaktion zwischen Aufbereitungsart und Instrument .....	54
Abbildung 14: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- und der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand.....	55



Abbildung 15: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- und der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand - Interaktion zwischen Aufbereitungsart und Krümmung.....	56
Abbildung 16: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Übermäßiger Dentinabtrag .....	59
Abbildung 17: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Erreichen der Arbeitslänge .....	62
Abbildung 18: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): Übermäßiger Dentinabtrag .....	64
Abbildung 19: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): Erreichen der Arbeitslänge .....	66
Abbildung 20: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Übermäßiger Dentinabtrag.....	69
Abbildung 21: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Erreichen der Arbeitslänge.....	71
Abbildung 22: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Arbeitssicherheit .....	72
Abbildung 23: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (9. - 18. Versuchsgruppe): Arbeitssicherheit .....	73
Abbildung 24: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Arbeitssicherheit.....	74

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsaufbau.....	42
Tabelle 2: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe (<math><90^\circ</math>) - Übermäßiger Dentinabtrag.....	57
Tabelle 3: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): 2. Versuchsreihe (>math>\geq 90^\circ</math>) - Übermäßiger Dentinabtrag.....	57
Tabelle 4: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): 3. Versuchsreihe (Hook) - Übermäßiger Dentinabtrag.....	58
Tabelle 5: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumenten (1. - 8. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe (<math><90^\circ</math>) - Erreichen der Arbeitslänge .....	60
Tabelle 6: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumenten (1. - 8. Versuchsgruppe): 2. Versuchsreihe (>math>\geq 90^\circ</math>): Erreichen der Arbeitslänge .....	60
Tabelle 7: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumenten (1. - 8. Versuchsgruppe): 3. Versuchsreihe (Hook): Erreichen der Arbeitslänge .....	61
Tabelle 8: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe (<math><90^\circ</math>) - Übermäßiger Dentinabtrag.....	63
Tabelle 9: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): 3. Versuchsreihe (Hook) - Übermäßiger Dentinabtrag.....	63
Tabelle 10: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe (<math><90^\circ</math>) - Erreichen der Arbeitslänge .....	65

Tabelle 11: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen  
 Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe):  
 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ) - Übermäßiger Dentinabtrag ..... 67

Tabelle 12: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen  
 Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe):  
 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) - Übermäßiger Dentinabtrag ..... 67

Tabelle 13: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen  
 Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe):  
 3. Versuchsreihe (Hook) - Übermäßiger Dentinabtrag ..... 68

Tabelle 14: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen  
 Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe):  
 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ) - Erreichen der Arbeitslänge ..... 69

Tabelle 15: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen  
 Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe):  
 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) - Erreichen der Arbeitslänge ..... 70

Tabelle 16: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen  
 Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe):  
 3. Versuchsreihe (Hook) - Erreichen der Arbeitslänge ..... 70

Tabelle 17: Maschinelle Gleitpfadinstrumente - Größe, Konizität und  
 Arbeitsweise ..... 77

Tabelle 18: Maschinelle Aufbereitungsinstrumente - Größe, Konizität und  
 Arbeitsweise ..... 77

## Abkürzungsverzeichnis

CM-Wire	Controlled Memory-Wire
DGZ	Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kiefer- heilkunde
et al.	Et alii
gcm	Gramm Zentimeter
Ggf.	Gegebenenfalls
I.d.R.	In der Regel
ISO	International Organization for Standardization
mm	Millimeter
M-Wire	Memory-Wire
n	Versuchsanzahl
Ncm	Newton Zentimeter
NiTi	Nickel-Titan
NiTiNOL	Legierung, die aus den Elementen Nickel und Titan im Naval Ordnance Laboratory (Silver Spring, USA) ent- wickelt wurde
Min <sup>-1</sup>	Pro Minute
Rpm	Rotations per minute
Z.B.	Zum Beispiel

# **1. Einleitung**

## **1.1. Grundlagen der Wurzelkanalbehandlung**

### **1.1.1. Ätiologie endodontischer Erkrankungen**

Die Endodontie ist ein Teilgebiet der konservierenden Zahnheilkunde und beschäftigt sich mit der Zahnpulpa und dem umgebenden Gewebe, wozu umgebendes Dentin, periapikales und laterales Parodont gehören. Zusammen bilden sie die funktionelle Einheit Endodont (Weber, 2010). Das Endodont steht über das Foramen apicale im Bereich der Wurzelspitze mit dem Parodontium in Verbindung. Eine Erkrankung des Endodonts kann verschiedene Auslöser haben. Die Hauptursache sind kariöse Läsionen, welche die Pulpa erreichen. Aber auch Traumata, iatrogene Maßnahmen oder Parodontopathien sind ätiologisch möglich (Rödig et al., 2009). Als Folge kann es zu einer Pulpitis, Pulpanekrose oder einer apikalen Parodontitis kommen (Weber, 2010).

### **1.1.2. Indikationen und Kontraindikationen der Wurzelkanalbehandlung**

Eine irreversible Pulpitis und eine Pulpanekrose mit oder ohne assoziierte apikale Parodontitis sind klassische Indikationen für eine Wurzelkanalbehandlung. Als Indikation kann auch die intentionelle Devitalisation vor z.B. prothetischen Versorgung in Frage kommen (Hellwig et al., 2013). Für eine Wurzelkanalbehandlung sollte der Zahn in jedem Fall langfristig erhaltungsfähig sein. Wenn ein Zahn funktionell nicht wiederhergestellt werden kann, der parodontale Halt des Zahnes ungenügend, die Gesamtprognose des Zahnes schlecht oder der Zahn für die gesamte Behandlungsplanung ohne Bedeutung ist, stellt dies eine Kontraindikation dar (Hellwig et al., 2013; Weber, 2010).

### **1.1.3. Ziele der Wurzelkanalbehandlung**

Die Ziele einer Wurzelkanalbehandlung sind die „langfristige Erhaltung des Zahnes als funktionsfähige Kaueinheit und Erhaltung oder Wiederherstellung gesunder periradikulärer Strukturen“ (DGZ, 2004). Entscheidend sind dabei die erfolgreiche Wurzelkanalaufbereitung, die Desinfektion und die Qualität der Wurzelkanalfüllung. Dabei werden die vollständige „Entfernung des vitalen oder nekrotischen pulpalen Weichgewebes sowie des infizierten Wurzelkanalwand-dentins“ (DGZ, 2004), die „Eliminierung von Mikroorganismen durch Einsatz antimikrobiell wirkender Flüssigkeiten“ (DGZ, 2004) und ein „dauerhafter, flüssigkeits- und bakteriedichter Verschluss des Wurzelkanalsystems“ angestrebt (DGZ, 2004).

### **1.2. Anforderungen an die Wurzelkanalaufbereitung und die Herausforderungen komplexer Kanalanatomie**

Bei der Wurzelkanalaufbereitung ist es von entscheidender Bedeutung für den Erfolg der gesamten Wurzelkanalbehandlung, dass die Wurzelkanäle über ihren gesamten Verlauf erschlossen und aufbereitet werden können, die ursprüngliche Kanalanatomie erhalten wird und ein möglichst gleichmäßiger zirkulärer Dentinabtrag stattfindet. Die Präparation des Wurzelkanals sollte außerdem konisch nach apikal zulaufen. Eine Überinstrumentierung über die Konstriktion des Foramen physiologicum hinaus sollte genau so vermieden werden wie eine unvollständige Erschließung und Aufbereitung des Wurzelkanals (Rödig et al., 2009). Das Foramen physiologicum stellt in 90-95% der Fälle mit 0,15-0,25 mm Durchmesser die engste Stelle des Wurzelkanals dar (Brendel, 2001) und soll erhalten bleiben, sodass es als apikale Grenze der Wurzelkanalaufbereitung und Wurzelkanalfüllung dient. Lokalisiert ist das Foramen physiologicum ca. 0,5-1 mm weiter koronal als das Foramen apicale, das die Öffnung zum Parodontium darstellt. Beide sind zu unterscheiden vom radiologischen Apex (Hellwig et al., 2013). Eine besondere Schwierigkeit bei der Wurzelkanalaufbereitung stellen die gekrümmten Wurzelkanäle dar. Diese haben nicht nur eine große Bedeutung in

der Endodontie, weil sie besonders anspruchsvoll in der Aufbereitung sind, sondern auch, weil sie mit einer großen Häufigkeit auftreten. 84% aller Wurzelkanäle weisen mindesten eine Krümmung auf (Schäfer et al., 2002). Unterkiefermolaren sind immer gekrümmt (Cunningham and Senia, 1992), wobei in den meisten Fällen die mesialen Wurzeln eine Krümmung von ca.  $18^{\circ}$ - $30^{\circ}$  aufweisen (Cunningham and Senia, 1992). Oberkieferprämolaren haben immer mindestens eine Krümmung und in 20-25% der Fälle sogar zwei (Willershausen et al., 2005). Die Krümmungen von Wurzelkanälen wurden 1971 nach mathematischer Analyse von Schneider eingeteilt. Die Einteilung nach Schneider dient der klinischen Anwendung bei Vorlage von zweidimensionalen Röntgenaufnahmen. Bei der Auswertung wird in das Röntgenbild eine Gerade gezeichnet, die durch die Punkte A und B geht und der Längsachse des Wurzelkanals von koronal ausgehend entspricht. Nun zeichnet man eine zweite Gerade in das Röntgenbild, die durch das Foramen apicale und den Punkt geht, an dem der Wurzelkanal die Längsachse des Wurzelkanals verlässt. Die beiden Geraden bilden den Scheitelpunkt des Winkels der primären Wurzelkanalkrümmung (Schneider, 1971). Schneider hat die primäre Wurzelkanalkrümmung in drei Kategorien eingeteilt: gerade ( $0^{\circ}$ - $5^{\circ}$ ), mäßig ( $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$ ) und stark ( $25^{\circ}$ - $70^{\circ}$ ). Cunningham und Senia (1992) haben die Einteilung nach Schneider weiterentwickelt und nach derselben Methode eine Bestimmung der sekundären Wurzelkanalkrümmung ermöglicht. Kartal and Cimilli (1997) haben dieselbe Methode zu Bestimmung von tertiären Wurzelkanalkrümmungen angewandt. In dieser Studie werden die Wurzelkanalkrümmungen ebenfalls nach Schneider (Schneider, 1971) bzw. Cunningham und Senia (Cunningham and Senia, 1992) eingeteilt (s. Abbildung 1).

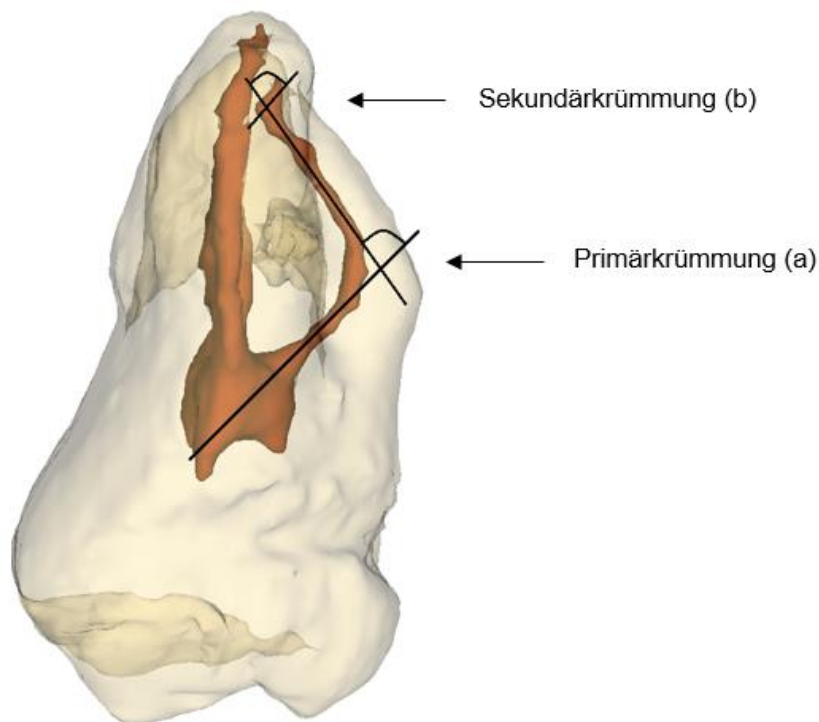


Abbildung 1: Bestimmung der Wurzelkanalkrümmung: Primärkrümmung (a) und Sekundärkrümmung (b)

Pruett et al. (1997) stellten außerdem fest, dass nicht nur der Krümmungswinkel, sondern auch der Krümmungsradius eine entscheidende Bedeutung hat. Je größer der Krümmungsradius ist, desto einfacher ist die Krümmung des Wurzelkanals aufzubereiten und desto länger ist die Arbeitszeit der Instrumente bis zum Ermüdungsbruch. Um den Krümmungsradius zu ermitteln, zeichnet man zwei Geraden ein: Eine Gerade geht durch die Längsachse des Wurzelkanals von koronal aus, die andere Gerade geht durch die Längsachse des Wurzelkanals von apikal aus. Dort, wo diese Geraden den Wurzelkanal jeweils verlassen, sind die Punkte A und B. Zwischen den beiden Punkten liegt der gekrümmte Kanalanteil, der als Teil eines Kreisbogens definiert wird. Der Kreismittelpunkt kann nun durch zwei Senkrechte auf die beiden Geraden bestimmt werden. Die zwei Senkrechten treffen sich im Kreismittelpunkt. Der Radius kann abgelesen werden (s. Abbildung 2). Je größer der Radius ist, desto weniger abrupt verläuft die Krümmung (Pruett et al., 1997).



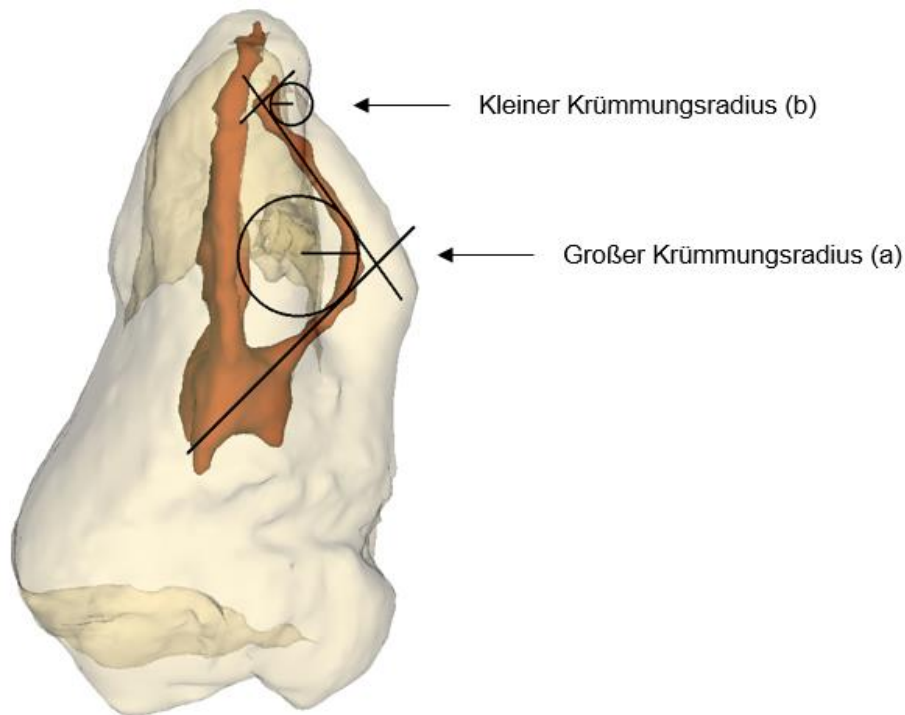


Abbildung 2: Bestimmung des Krümmungsradius: Großer Krümmungsradius (a) und kleiner Krümmungsradius (b)

Auch Schäfer et al. (2002) untersuchten neben dem Krümmungswinkel den Krümmungsradius und auch die Krümmungslänge. Zusammengefasst haben neben dem Krümmungsradius auch die Lage der Krümmung, ihre Länge und ihr Radius einen Einfluss auf die Schwierigkeit der Aufbereitung (Lopes et al., 2013). Nagy et al. (1995) teilten Wurzelkanäle nach ihrem gesamten Verlauf in folgende Kategorien: I-Form (gerader Wurzelkanal), J-Form (Krümmung des apikalen Wurzelkanaldrittels), C-Form (Krümmung des Wurzelkanals über seine gesamte Länge) und S-Form (Mehrfachkrümmung des Wurzelkanals). Die Schwierigkeit bei der Aufbereitung von allen gekrümmten Wurzelkanälen beruht darauf, dass die Kanalachse in dem Bereich der Krümmung nicht mit der Kraftvektorachse des Instruments übereinstimmt. Dies führt zu einer unerwünschten Kraftentfaltung bei dem gekrümmten Instrument und zu einer unerwünschten Veränderung des Kanalverlaufs. Auch Winkler hat die Kraftentfaltung einer gekrümmten Feile wie folgt beschrieben: Im mittleren Kanaldrittel übt die Feile vermehrt Druck auf die Innenkurvatur und im apikalen Kanaldrittel übt die Feile vermehrt Druck auf die Außenkurvatur aus. In diesen Bereichen kommt es zu einem übermäßigen Dentinabtrag und zu einer Veränderung der ursprünglichen Kanal Anatomie (Winkler,

1996). Bei der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle ist eine der größten Schwierigkeiten, alle Kanalwände gleichmäßig zu bearbeiten ohne den Kanal in seinem ursprünglichen Verlauf zu verändern (Hülsmann et al., 2005). Die Begradigung von gekrümmten Kanälen ist dabei eine der häufigsten Probleme (Hülsmann et al., 2005; Pettiette et al., 1999). Folgende Präparationsfehler treten am häufigsten bei gekrümmten Wurzelkanälen auf:

- Apikale Perforation: Durch den übermäßigen Dentinabtrag an der Außenkurvatur im apikalen Kanaldrittel kommt es zu einer Aussackung und im Extremfall zu einer apikalen Perforation an der Außenkurvatur (Rödig et al., 2009).

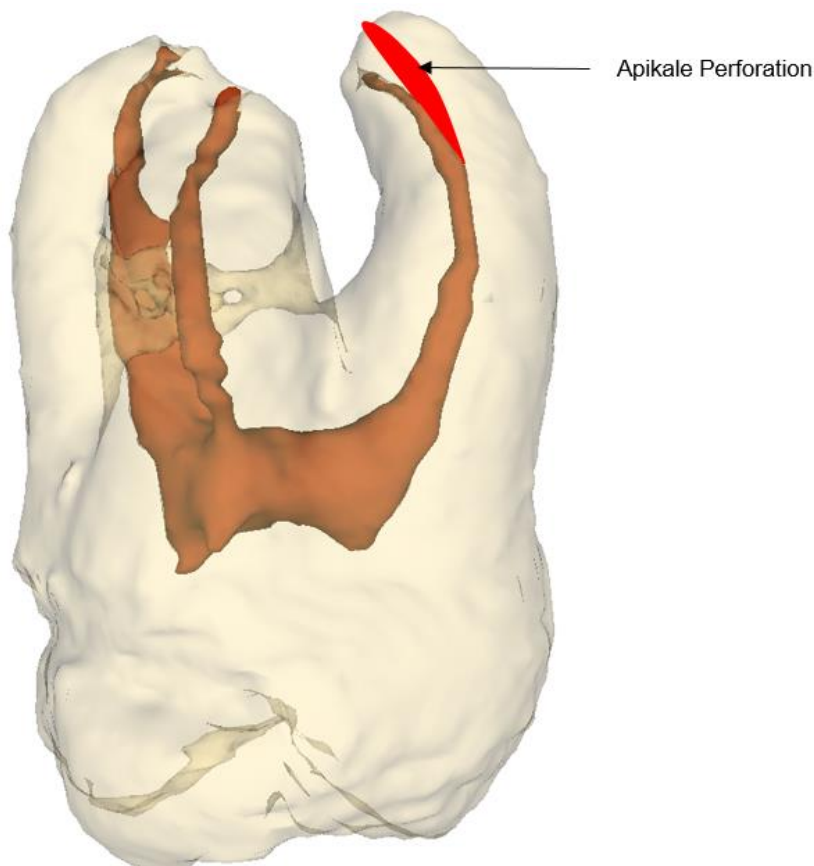


Abbildung 3: Schematische Darstellung der apikalen Perforation - Kanalabweichungen in Rot dargestellt

- Stufe: Eine Stufenbildung und ein damit einhergehender übermäßiger Dentinabtrag an der Außenkurvatur und einem Verlust der Arbeitslänge ist ein häufiges Problem bei apikalen Krümmungen (Rödig et al., 2009).

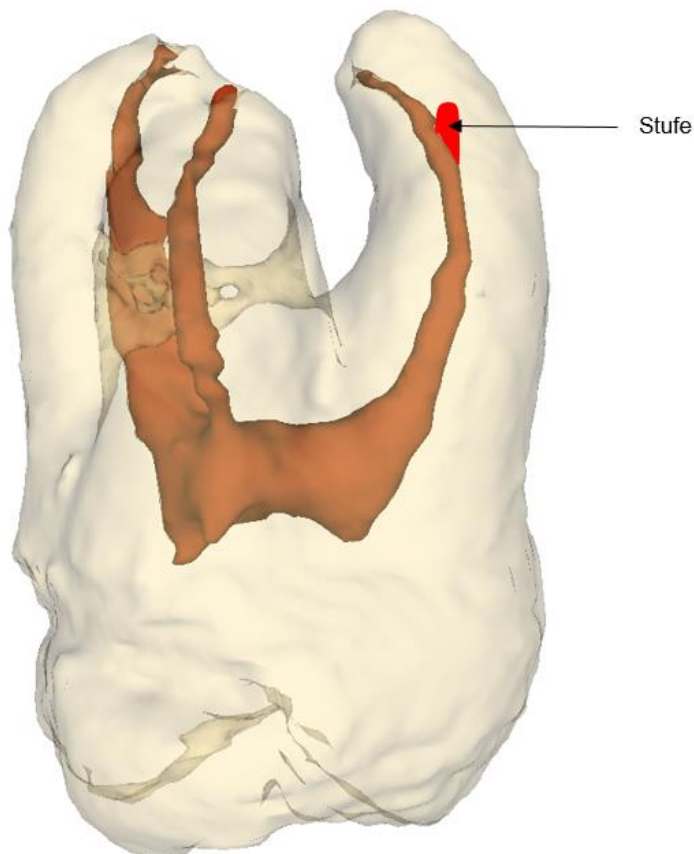


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Stufenbildung - Kanalabweichungen in Rot dargestellt

Besonders der übermäßige Dentinabtrag im Bereich der Außenkurvatur, der immer mit einer Begradigung des Kanals einhergeht, ist eine große Herausforderung (Hülsmann et al., 2005). Dieser kann zum Zipping, der Bildung einer Stufe (Ledge), der Erweiterung der apikalen Konstriktion oder im schlimmsten Fall zu einer *via falsa* und zu einer Perforation führen (Hülsmann et al., 2005). Die ursprüngliche Kanal Anatomie von gekrümmten Wurzelkanälen zu erhalten und einen zirkulär gleichmäßigen Dentinabtrag zu erreichen, stellt also eine große Herausforderung dar, ist aber dennoch anzustreben. Eine weitere Schwierigkeit bei der Aufbereitung von gekrümmten Wurzelkanälen ist die Gefahr der Instrumentenfraktur (Suter, 2017). Die Instrumentenfraktur kann durch eine Torsions-

belastung oder durch zyklische Ermüdung verursacht werden. Dabei spielen die Torsionsfrakturen eine untergeordnete Rolle, da sie durch die drehmomentbegrenzten Motoren für maschinell betriebene NiTi-Instrumente reduziert werden können. Kommt es zu einem Verklemmen der Instrumentenspitze im Kanal kann dies jedoch eine Torsionsfraktur verursachen. Bei Handinstrumenten stellt die Fraktur durch Torsionsbelastung ein größeres Problem dar als bei den maschinellen drehmomentbegrenzten Aufbereitungsinstrumenten. Frakturen durch zyklische Ermüdung spielen klinisch insgesamt aber die größere Rolle (Rödig et al., 2009). Neben der Belastungsdauer ist auch die Belastungsintensität, welche z.B. mit einem kleinen Krümmungsradius steigt, für die Ermüdungsfraktur entscheidend (Rödig et al., 2009). Viele Studien haben sich mit der Thematik der Instrumentenfraktur befasst und besonders die zyklische Ermüdung von Instrumenten bei der Aufbereitung von gekrümmten Kanälen getestet (Topçuoğlu et al., 2018). Der Radius, die Länge der Krümmung und die Lage der Krümmung haben dabei einen Einfluss auf die zyklische Ermüdung eines Instruments. Je kleiner der Radius, je länger die Krümmung und je weiter apikal gelegen die Krümmung ist, desto höher ist das Risiko einer Ermüdungsfraktur (Lopes et al., 2013). Eine Instrumentenfraktur „war schon immer eine gefürchtete, jedoch relativ selten auftretende Komplikation bei der Wurzelbehandlung. Seit der Einführung rotierender Nickel-Titan-Instrumente zur Kanalaufbereitung tritt das Problem vermehrt auf und hat demzufolge eine größere Aufmerksamkeit erfahren.“ (Suter, 2017). Insgesamt befassen sich die meisten Studien, die sich mit der Aufbereitung von Wurzelkanalkrümmungen beschäftigen, mit geringeren Krümmungen, die klinisch häufiger auftreten. Studien, die sich mit starken Wurzelkanalkrümmungen befassen, die mehr als  $40^\circ$  -  $50^\circ$  betragen, sind in der aktuellen Forschung noch stark unterrepräsentiert. Auch Schneiders Einteilung der Wurzelkanalkrümmung endet mit der schwierigsten Kategorie, die Wurzelkanalkrümmungen  $>25^\circ$  beschreibt. Studien, die sich mit sehr komplexer Kanal Anatomie und Krümmung  $\geq 90^\circ$  beschäftigen, sind in der aktuellen Forschung - gerade im Hinblick auf die Gleitpfadherstellung - noch unterrepräsentiert.

### **1.3. Aufbereitungsinstrumente und Aufbereitungstechniken**

#### **1.3.1. Werkstoffkunde und Eigenschaften der manuellen Aufbereitungsinstrumente**

##### **1.3.1.1. Konventionelle Edelmetallinstrumente**

Es gibt die konventionellen Edelmetallaufbereitungsinstrumente, die in drei Grundtypen unterteilt werden können:

- K-Reamer: Diese Instrumente werden durch Verdrillung hergestellt und besitzen ein Dreikantprofil. Reamer besitzen 1/4 bis weniger als 1/10 Spiralwindungen pro mm Arbeitslänge. Ihr Tangentenwinkel beträgt ca. 20°. Sie werden mit der Räummethode angewandt (Weber, 2010).
- K-Feile: Diese Instrumente werden ebenfalls durch Verdrillung hergestellt. Sie besitzen ein Vierkantprofil und 1/4 bis mehr als die 1/2 Spiralwindungen pro mm Arbeitslänge. Ihr Tangentenwinkel beträgt ca. 37°. Sie werden mit der Räummethode angewandt (Weber, 2010).
- Hedström-Feile: Diese Instrumente werden durch Fräsen hergestellt und ihre Instrumentenspitze ist rund. Ihr Tangentenwinkel beträgt ca. 74°. Sie werden mit der Feilmethode angewandt (Weber, 2010).

Bei der Aufbereitung von stark gekrümmten Wurzelkanälen spielen konventionelle Handinstrumente aus einer Edelmetall-Legierung kaum noch eine Rolle, da sie durch ihre geringe Flexibilität und ihr hohes Biegemoment ein hohes Frakturrisiko besitzen und unerwünschte Begradigungen des Wurzelkanalverlaufs bewirken (Rödig et al., 2009). Besonders im Vergleich mit Instrumenten aus einer Nickel-Titan-Legierung in Hinblick auf die zentrische und gleichmäßige Kanalwandbearbeitung führen die konventionellen Handinstrumente zu schlechteren Ergebnissen (Berutti et al., 2009). Die konventionellen Edelmetallinstrumente sind

zwar sehr widerstandsfähig gegen Drehmomentbelastung, zeigen aber eine sehr geringe Flexibilität (Nakagawa et al., 2014).

### **1.3.1.2. Flexible Edelmetallinstrumente mit modifizierter Spitzengeometrie**

Die konventionellen Edelmetallinstrumente wurden durch Variation der Legierungsbestandteile und durch Modifizierung der Instrumentenspitze weiterentwickelt. Die flexiblen Edelmetallinstrumente mit modifizierter Spitzengeometrie eignen sich besser für die Aufbereitung von gekrümmten Wurzelkanälen als die konventionellen Edelmetallinstrumente. Diese Instrumente haben eine geänderte Zusammensetzung der Legierung mit dem Effekt, dass das Biegemoment niedriger ist. Sie haben häufig dreieckige Querschnitte mit einem geringeren Kerndurchmesser, wodurch der Spanraum und die Flexibilität größer werden. Die Frakturresistenz ist jedoch etwas geringer als die der konventionellen Edelmetallinstrumente. Die Spitze ist nicht schneidend (Batt-Spitze) (Rödig et al., 2009).

### **1.3.1.3. Nickel-Titan-Handinstrumente**

Die ersten kommerziell verfügbaren, rotierenden NiTi-Instrumente waren in den 90er Jahren auf dem Markt verfügbar. Die Verbreitung von Nickel-Titan-Legierungen (NiTi-Legierungen) in der Zahnmedizin brachte einen großen Fortschritt besonders für die Präparation von gekrümmten Wurzelkanälen (Rödig et al., 2009). Die meisten NiTi-Handinstrumente auf dem Markt entsprechen dem Typ der K-Feile (Rödig et al., 2009). Es wurde gezeigt, dass sich NiTi-Instrumente besser für die Gleitfadpräparation eignen als Edelmetallinstrumente (Berutti et al., 2009). Die Handinstrumente aus einer NiTi-Legierung zeichnen sich durch ein Elastizitätsmodul aus, das nur ein Fünftel des entsprechenden Wertes für Chrom-Nickel-Stahl beträgt. Dadurch ist das Biegemoment geringer und die Torsionsfestigkeit größer. NiTi-Handinstrumente sind besonders flexibel und pseudoelastisch. Das bedeutet, dass bei einer Belastung das austenitische Gefüge eines NiTi-Instrumentes in ein spannungsinduziertes Martensit übergeht.

Bei Entlastung geht es wieder in seinen Ausgangszustand zurück (Zupanc and Schäfer, 2017). Das hat zur Folge, dass NiTi-Instrumente in einem gekrümmten Wurzelkanal bis zur Elastizitätsgrenze nicht plastisch verformt werden, sondern nach der elastischen Verformung wieder in ihre Ausgangsform übergehen. Dieses Verhalten wird durch den Memory-Effekt beschrieben (Hellwig et al., 2013). Durch diese Materialeigenschaften eignen sich NiTi-Instrumente besser für die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle als konventionelle Edelmetallinstrumente (Berutti et al., 2009).

### **1.3.2. Werkstoffkunde und Eigenschaften der maschinellen Aufbereitungsinstrumente**

#### **1.3.2.1. Konstruktionsmerkmale**

Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale für maschinelle Aufbereitungsinstrumente sind:

- Instrumentenspitze: Die meisten maschinellen Aufbereitungsinstrumente haben eine abgerundete, nicht schneidende Batt-Spitze, um eine bessere Zentrierung im Wurzelkanal zu gewährleisten und die Gefahr einer Perforation zu minimieren (Rödig et al., 2009).
- Konizität: Die Konizitäten variieren stark bei den maschinellen Instrumenten. Es gibt Konizitäten von bis zu 0.20 oder sogar mehrere Konizitäten in einem Instrument (Rödig et al., 2009).
- Instrumentenquerschnitt: Das Angebot der verschiedenen Instrumentenquerschnitte ist groß. Die Form hat vor allem einen Einfluss auf die Fraktursicherheit des Instruments (Rödig et al., 2009).

- Schneidengeometrie: Die Anzahl, der Abstand und die Winkel der Schneiden beschreiben die Schneidengeometrie. Man unterscheidet aktive, semi-aktive und passive Instrumente. Die Schneidengeometrie hat Einfluss auf den Dentinabtrag (Rödig et al., 2009).

### **1.3.2.2. Konventionelle Nickel-Titan-Legierungen**

Die maschinellen Instrumente aus Nickel-Titan-Legierungen haben ähnliche Eigenschaften wie die NiTi-Handinstrumente. Ihre Flexibilität ist deutlich höher als die der konventionellen Edelmetallinstrumente. Sie weisen ein pseudoelastisches Verhalten und damit verbunden den Memory-Effekt auf. Die maschinellen NiTi-Instrumente zeigen bei der Präparation gekrümmter Wurzelkanäle weniger Präparationsfehler als NiTi-Handinstrumente (Pasqualini et al., 2012). Die Kanalbegradigung fällt bei der maschinellen Präparation deutlich geringer aus als bei der manuellen Präparation (Berutti et al., 2009). Auch die Präparationszeit ist mit maschinellen NiTi-Instrumenten kürzer als mit Handinstrumenten (Paleker and van der Vyver, 2016). Maschinelle NiTi-Instrumente eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften besonders gut für die Präparation gekrümmter Wurzelkanäle (Berutti et al., 2009; Pasqualini et al., 2012). Allerdings sind bei der maschinellen Aufbereitung in Studien auch vermehrt Instrumentenfrakturen und Perforation zu beobachten (Braun et al., 2003), was kritisch betrachtet werden muss. Auf dem Markt gibt es verschiedene Legierungen, die aber stets Nickel, Titan, Eisen und Kobalt enthalten. Man unterscheidet 55-Nitinol (55 m% Nickel, 45 m% Titan) und 60-Nitinol (60 m% Nickel, 40 m% Titan). Eine Besonderheit stellt noch die Titan-Aluminium-Legierung dar, die einen bis zu 17 m% Aluminiumanteil hat.

### **1.3.2.3 Innovative Nickel-Titan-Legierungen**

Für die maschinellen NiTi-Instrumente wurden in den letzten Jahren diverse thermomechanische Verfahren zur Bearbeitung des Materials entwickelt, um die Eigenschaften der Instrumente zu optimieren. Die Verfahren und die entstehenden Legierungen lassen sich in die zwei Gruppen pseudoelastische Legierungen



und Shape Memory Legierungen unterteilen. Die innovativen Legierungen weisen durch veränderte Phasenzusammensetzungen der NiTi-Legierungen, die auf eine Erhöhung der Transformationstemperatur, bei der die Austenit- in die Martensitphase übergeht, und durch die zusätzliche Übergangphase (R-Phase) eine höhere Resistenz gegen zyklische Ermüdung und eine höhere Flexibilität auf gegenüber den konventionellen Legierungen (Zupanc and Schäfer, 2017). Dies ist besonders für die Präparation von stark gekrümmten Wurzelkanälen interessant, weil dadurch das Frakturrisiko verringert werden kann (Zupanc and Schäfer, 2017). Auch die Gefahr von Präparationsfehlern, wie z.B. Stufen oder Perforationen, in gekrümmten Kanälen kann durch eine größere Flexibilität der Instrumente minimiert werden (Berutti et al., 2009; Pasqualini et al., 2012).

#### **1.3.2.4. Die in dieser Studie eingesetzten maschinellen Instrumente**

- R-PILOT, RECIPROC blue und VDW.ROTATE von VDW:  
Die Legierung der R-PILOT von VDW zählt zu den pseudoelastischen Legierungen. Diese M-Wire Legierung entsteht durch ein thermochemisches Bearbeitungsverfahren einer NiTi-Legierung, das die zusätzliche R-Phase und eine Erhöhung der Transformationstemperatur zur Folge hat. Im Vergleich zu konventionellen NiTi-Legierungen weist die M-Wire Legierung so eine erhöhte Flexibilität und eine erhöhte Resistenz gegen zyklische Ermüdung auf (Pereira et al., 2012). Die R-PILOT von VDW wurde in einigen Studien getestet und ist anderen maschinellen rotierenden Gleitpfadinstrumenten durch ihre reziproke Arbeitsweise und durch eine größere Resistenz gegen zyklische Ermüdung überlegen (Keskin et al., 2018). Das RECIPROC blue-System von VDW gehört mit seiner Blue-Wire Legierung zu den Shape Memory Legierungen und ist die Weiterentwicklung des RECIPROC-Systems von VDW. Durch eine spezielle Hitzebehandlung wird die Molekularstruktur der Legierung verändert. Die Instrumente bestehen bei Raumtemperatur größtenteils aus Martensit und zeigen eine zweistufige Phasen-Transformation. Dies hat zu Folge, dass das RECIPROC blue-System deutlich flexibler und resistenter gegen zyklische Ermüdung ist. Die Instrumente haben einen kontrollierten Rückstelleffekt, ein

Formgedächtnisverhalten und sind vorbiegbar (Zupanc and Schäfer, 2017). Einige Studien zeigen, dass die Aufbereitung von gekrümmten Wurzelkanälen mit dem RECIPROC blue-System erfolgreich ist (Adıguzel and Tufenkci, 2018; Topçuoğlu and Topçuoğlu, 2017). Das RECIPROC blue-System zeigt eine größere Resistenz gegen zyklische Ermüdung als das RECIPROC-System von VDW (Topçuoğlu and Topçuoğlu, 2017). Auch anderen reziproken Aufbereitungsinstrumenten ist das RECIPROC blue-System überlegen (Keskin et al., 2017). Das VDW.ROTATE-System, das erst 2019 eingeführt wurde, ist das neue rotierende System von VDW, das unter anderem Feilen speziell für stark gekrümmte Wurzelkanäle und apikale Krümmungen enthält. Die Feilen des VDW.ROTATE-Systems werden einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen, die die Instrumente flexibler macht, sodass die Feilen dem ursprünglichen Kanalverlauf besser folgen sollen. Auch sollen durch diese Wärmebehandlung die zyklische Ermüdung und damit das Risiko einer Instrumentenfraktur reduziert werden (VDW GmbH, 2019).

- PathGlider, F360 und Procodile vom Komet:

Die PathGlider von Komet besteht aus einer konventionellen NiTi-Legierung, deren Eigenschaften bereits erläutert wurden. Das F360-System von Komet besteht ebenfalls aus einer konventionellen NiTi-Legierung. Allerdings werden die Materialeigenschaften des F360-Systems durch eine bestimmte Oberflächenbearbeitung, die sogenannte Elektropolitur, verbessert. Dieses Verfahren führt dazu, dass die Resistenz gegen zyklische Ermüdung erhöht ist (Saleh et al., 2015). Mit der F360 sollen auch stark gekrümmte Wurzelkanäle bei Erhalt der Kanal Anatomie und ohne Aufbereitungsfehler aufbereitet werden können. Auch Instrumentenfrakturen werden in anderen Studien nicht beobachtet (Saleh et al., 2015). Die Procodile von Komet ist ein Instrument zur reziproken Aufbereitung. Die Besonderheiten liegen in dem variabel getaperten Feilenkern und der Wärmebehandlung. Beides erhöht die Flexibilität der Feilen, wodurch die Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle bei Erhalt der Kanal Anatomie ermöglicht werden soll. Außerdem zeigt die Procodile eine erhöhte

Flexibilität gegen zyklische Ermüdung, wodurch das Frakturrisiko reduziert werden soll (Komet Procodile Produktdetails, 2019).

- HyFlex EDM Glidepath File und HyFlex EDM von Coltene:

Das HyFlex EDM-System von Coltene ist mit seiner CM-Wire Legierung der Gruppe der Shape Memory Legierungen zuzuordnen. Die Besonderheit dieser Instrumente ist, dass sie durch Funkenerosion hergestellt werden. Die Oberfläche wird so robuster und die Instrumente werden frakturresistenter. Die Flexibilität und die Resistenz gegen zyklische Ermüdung sollen gegenüber anderen maschinellen NiTi-Instrumenten erhöht sein. Das HyFlex EDM-System weist neben der Austenit- und der Martensit-Phase zusätzlich noch die R-Phase als Zwischenstufe auf und zeigt so eine zweistufige Phasen-Transformation. Bei Raumtemperatur besteht das HyFlex EDM-System größtenteils aus Martensit, was sich positiv auf die Materialeigenschaften auswirkt. Die Instrumente haben einen kontrollierten Rückstelleffekt, zeigen ein Formgedächtnisverhalten und sind vorbiegbar (Zupanc and Schäfer, 2017). Bei Studien zeigt sich, dass das HyFlex EDM-System eine größere Resistenz gegen zyklische Ermüdung als andere maschinelle Aufbereitungssysteme besitzt (Capar et al., 2015). Außerdem zeigt das HyFlex EDM-System mit einer etwas überlegenen Zentrierfähigkeit im Wurzelkanal (Venino et al., 2017). Speziell die HyFlex EDM Glidepath File von Coltene ist ebenfalls in einigen Studien anderen Instrumenten überlegen. Sie zeigt eine große Resistenz gegen zyklische Ermüdung (Yılmaz et al., 2017) und eine sehr gute Zentrierfähigkeit (Han et al., 2018).

### 1.3.3. Normung

Endodontische Instrumente sind nach der ISO 3630 genormt. Die Größe eines Instrumentes richtet sich nach dem Durchmesser  $d_1$  an der Instrumentenspitze. Der Taper beschreibt die Konizität, d.h. die Durchmesserzunahme pro Millimeter Instrumentenlänge. Bei ISO-Instrumenten beträgt der Taper 0.02. Das bedeutet,

dass diese Instrumente pro Millimeter Instrumentenlänge 0,02 mm an Durchmesser zunehmen (Weber, 2010).

### **1.3.4. Aufbereitungstechniken und Besonderheiten der maschinellen Aufbereitung**

#### **1.3.4.1. Aufbereitungstechniken**

Es haben sich verschiedene Techniken zur Wurzelkanalaufbereitung entwickelt, die sich grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen lassen. Die beiden Gruppen lassen sich nach Instrumentierungsrichtung unterscheiden (Hellwig et al., 2013):

- Apikal-koronale Techniken
  - Standardisierte Technik (Single-length-Technik)
  - Step-back-Technik
  - Balanced-force-Technik
  - Circumferential filing
  
- Koronal-apikale Techniken
  - Step-down-Technik
  - Crown-down-pressureless-Technik
  - Double-flared-Technik

Die in dieser Studie durchgeführten Aufbereitungstechniken sollen im Folgenden erläutert werden.

#### **1.3.4.2. Balanced-force-Technik und Circumferential filing**

Die manuelle Präparation der Wurzelkanäle in dieser Studie erfolgt nach der Balanced-force-Technik und dem Circumferential filing. Der Vorteil der Balanced-force-Technik liegt darin, dass die Kanalanatomie durch die Präparation kaum verändert wird. Das Instrument wird bis zur ersten Friktion in den Wurzelkanal

eingebraucht, danach erfolgt zunächst eine Vierteldrehung im Uhrzeigersinn und dann eine 360°-Drehung nach apikal gerichtet gegen den Uhrzeigersinn. Danach wird das Instrument in einer Rotationsbewegung im Uhrzeigersinn, die nach koronal gerichtet ist, aus dem Wurzelkanal entfernt. Das Instrument wird gereinigt. Auf diese Weise wird der Wurzelkanal aufbereitet. Wenn die Arbeitslänge erreicht ist, erfolgt das Circumferential filing. Das Instrument wird auf Arbeitslänge gebracht und mit Druck gegen die Kanalwand nach koronal aus dem Kanal entfernt. Durch das Circumferential filing wird die Kanalwand zirkulär vollständig bearbeitet (Weber, 2010).

#### **1.3.4.3. Single-length-Technik in der maschinellen Aufbereitung**

Da die manuelle Aufbereitung von Wurzelkanälen häufig sehr aufwendig und schwierig ist, stellt die maschinelle Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten „die mit Abstand wichtigste Entwicklung der letzten Jahre in der Endodontie“ (Kiefner, 2012) dar. Die maschinelle Aufbereitung bietet viele Vorteile: Der Abtransport von Debris erfolgt sicherer, die Kanal Anatomie kann durch höhere Flexibilität der Instrumente zuverlässiger erhalten werden, die Aufbereitung ist schneller und bietet mehr Komfort für den Behandler und den Patienten (Weber, 2010). Die maschinelle Präparation der Wurzelkanäle erfolgt in dieser Studie nach der standardisierten Aufbereitungstechnik, die im Rahmen der maschinellen Aufbereitung auch Single-length-Technik genannt wird. Sie beschreibt die Präparation des Wurzelkanals auf volle Arbeitslänge mit allen Instrumenten in ggf. aufsteigender Größe (Rödig et al., 2009).

#### **1.3.4.4. Rotierende und reziproke Aufbereitung**

Bei der maschinellen Präparation der Wurzelkanäle gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten der Aufbereitungsweise: rotierend oder reziprok. Die rotierende, maschinelle Aufbereitungsweise brachte einen großen Fortschritt in der Endodontie. Ein Problem stellt allerdings nach wie vor Instrumentenfraktur dar (Suter, 2017). Die Entwicklung der reziproken Arbeitsweise, die an die Balanced-force-

Technik angelehnt ist (Roane et al., 1985), brachte hier einen weiteren Fortschritt. Die Aufbereitung erfolgt durch einen ständigen Richtungswechsel des Instruments, wobei die Drehbewegung in Schneiderichtung größer ist als die rückläufige Bewegung. Dadurch ist nach einigen Bewegungen eine 360°-Umdrehung gegeben (Tchorz, 2016). Viele Studien haben sich mit der reziproken Aufbereitungsmethode beschäftigt. So wird gezeigt, dass alleine durch die reziproke Bewegung die Resistenz gegen zyklische Ermüdung größer ist als bei rotierender Aufbereitung (Kiefner et al., 2014). Die Kanal Anatomie wird durch die reziproke Aufbereitung zuverlässiger erhalten und die Aufbereitung erfolgt generell schneller und effektiver (Saber et al., 2015).

#### **1.4. Der endodontische Gleitpfad**

##### **1.4.1. Präparation der Zugangskavität**

Die Präparation der Zugangskavität muss ein „geradliniges, spannungsfreies Einbringen der Präparationsinstrumente und in der Folge eine möglichst sichere, präzise und rationelle Instrumentation des Kanalsystems“ (Rödig et al., 2009) ermöglichen. Dies ist besonders bei gekrümmten Wurzelkanälen wichtig, da die Krümmung und somit die Spannung, unter der die Instrumente stehen, sonst noch größer wäre. Man unterscheidet zwischen der primären und sekundären Zugangskavität:

- **Primäre Zugangskavität:** Sie bildet den Zugang zu dem Pulpakavum. Wichtige Anforderungen an die Präparation der primären Zugangskavität sind: die vollständige Abtragung des Pulpakammerdachs, die vollständige Entfernung des vitalen oder nekrotischen Pulpagewebes aus dem Pulpakavum vor der Präparation der sekundären Zugangskavität, das Auffinden von allen Wurzelkanal-eingängen, das problemlose und geradlinige Einbringen der Präparationsinstrumente in die Wurzelkanäle ohne koronale Interferenzen (Hellwig et al., 2013; Rödig et al., 2009; Weber, 2010).

- Sekundäre Zugangskavität: Sie bildet den Zugang zum Wurzelkanalsystem. Sie umfasst nach der Darstellung der Wurzelkanaleingänge die Sicherstellung der Durchgängigkeit im ersten Wurzelkanaldrittel und die konische Erweiterung des koronalen Abschnittes (Hellwig et al., 2013; Rödiger et al., 2009; Weber, 2010).

#### **1.4.2. Bedeutung des Gleitpfades**

Der endodontische Gleitpfad ist ein ebener Pfad von dem Kanaleingang bis zum physiologischen Apex, der mindestens der Größe 010 eines endodontischen Instruments entspricht. Der Gleitpfad muss aufgefunden oder ggf. präpariert werden (Passi et al., 2016) und ist von entscheidender Bedeutung in der Endodontie. Seine Präparation bildet den ersten Schritt der Aufbereitung und auch einen der wichtigsten Schritte der erfolgreichen Wurzelkanalpräparation (Blum et al., 2003). Der Gleitpfad verhindert Aufbereitungsfehler und verringert die Torque-Belastung, die besonders auf nachfolgende maschinelle Aufbereitungsinstrumente einwirkt, und so auch das Risiko der Instrumentenfraktur bei der nachfolgenden Aufbereitung (Berutti et al., 2004; Ha and Park, 2012; Patiño et al., 2005). Viele Studien zeigen die Vorteile und die Notwendigkeit einer Gleitpfadpräparation auf. Durch einen erfolgreichen Gleitpfad wird der ursprüngliche Kanalverlauf besser erhalten und die Debrisextrusion nach apikal ist geringer (El-naghy and Elsaka, 2014; Ha and Park, 2012; Patiño et al., 2005). Allerdings wirbt z.B. VDW damit, dass eine Gleitpfadpräparation vor der Aufbereitung mit dem RECIPROC blue-System in den meisten Fällen nicht notwendig ist. Andere Studien zeigen, dass die Gleitpfadpräparation vor der Anwendung des RECIPROC blue- oder des RECIPROC-Systems von VDW keinen signifikanten Vorteil bringt (Adiguzel and Tufenkci, 2018). Bei der Wurzelkanalaufbereitung mit der F360 von Komet zeigt sich, dass diese ohne vorherigen Gleitpfad möglich ist (Bürklein et al., 2014). In den Produktbroschüren empfehlen VDW vor der Aufbereitung mit dem VDW.ROTATE-System, Komet vor der Aufbereitung mit der F360 oder der Procodile und Coltene vor der Aufbereitung mit dem HyFlex EDM-System jedoch eine Gleitpfadherstellung.

### **1.4.3. Scouting der Wurzelkanäle und manuelle Gleitfadpräparation**

Das Scouting, die Sondierung, beschreibt die initiale, manuelle Erschließung der Wurzelkanäle mit drucklosen „vorsichtigen, alternierenden Rotationsbewegungen von maximal 90° bis in die Nähe des Apex“ (Hellwig et al., 2013). Hierfür werden konventionell Handinstrumente verwendet. „Diese initiale Erweiterung [...] bis zu einer ISO-Größe von 15 auf die Arbeitslänge führt zur Schaffung eines Gleitpfades“ (Weber, 2010). Das Scouting und die initiale Schaffung eines manuellen Gleitpfades wurden in vielen Studien untersucht. Folgende Vorteile werden in aktueller Literatur genannt: die Sicherstellung der Kanaldurchgängigkeit und der Erhalt von Information über die Kanalanatomie (Bürklein and Schäfer, 2013), die Verhinderung von Kanalblockierungen durch Präparation (Berutti et al., 2004), die Verhinderung des Einschraubens der nachfolgenden Aufbereitungsinstrumente (Taper-Lock), das zur Instrumentenfraktur führen kann, die Reduzierung der Torsionslast, die auf die nachfolgenden maschinellen Aufbereitungsinstrumente wirkt (Patiño et al., 2005) und die Reduzierung der Misserfolgsrate der nachfolgenden maschinellen Aufbereitungsinstrumente (Berutti et al., 2004). Es gibt aber auch kritische Untersuchungen, die zeigen, dass die initiale Schaffung eines manuellen Gleitpfades oft zu Präparationsfehlern und zur Stufenpräparation führt (Berutti et al., 2009). Viele Studien zeigen, dass die Kanalanatomie durch die manuelle Gleitfadpräparation schlechter erhalten wird und es häufiger zu Kanalbegradigungen kommt (Berutti et al., 2009; Pasqualini et al., 2012).

### **1.4.4. Maschinelle Gleitfadpräparation**

Die maschinelle Gleitfadpräparation stellt seit einiger Zeit eine Alternative zu der manuellen Gleitfadpräparation dar. In vielen Studien wurden bereits beide Verfahren getestet und verglichen. Die meisten Studien zeigen folgende Vorteile der maschinellen gegenüber der manuellen Gleitfadpräparation: Die maschinelle Gleitfadpräparation ist weniger fehleranfällig (Berutti et al., 2009), die Kanalanatomie wird durch die maschinelle Gleitfadpräparation besser erhalten und es



kommt zu weniger Kanalabweichungen (Berutti et al., 2009; Pasqualini et al., 2012), der Zeitaufwand ist bei der maschinellen Gleitpfadpräparation geringer (Paleker and van der Vyver, 2017) und die Torque-Belastung, die auf die nachfolgenden maschinellen Aufbereitungsinstrumente wirkt, verringert sich signifikant durch die Präparation eines maschinellen Gleitpfades (Patiño et al., 2005). Die R-PILOT von VDW wurde in einigen Studien getestet und war anderen maschinellen rotierenden Gleitfadinstrumenten durch ihre reziproke Arbeitsweise überlegen. So zeigt die R-PILOT eine größere Resistenz gegen zyklische Ermüdung (Keskin et al., 2018). Auch die HyFlex EDM Glidepath File von Coltene hat in einigen Studien überzeugt. Sie zeigt eine große Resistenz gegen zyklische Ermüdung (Yılmaz et al., 2017) und eine sehr gute Zentrierfähigkeit (Han et al., 2018). Einige Studien kommen auch zu dem Ergebnis, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen der manuellen und maschinellen Gleitpfadpräparation gibt und sich beide Varianten klinisch bewährt haben (Adıguzel and Tufenkci, 2018; Bürklein et al., 2014). Umstritten ist es auch, ob vor der maschinellen Gleitpfadherstellung ein initiale manuelle Gleitpfadherstellung erfolgen soll. So kommen die meisten Studien zu dem Schluss, dass vor dem Einsatz von maschinellen Instrumenten immer eine manuelle Gleitpfadherstellung notwendig ist, weil das Frakturrisiko für die nachfolgenden maschinellen Instrumente so reduziert werden kann und der Behandler auf diesem Weg wichtige Information über den Wurzelkanal erhält (Berutti et al., 2004; Ha and Park, 2012; Patiño et al., 2005). In viele Studien wird auch ein initiales Scouting vor der maschinellen Gleitpfadherstellung durchgeführt. In Lehrbüchern ist die gängige Meinung ebenfalls, dass ein initialer manueller Gleitpfad „für den sicheren Einsatz vollrotierender NiTi-Systeme zwingend erforderlich ist“ (Weber, 2010). Auch VDW, Komet und Coltene empfehlen ein manuelles Scouting vor der maschinellen Gleitpfadherstellung.

## 1.5. Zusammenfassung und Fragestellung

Da aktuell noch keine Studien vorliegen, welche sich der Gleitpfadherstellung bei komplexer Kanalanatomie widmen, ist das Ziel dieser Studie, maschinelle Gleitpfad- und maschinelle Aufbereitungsinstrumente mit und ohne initiales manuelles Scouting an 3D-gedruckten Zähnen mit sehr komplexer Kanalanatomie im Hinblick auf Zeitaufwand, Dentinabtrag, Erreichen der Arbeitslänge und Arbeitssicherheit zu vergleichen. Die Komplexität der Kanalanatomien, die in dieser Studie untersucht werden, steht dabei im Vordergrund. Der Schwerpunkt liegt darauf, folgende Fragen zu beantworten:

- Welches maschinelle Gleitpfad-/Aufbereitungsinstrument kann die Wurzelkanäle bei Erhalt der Kanalanatomie am häufigsten erschließen?
- Sind bei komplexer Kanalanatomie die Wurzelkanäle durch die Anwendung maschineller Gleitpfadinstrumente bei Erhalt der Kanalanatomie besser zu erschließen als durch die alleinige Anwendung maschineller Aufbereitungsinstrumente?
- Bringt die initiale manuelle Erschließung vor der maschinellen Gleitpfadherstellung/Aufbereitung einen Vorteil?

Aus den Ergebnissen dieser Studie sollen Empfehlungen im Hinblick auf Vor- und Nachteile der verschiedenen Möglichkeiten der Gleitpfadherstellung bei äußerst komplexer Kanalanatomie abgeleitet werden.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1. Materialien**

#### **2.1.1. Stoppuhr**

Die Zeit wird mit der Stoppuhr am PC festgehalten. Die Messung der Zeit beginnt mit Einbringen des Instruments in den Kanal und endet bei erfolgreicher Herstellung des Gleitpfades und Erreichen der Arbeitslänge bei Erhalt der Kanal-anatomie oder aber, wenn ein übermäßiger Dentinabtrag registriert wurde und das Instrument die Wurzel im Bereich der Außenkrümmung perforiert. Die Dokumentation erfolgt in Sekunden mit einer Nachkommastelle. Bei der Verwendung von mehreren Instrumenten in einem Kanal werden mehrere Runden gestoppt.

#### **2.1.2. Endodontiemotor und Interim-Stand**

Im Rahmen dieser Studie wird für alle Instrumente der VDW.GOLD Motor mit dem RECIPROC-Update verwendet. Das Winkelstück ist von Sirona und hat eine Übersetzung von 1:6. Der Motor besitzt im Menü ein vorinstalliertes Programm, das speziell für reziprok arbeitenden Instrumente, wie z.B. die R-PILOT, das RECIPROC blue-System und die Procodile, programmiert wurde. Daneben können aber auch alle rotierenden Instrumente mit diesem Motor verwendet werden. Es können im Menü für jedes einzelne rotierende Instrument, das in dieser Studie verwendet wird, Umdrehungszahl und maximales Drehmoment gespeichert werden. Jedes Instrument kann dann genau nach Herstellerangaben verwendet werden. Der Interim-Stand von VDW wird für diese Studie verwendet, um die Instrumente regelmäßig zu reinigen.

### 2.1.3. Instrumente

#### 2.1.3.1. Instrumente von VDW: R-PILOT (012,5), R25 blue (025), VDW.ROTATE (015, 020)

Von VDW werden in dieser Studie die Gleitpfadfeilen R-PILOT und VDW.ROTATE (015) und die Aufbereitungsinstrumente R25 blue und VDW.ROTATE (020) getestet.

- R-PILOT (012,5): Die R-PILOT ist nur in der Einheitsgröße 012,5 und in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Das Instrument hat einen konstanten Taper von 0.04. Das Material ist eine M-Wire Legierung. Der Querschnitt des Instruments ist S-förmig. Die Instrumentenspitze ist nicht schneidend. Das Instrument ist für die Einmalverwendung an max. 1 Molaren gemacht, das entspricht i.d.R. höchstens 4 Kanälen. VDW empfiehlt zusätzlich vor der Verwendung der R-PILOT mit einem Handinstrument die Kanaldurchgängigkeit zu überprüfen. Die R-PILOT arbeitet reziprok.
- VDW.ROTATE (015): Die Gleitpfadfeile des VDW.ROTATE-Systems ist nur in der Einheitsgröße 015 und in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Das Instrument hat einen konstanten Taper von 0.04. Das Material ist eine Legierung, die einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen wurde. Der Querschnitt des Instruments ist S-förmig. Das Instrument ist für die Einmalverwendung an max. 1 Molaren gemacht. VDW empfiehlt zusätzlich vor der Verwendung der VDW.ROTATE-Gleitpfadfeile mit einem Handinstrument die Kanaldurchgängigkeit zu überprüfen. Das VDW.ROTATE-System arbeitet rotierend.
- VDW.ROTATE (020): Das VDW.ROTATE-System bietet Feilen speziell für stark gekrümmte Wurzelkanäle. Es gibt die Größen 020 mit einem Taper von 0.05 und 025 mit einem Taper von 0.04 für die meisten Wurzelkanäle, für weite Wurzelkanäle gibt es noch die Größen 030, 035, 040, 050 und 060 mit einem

Taper von 0.04. Alle Feilen gibt es in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm. Das Material ist eine Legierung, die einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen wurde. Der Querschnitt des Instruments ist S-förmig. Das Instrument ist für die Einmalverwendung an max. 1 Molaren gemacht. VDW empfiehlt zusätzlich vor der Verwendung der VDW.ROTATE-Instrumente mit einem Handinstrument die Kanaldurchgängigkeit zu überprüfen. Das VDW.ROTATE-System arbeitet rotierend.

- R25 blue (025): Das RECIPROC blue-System von VDW ist die Weiterentwicklung des RECIPROC-Systems und ein maschinelles Ein-Feilen-System mit reziproker Arbeitsweise. Auf die initiale Gleitfadherstellung kann nach Angaben von VDW in den meisten Fällen verzichtet werden. Das RECIPROC blue-System umfasst drei Größen. Es gibt die R25 blue für enge Kanäle mit einem Taper von 0.08 innerhalb der ersten apikalen Millimeter, die R40 blue für mittlere Kanäle mit einem Taper von 0.06 innerhalb der ersten apikalen Millimeter und die R50 blue für weite Kanäle mit einem Taper von 0.05 innerhalb der ersten apikalen Millimeter. Alle Instrumente sind in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Das Material ist eine Blue-Wire Legierung, die einer besonderen thermischen Behandlung unterzogen wird. Dadurch ist das RECIPROC blue-System flexibler und resistenter gegen zyklische Ermüdung als das RECIPROC-System von VDW. Der Querschnitt des Instruments ist S-förmig und die Spitze ist nicht schneidend. Das Instrument ist für die Einmalverwendung an max. 1 Molaren gemacht. Die R25 blue kann laut Herstellerangaben in den meisten Fällen ohne die initiale Herstellung eines Gleitpfades verwendet werden.

#### **2.1.3.2. Instrumente von Komet: PathGlider (015), F360 (025) und Procodile (025)**

Von Komet werden in dieser Studie die Gleitpfadfeile PathGlider (015) und die Aufbereitungsinstrumente F360 (025) sowie die Procodile (020) getestet.

- PathGlider (015): Die PathGlider gibt es in den Größen 015 und 020 in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm. Beide Größen haben einen konstanten Taper von 0.03. Das Material ist eine NiTi-Legierung und das Instrument weist einen Drachenquerschnitt auf. Die Instrumentenspitze ist nicht schneidend. Mit einem Instrument können nach Herstellerangaben bis zu 5 Wurzelkanäle aufbereitet werden. Komet empfiehlt zusätzlich eine manuelle Gleitpfadherstellung mindestens bis zur Größe 010 vor der Verwendung von der PathGlider. Die PathGlider arbeitet rotierend.
- F360 (025): F360 ist ein Aufbereitungssystem von Komet, das die zwei Hauptgrößen 025 und 035 und die zwei Zusatzgrößen 045 und 055 umfasst. Alle Instrumente sind in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich und haben einen konstanten Taper von 0.04. Das Material ist eine NiTi-Legierung. F360 weist einen Doppel-S-Querschnitt auf. Die Instrumentenspitze ist nicht schneidend. Mit einem Instrument können nach Herstellerangaben bis zu 5 Wurzelkanäle aufbereitet werden. Komet empfiehlt eine maschinelle oder manuelle Gleitpfadherstellung vor der Verwendung von der F360. Die F360 arbeitet rotierend.
- Procodile (025): Das Aufbereitungssystem Procodile von Komet umfasst die Größen 020, 025, 030 mit einem Taper von 0.06, die Größen 035, 040 mit einem Taper von 0.05 und die Größen 045 und 050 mit einem Taper von 0.04. Alle Instrumente sind in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Das Material ist eine NiTi-Legierung, die einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen wurde. Die Procodile weist einen Doppel-S-Querschnitt auf. Mit einem Instrument können nach Herstellerangaben bis zu 5 Wurzelkanäle aufbereitet werden. Komet empfiehlt eine maschinelle oder manuelle Gleitpfadherstellung vor der Verwendung von der Procodile. Die Procodile arbeitet reziprok.

### **2.1.3.3. Instrumente von Coltene: HyFlex EDM Glidepath File (015) und HyFlex EDM (020)**

Von Coltene werden in dieser Studie die HyFlex EDM Glidepath File (015) und die Aufbereitungsfeile HyFlex EDM (020) getestet.

- **HyFlex EDM Glidepath File (015):** Die HyFlex EDM Glidepath File gibt es in der Größe 010 mit einem Taper von 0.05 und in der Größe 015 mit einem Taper von 0.03 in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm. Die Größe 015 wurde erst 2019 vorgestellt und ist nach Herstellerangaben eine Gleitpfadfeile für besonders stark gekrümmte Wurzelkanäle. Das Material ist eine CM-Wire Legierung und das Instrument weist durch seine Materialbesonderheiten einen sich verändernden Querschnitt auf. Die Instrumentenspitze ist nicht schneidend. Das Instrument ist für die Einmalverwendung an max. 1 Molaren gemacht. Coltene empfiehlt zusätzlich eine initiale, manuelle Gleitpfadherstellung. Das HyFlex EDM-System arbeitet rotierend.
- **HyFlex EDM (020):** HyFlex EDM ist ein Aufbereitungsinstrument von Komet, das es nur in der Größe 020 und in den Längen 21 mm, 25 mm und 31 mm gibt. Durch den Taper von 0.05 ist dieses Instrument für die Aufbereitung i.d.R. ausreichend. Das Material ist eine CM-Wire Legierung und das Instrument weist durch seine Materialbesonderheiten einen sich verändernden Querschnitt auf. Die Instrumentenspitze ist nicht schneidend. Das Instrument ist für die Einmalverwendung an max. 1 Molaren gemacht. Coltene empfiehlt eine maschinelle Gleitpfadherstellung vor der Verwendung von der HyFlex EDM. Das HyFlex EDM-System arbeitet rotierend.

### **2.1.3.4. NiTi ISO 015 Handinstrumente**

Für diese Studie werden die Handinstrumente aus NiTi in der Größe ISO 015 mit einem konstanten Taper von 0.02 von VDW verwendet. Das Instrument hat einen Vierkant-Querschnitt. Die Spitze ist schneidend.

## 2.2. Versuchsvorbereitungen

### 2.2.1. Auswahl der Zähne und deren Einteilung in die Versuchsreihen

Die Studie wird an 3D-gedruckten Zähnen durchgeführt, deren Vorlage Micro-CTs von extrahierten, menschlichen Zähnen sind. So können verschiedene Instrumente an den gleichen realistischen und praxisnahen Fällen von komplexer Kanalanatomie getestet und verglichen werden. Aus 345 nach Micro-CTs rekonstruierten Molaren konnten 59 Zähne mit komplexer Kanalanatomie selektiert werden, von denen repräsentative sechs Wurzelkanäle für diese Studie ausgewählt wurden, die durch ihre Krümmung für diese Studie geeignet sind. Für die 1. Versuchsreihe werden 2 Wurzelkanäle ausgewählt, die eine Kanalkrümmung von  $<90^\circ$  aufweisen. Im 1. Wurzelkanal wird eine Krümmung von  $79^\circ$  gemessen. Der 2. Wurzelkanal hat eine primäre Krümmung von  $78^\circ$  und eine apikale Krümmung von  $74^\circ$ , der Kanal zeigt insgesamt eine S-Form. Bei der Auswertung wird nur die 1. Krümmung beurteilt (s. Abbildung 4). Für die 2. Versuchsreihe werden 2 Wurzelkanäle ausgewählt, die eine Kanalkrümmung von  $\geq 90^\circ$  aufweisen. Im 1. Wurzelkanal werden eine primäre Krümmung von  $90^\circ$  und eine apikale Krümmung von  $60^\circ$  gemessen, der Kanal zeigt insgesamt eine S-Form. Bei der Auswertung wird nur die 1. Krümmung beurteilt. Der 2. Wurzelkanal hat eine primäre Krümmung von  $61^\circ$  und eine apikale Krümmung von  $131^\circ$ . Bei der Auswertung werden beide Krümmungen beurteilt (s. Abbildung 5). Für die 3. Versuchsreihe werden 2 Wurzelkanäle ausgewählt, die eine Hook-Konfiguration aufweisen, die in zwei Ebenen vorliegt (s. Abbildung 6). Die Wurzelkanalkrümmungen werden alle nach Schneider bestimmt. Es wurde darauf geachtet, dass die ausgewählten Wurzelkanäle ein abgeschlossenes Wurzelwachstum und keine Wurzelresorptionen zeigen. An ihnen wurde in vivo keine Wurzelkanalbehandlung begonnen oder durchgeführt. Die ausgewählten Wurzelkanäle sind alle vollständig und durchgängig.



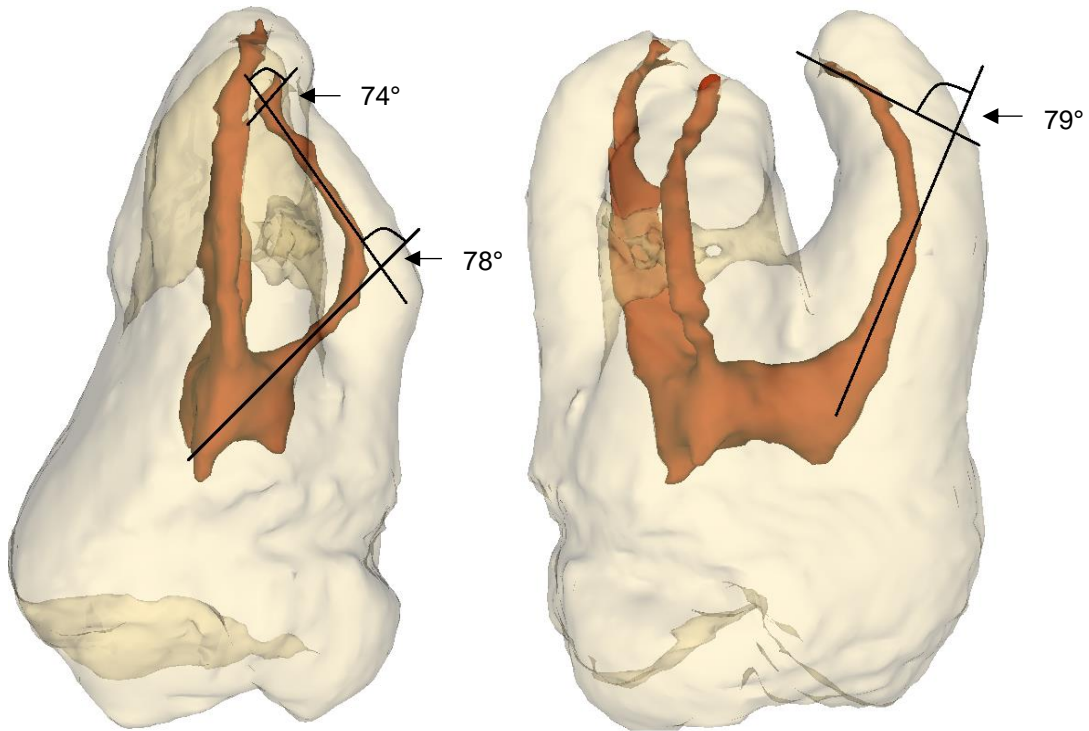


Abbildung 5: 1. Versuchsreihe: Wurzelkanäle mit einer Krümmung  $<90^\circ$

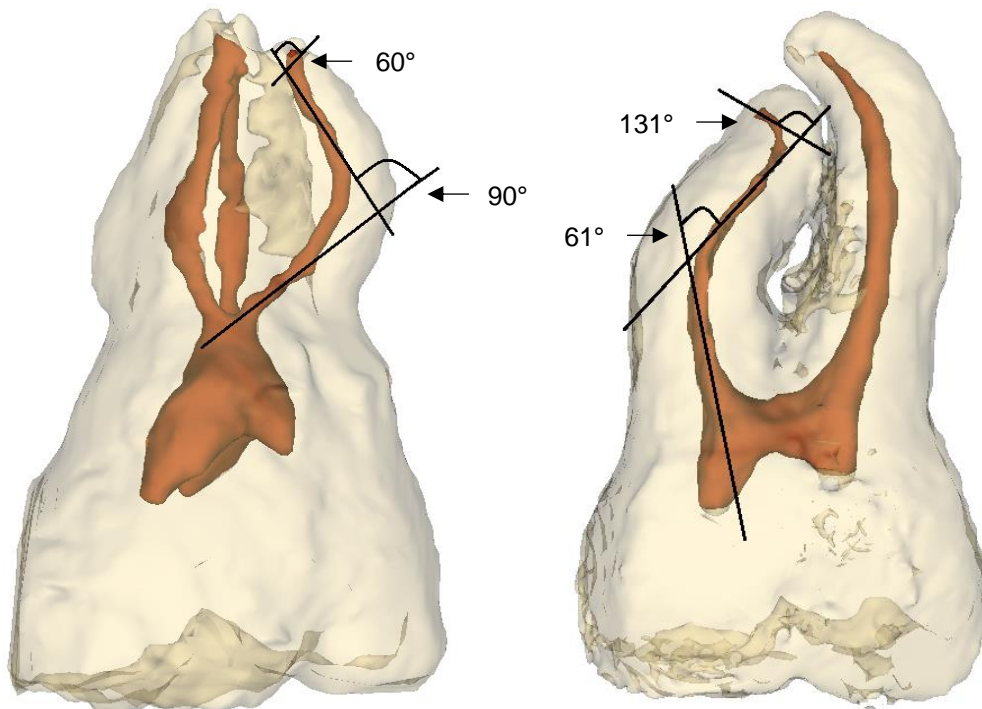


Abbildung 6: 2. Versuchsreihe: Wurzelkanäle mit einer Krümmung  $\geq 90^\circ$

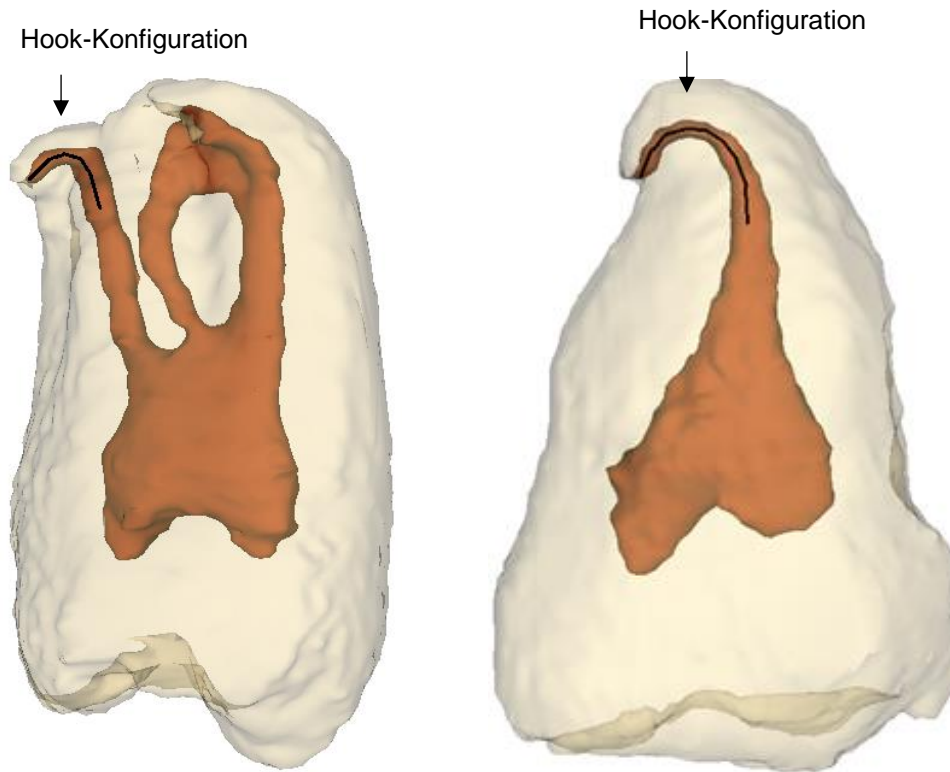


Abbildung 7: 3. Versuchsreihe: Wurzelkanäle mit einer Hook-Konfiguration

### 2.2.2. Vorbereitung und 3D-Druck der Zähne

Die ausgewählten Zähne werden digital vor dem 3D-Druck vorbereitet. Mit dem Programm Meshmixer, das ein Bearbeitungsprogramm für 3D-Modelle ist, wird der Zahn als 3D-Modell aus Triangle-Meshes dargestellt. Die Zahnoberfläche wird außer im Bereich des Foramen apicale geglättet. Das 3D-Modell wird dann in das Programm 3D Slicer importiert, das das 3D-Modell in horizontale Schichten schneidet und Druckaufträge für jede einzelne Schicht für den 3D-Drucker anlegt. Mit diesem Programm kann in jeder Schicht die Außenform des Zahnes und der Wurzelkanalverlauf kontrolliert und angepasst werden (s. Abbildung 7). Der Wurzelkanal wird als Hohlraum definiert und während des Drucks nur mit Stützmaterial gefüllt. Die entstandene Datei wird weiter mit dem Programm 123D Design bearbeitet. Im ersten Schritt wird mit diesem Design-Programm der Zahn so geschnitten, dass nur noch der für die Studie relevante Wurzelkanal mit umgebenden Dentin vorhanden ist. Anschließend wird die Dentindicke im Bereich der Außenkurvatur exakt definiert, da ein übermäßiger Dentinabtrag und eine

Verfälschung der Kanal Anatomie i.d.R. hier zu erwarten ist. Für die 1. Versuchsreihe, die in unserer Studie den niedrigsten Schwierigkeitsgrad darstellt, wird eine Dentindicke im Bereich der Außenkrümmung von 150  $\mu\text{m}$  festgelegt. Ein zirkulär gleichmäßiger Dentinabtrag von 150  $\mu\text{m}$  an allen Seiten eines Wurzelkanals entspricht der Aufbereitung mit sechs weiteren Größen nach dem ersten klemmenden Instrument. Dies ist klinisch i.d.R. ausreichend. Wenn also ein Instrument in dieser Studie im Bereich der Außenkrümmung mit der definierten Dentindicke von 150  $\mu\text{m}$  perforiert, kann davon ausgegangen werden, dass an dieser Stelle ein übermäßiger Dentinabtrag stattgefunden hat.

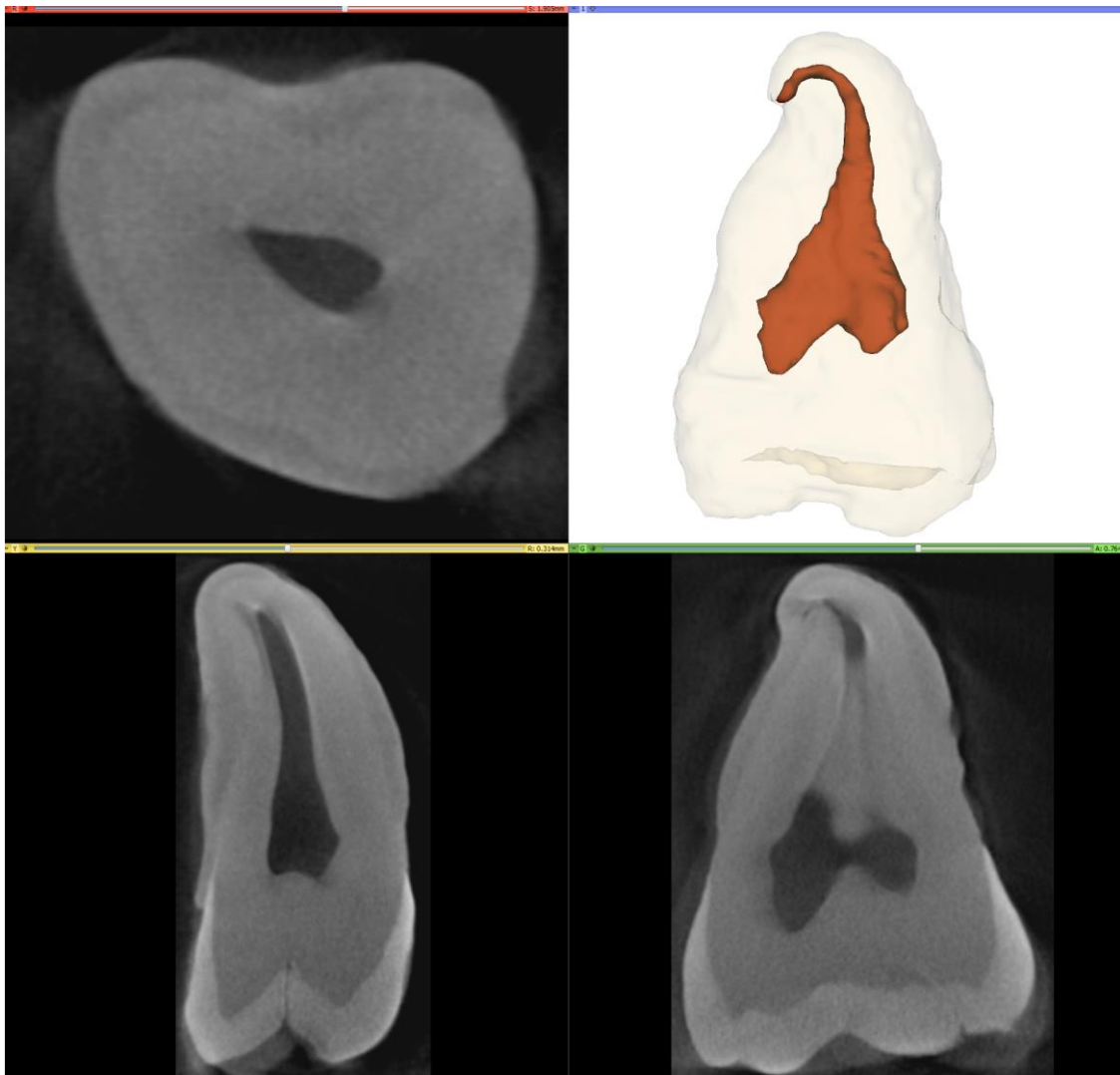


Abbildung 8: 3D-Rekonstruktion des Zahnes und des Kanalsystems aus Micro CT-Daten

Für die 2. und die 3. Versuchsreihe wird eine Dentindicke im Bereich der Außenkurvatur von 200 µm festgelegt, da diese beiden Versuchsreihen hohe Schwierigkeitsgrade in der endodontischen Aufbereitung darstellen. Es kann bei dieser äußerst komplexen Kanalanatomie davon ausgegangen werden kann, dass kein zirkulär gleichmäßiger Dentinabtrag stattfindet, sondern an der Außenkurvatur mehr Dentin abgetragen wird und eine Kanalbegradigung stattfindet. (Briseño 1992: 279-290; Glosson/Haller/Dove/del Rio 1995: 146-151; Herrmann 1999: 41-54; Büning und Ioannou 1999:84-85; Yun/Kim 2003: 228-233; Calberson/Deroose/Hommez/De Moor 2004: 613-623). Im letzten Schritt wird eine Trepanationsöffnung hergestellt (s. Abbildung 8).

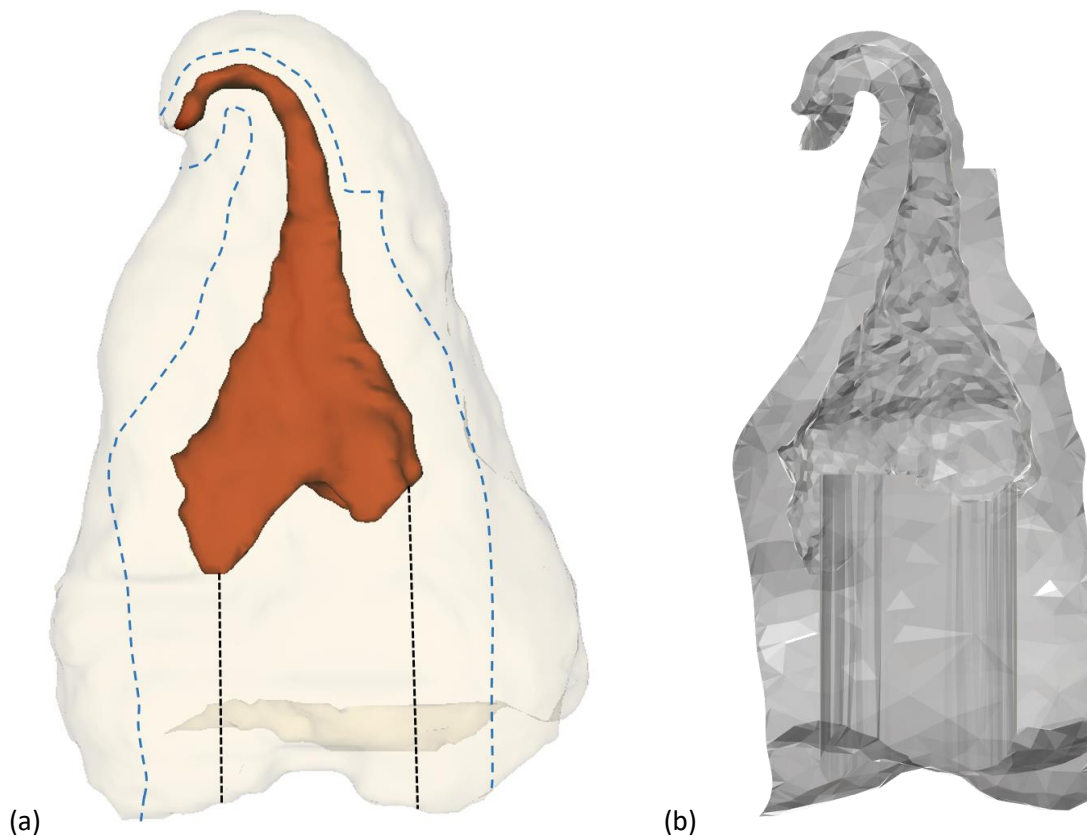


Abbildung 9: Bearbeitungsschritte: Intakter Zahn mit Schnittlinien (a), Zahn in Pulp-Slice-Form mit Trepanationsöffnung und definierter Dentindicke im Bereich der Außenkurvatur (b)

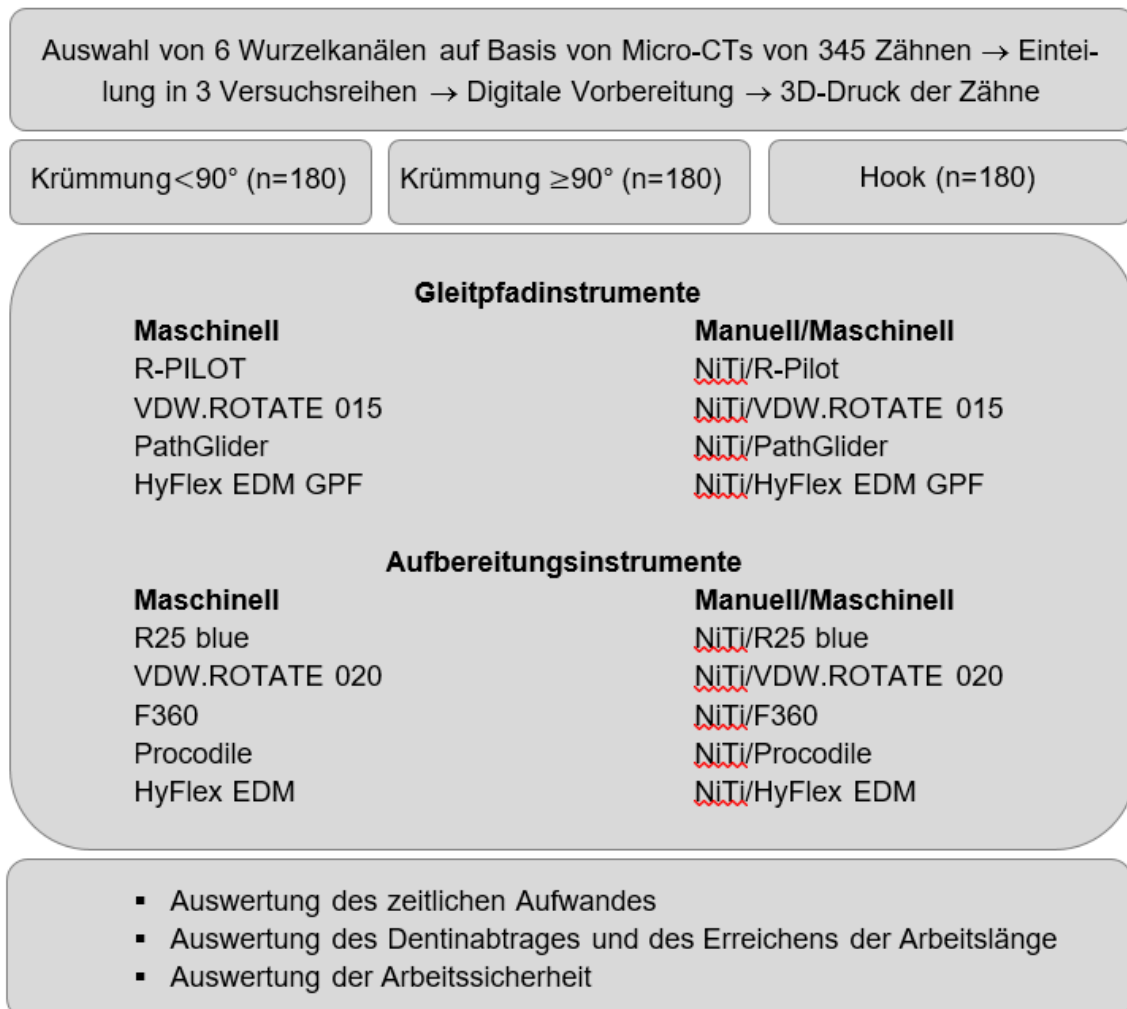
Die entstandene Datei wird wieder in das Programm Meshmixer exportiert und dann als STL-Datei gespeichert. Diese STL-Datei wird an den 3D-Drucker geschickt. Für diese Studie wird der 3D-Drucker Stratasys object 30 ortho desk

verwendet. Das Material für den 3D-Druck ist VeroGlaze MED620, das Stützmaterial für den 3D-Druck ist Support SUP705. Nach dem Druck werden die Zähne für 10 Minuten in Wasser gelegt. Danach kann das äußere Stützmaterial entfernt werden. Anschließend werden die Zähne getrocknet. Das interne Stützmaterial wird vor der Aufbereitung der Wurzelkanäle nicht entfernt.

## 2.3. Versuchsdurchführung

### 2.3.1. Versuchsaufbau und allgemeine Durchführung

Tabelle 1: Versuchsaufbau



Die Zeitmessung beginnt mit dem Einbringen des Instruments in den Wurzelkanal. Die Instrumente werden vor jedem erneuten Einbringen auf Abnutzungs-

erscheinungen kontrolliert. Bei sichtbaren Abnutzungserscheinungen wird das Instrument aussortiert. Die maschinellen Instrumente werden für maximal 3 Kanäle, die Handinstrumente für maximal 6 Wurzelkanäle verwendet. Die Zeitmessung endet, wenn der Gleitpfad erfolgreich hergestellt und die vollständige Arbeitslänge unter Erhalt der Kanalanatomie erreicht werden konnte oder wenn das Instrument den Zahn im Bereich der Außenkrümmung perforiert hat und dementsprechend übermäßig Dentin in diesem Bereich abgetragen worden ist. Das Ergebnis der Zeitmessung, des Dentinabtrages, des Erreichens der Arbeitslänge und eventuell auftretende Instrumentenfrakturen werden direkt im Anschluss dokumentiert. Die Zeitmessung und die Dokumentation erfolgen so für alle Versuchsgruppen (1. - 18.). In der 1. Versuchsreihe werden zwei verschiedene Wurzelkanäle untersucht. Je 5 Exemplare von den beiden Wurzelkanälen werden getestet, sodass insgesamt an 10 Wurzelkanälen eine Gleitpfadherstellung bzw. Aufbereitung erfolgt. In der 2. Und 3. Versuchsreihe erfolgt ebenfalls jeweils an insgesamt 10 Wurzelkanälen, an je 5 Exemplaren von den beiden Wurzelkanälen, die Gleitpfadherstellung bzw. die Aufbereitung. Auf die Verwendung von Spüllösungen kann in dieser Studie verzichtet werden, da durch die primäre Zugangskavität das Coronal flaring ausreichend gegeben ist, um einen Debris-Abtransport zu gewährleisten.

### **2.3.2. Spezielle Durchführung in den einzelnen Versuchsgruppen nach Herstellerangaben**

#### **1. Versuchsgruppe:**

Der Endodontiemotor wird für die Gleitpfadherstellung mit der R-PILOT von VDW auf das RECIPROC-Programm eingestellt. Das Instrument wird unter Bewegung in den Kanal eingebracht. Die Präparation des Gleitpfades erfolgt nun nach Herstellerangaben in pecking motions. Ein Peck beschreibt eine Auf- und Abwärtsbewegung mit einer Amplitude von 2-3 mm. So werden die Instrumente schrittweise und drucklos auf die volle Arbeitslänge gebracht. Nach 3 Pecks wird das Instrument unter Bewegung aus dem Kanal entfernt und in dem Interim-Stand gereinigt.

2. Versuchsgruppe:

In den 3 Versuchsreihen wird mit einem NiTi ISO 015 Handinstrument ein manueller Gleitpfad durch die Balanced force-Technik und durch Circumferential filing hergestellt. Anschließend erfolgt die maschinelle Gleitpfadherstellung mit der R-PILOT wie für die 1. Versuchsgruppe beschrieben.

3. Versuchsgruppe:

Am Endodontiemotor werden eine Umdrehungszahl von 350 rpm und eine Drehmomentbegrenzung von 130 gcm für die Gleitpfadherstellung mit der VDW.ROTATE-Gleitpfadfeile eingestellt. Das Instrument wird unter Bewegung in den Kanal eingebracht. Die Präparation des Gleitpfades erfolgt nun nach Herstellerangaben durch pecking motions. So werden die Instrumente schrittweise und drucklos auf die volle Arbeitslänge gebracht. Nach 3 Pecks wird das Instrument unter Bewegung aus dem Kanal entfernt und in dem Interim-Stand gereinigt.

4. Versuchsgruppe:

In den 3 Versuchsreihen wird mit einem NiTi ISO 015 Handinstrument ein manueller Gleitpfad durch die Balanced force-Technik und durch Circumferential filing hergestellt. Anschließend erfolgt die maschinelle Gleitpfadherstellung mit der VDW.ROTATE-Gleitpfadfeile wie für die 3. Versuchsgruppe beschrieben.

5. Versuchsgruppe:

Am Endodontiemotor werden eine Umdrehungszahl von 300 rpm und eine Drehmomentbegrenzung von 50 gcm für die Gleitpfadherstellung mit der PathGlider eingestellt. Das Instrument wird unter Bewegung in den Kanal eingebracht. Die Gleitpfadherstellung erfolgt nach Herstellerangaben durch pecking motions für einen Zeitraum von 5-8 Sekunden. Danach wird das Instrument im Interim-Stand gereinigt. So werden die Instrumente schrittweise und drucklos auf die volle Arbeitslänge gebracht.



6. Versuchsgruppe:

In den 3 Versuchsreihen wird mit einem NiTi ISO 015 Handinstrument ein manueller Gleitpfad durch die Balanced force-Technik und durch Circumferential filing hergestellt. Anschließend erfolgt die maschinelle Gleitpfadherstellung mit der PathGlider wie für die 5. Versuchsgruppe beschrieben.

7. Versuchsgruppe:

Am Endodontiemotor werden eine Umdrehungszahl von 300 rpm und eine Drehmomentbegrenzung von 180 gcm für die Gleitpfadherstellung mit der HyFlex EDM Glidepath File eingestellt. Die Präparation des Gleitpfades erfolgt nun nach Herstellerangaben: Die Feile wird mit abgeschaltetem Motor in den Kanal eingebracht. Bei Widerstand wird 1 mm zurückgegangen. Dann wird der Motor gestartet und es wird langsam mit tippenden Bewegungen und ohne Druck vorwärts gearbeitet. Nach jedem Einbringen in den Kanal wird das Instrument im Interim-Stand gereinigt werden. So werden die Instrumente schrittweise und drucklos auf die volle Arbeitslänge gebracht.

8. Versuchsgruppe:

In den 3 Versuchsreihen wird mit einem NiTi ISO 015 Handinstrument ein manueller Gleitpfad durch die Balanced force-Technik und durch Circumferential filing hergestellt. Anschließend erfolgt die maschinelle Gleitpfadherstellung mit der HyFlex EDM Glidepath File wie für die 7. Versuchsgruppe beschrieben.

9. Versuchsgruppe:

Der Endodontiemotor wird für die Aufbereitung mit der R25 blue auf das RECIPROC-Programm eingestellt. Das Instrument wird unter Bewegung in den Kanal eingebracht. Die Aufbereitung erfolgt nun nach Herstellerangaben: Die Instrumente werden bei der maschinellen Aufbereitung in pecking motions eingebracht. So werden die Instrumente schrittweise und drucklos auf die volle Arbeitslänge gebracht. Nach 3 Pecks wird das Instrument unter Bewegung aus dem Kanal entfernt und in dem Interim-Stand gereinigt.



10. Versuchsgruppe:

In den 3 Versuchsreihen wird mit einem NiTi ISO 015 Handinstrument ein manueller Gleitpfad durch die Balanced force-Technik und durch Circumferential filing hergestellt. Anschließend erfolgt die Aufbereitung mit der R25 blue wie für die 9. Versuchsgruppe beschrieben.

11. Versuchsgruppe:

Am Endodontiemotor werden eine Umdrehungszahl von 350 rpm und eine Drehmomentbegrenzung von 210 gcm für die Aufbereitung mit der VDW.ROTATE eingestellt. Das Instrument wird unter Bewegung in den Kanal eingebracht. Die Aufbereitung erfolgt nun nach Herstellerangaben: Die Instrumente werden bei der maschinellen Aufbereitung in pecking motions eingebracht. So werden die Instrumente schrittweise und drucklos auf die volle Arbeitslänge gebracht. Nach 3 Pecks wird das Instrument unter Bewegung aus dem Kanal entfernt und in dem Interim-Stand gereinigt.

12. Versuchsgruppe:

In den 3 Versuchsreihen wird mit einem NiTi ISO 015 Handinstrument ein manueller Gleitpfad durch die Balanced force-Technik und durch Circumferential filing hergestellt. Anschließend erfolgt die Aufbereitung mit der VDW.ROTATE wie für die 11. Versuchsgruppe beschrieben.

13. Versuchsgruppe:

Am Endodontiemotor werden eine Umdrehungszahl von 300 rpm und eine Drehmomentbegrenzung von 180 gcm für die Aufbereitung mit der F360 eingestellt. Das Instrument wird unter Bewegung in den Kanal eingebracht. Die Aufbereitung erfolgt nach Herstellerangaben durch pecking motions für einen Zeitraum von 5-8 Sekunden. Danach wird das Instrument im Interim-Stand gereinigt werden. So werden die Instrumente schrittweise und drucklos auf die volle Arbeitslänge gebracht.

14. Versuchsgruppe:

In den 3 Versuchsreihen wird mit einem NiTi ISO 015 Handinstrument ein manueller Gleitpfad durch die Balanced force-Technik und durch Circumferential filing hergestellt. Anschließend erfolgt die Aufbereitung mit der F360 wie für die 13. Versuchsgruppe beschrieben.

15. Versuchsgruppe:

Der Endodontiemotor wird für die Aufbereitung mit der Procodile auf das RECIPROC-Programm eingestellt. Das Instrument wird unter Bewegung in den Kanal eingebracht. Die Aufbereitung erfolgt nach Herstellerangaben durch pecking motions für einen Zeitraum von 5-8 Sekunden. Danach wird das Instrument im Interim-Stand gereinigt werden. So werden die Instrumente schrittweise und drucklos auf die volle Arbeitslänge gebracht.

16. Versuchsgruppe:

In den 3 Versuchsreihen wird mit einem NiTi ISO 015 Handinstrument ein manueller Gleitpfad durch die Balanced force-Technik und durch Circumferential filing hergestellt. Anschließend erfolgt die Aufbereitung mit der Procodile wie für die 15. Versuchsgruppe beschrieben.

17. Versuchsgruppe:

Am Endodontiemotor werden eine Umdrehungszahl von 400 rpm und eine Drehmomentbegrenzung von 250 gcm für die Aufbereitung mit der HyFlex EDM eingestellt. Die Aufbereitung erfolgt nun nach Herstellerangaben: Die Feile wird mit abgeschaltetem Motor in den Kanal eingebracht. Bei Widerstand wird 1 mm zurückgegangen. Dann wird der Motor gestartet und es wird langsam mit tippen Bewegungen und ohne Druck vorwärts gearbeitet. Nach jedem Einbringen in den Kanal wird das Instrument im Interim-Stand gereinigt werden. So werden die Instrumente schrittweise und drucklos auf die volle Arbeitslänge gebracht.

#### 18. Versuchsgruppe:

In den 3 Versuchsreihen wird mit einem NiTi ISO 015 Handinstrument ein manueller Gleitpfad durch die Balanced force-Technik und durch Circumferential filing hergestellt. Anschließend erfolgt die Aufbereitung mit der HyFlex EDM wie für die 17. Versuchsgruppe beschrieben.

### **2.4. Auswertung**

#### **2.4.1. Auswertung des zeitlichen Aufwandes**

Während der Versuche wird die Zeit gemessen, die für die Präparation des Kanals benötigt wird. Die Zeitmessung beginnt mit Einbringen der Instrumente in den Kanal und endet bei erfolgreicher Erschließung des Kanals oder bei Perforation im Bereich der Außenkrümmung und so im Bereich der definierten Dentindicke. Bei der Verwendung von zwei Instrumenten wird die Zeit in zwei Runden festgehalten. Die Zeit wird in Sekunden mit einer Nachkommastelle notiert. Der zeitliche Aufwand für die Gleitpfadherstellung mit den verschiedenen Instrumenten kann so verglichen werden.

#### **2.4.2. Auswertung des Dentinabtrages und der erreichten Arbeitslänge**

Die Auswertung des Dentinabtrages kann durch die definierte Dentindicke im Bereich der Außenkrümmung makroskopisch beurteilt werden. Bei Perforation der Außenkrümmung durch ein Instrument wird ein übermäßiger Dentinabtrag ohne Erhalt der Kanalanatomie notiert. Außerdem wird festgehalten, dass die Arbeitslänge nicht erreicht wurde. Bei Erschließung des Kanals bis zur vollständigen Arbeitslänge ohne Perforation der Außenkrümmung wird regelhafter Dentinabtrag mit Erhalt der Kanalanatomie und das Erreichen der Arbeitslänge notiert. Bei der Auswertung kann so verglichen werden bei welchen Instrumenten und bei welcher Art der Gleitpfadherstellung die Kanalanatomie am besten und sichersten erhalten bleibt und die Arbeitslänge erreicht wird.

### **2.4.3. Auswertung der Arbeitssicherheit**

Nach den Versuchen wird notiert, ob es zu einer Instrumentenfraktur im Kanal gekommen ist. Die Auswertung erlaubt so Rückschlüsse, wie sicher die verschiedenen Instrumente und die verschiedenen Arten der Gleitpfadherstellungen sind.

### **2.5. Statistische Auswertung**

Die erhobenen Daten dieser Studie werden mit dem Statistikprogramm IBM SPSS Statistics 25 ausgewertet. Die Auswertung des zeitlichen Aufwandes erfolgt durch die einfaktorielle Varianzanalyse ANOVA, um den Einfluss der Faktoren Instrumente, Krümmung und Aufbereitungsart auf die Aufbereitungszeit zu untersuchen. Die Auswertung des Dentinabtrages, der erreichten Arbeitslänge und der Arbeitssicherheit werden durch die logistische Regression analysiert. Das Signifikanzniveau wird mit 5%, d.h.  $p < 0,05$  festgelegt. Es werden keine Kanäle aus der Berechnung ausgeschlossen.

## 3. Ergebnisse

### 3.1. Zeitlicher Aufwand

#### 3.1.1. Die maschinellen Gleitpfadinstrumente

Die verschiedenen Gleitpfadinstrumente haben einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Der zeitliche Aufwand für die Gleitpfadpräparation mit der HyFlex EDM Glidepath File ist signifikant höher im Vergleich zu der PathGlider, der R-PILOT und der VDW.ROTATE 015. Den kürzesten zeitlichen Aufwand für die Gleitpfadherstellung zeigt die VDW.ROTATE 015. Die Unterschiede zwischen der VDW.ROTATE 015, der R-PILOT und der PathGlider sind nicht signifikant. Die Aufbereitungsart hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Die Versuchsgruppen, in denen die Aufbereitung kombiniert (manuell/maschinell) erfolgt, zeigen einen signifikant höheren zeitlichen Aufwand als die Versuchsgruppen, in denen die Aufbereitungsart ausschließlich maschinell war. Auch die Krümmung hat einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Der zeitliche Aufwand in der 1. (<math><90^\circ</math>) und in der 3. Versuchsreihe (Hook) ist signifikant niedriger als der in der 2. Versuchsreihe (>math>\geq 90^\circ</math>). Der zeitliche Aufwand ist in der 3. Versuchsreihe (Hook) nicht signifikant niedriger als in der 1. Versuchsreihe (<math><90^\circ</math>).

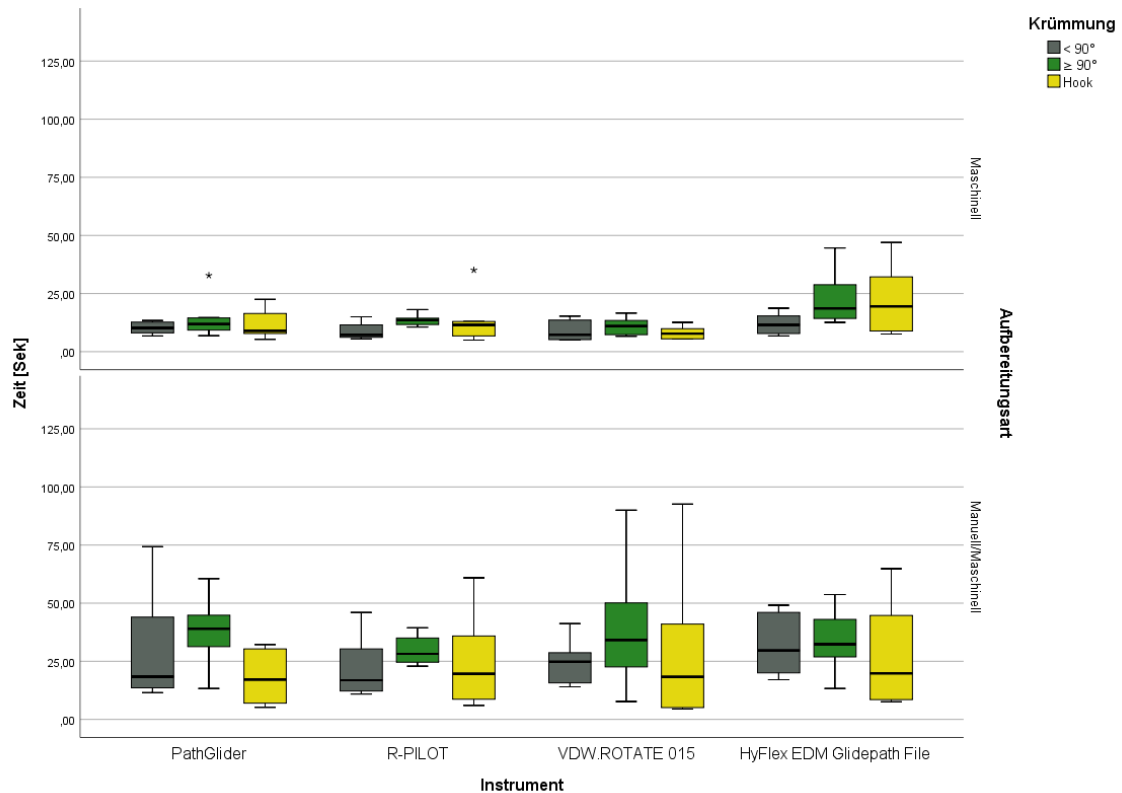


Abbildung 10: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand

Außerdem ist eine Interaktion zwischen der Aufbereitungsart (maschinell vs. manuell/maschinell) und der Krümmung erkennbar. In der 3. Versuchsreihe (Hook) nimmt der zeitliche Aufwand sowohl bei den Versuchsgruppen mit der maschinellen Aufbereitungsart als auch bei den Versuchsgruppen mit der kombinierten manuellen/maschinellen Aufbereitungsart ab. In den Versuchsgruppen mit der kombinierten Aufbereitungsart ist die Abnahme aber noch deutlicher.

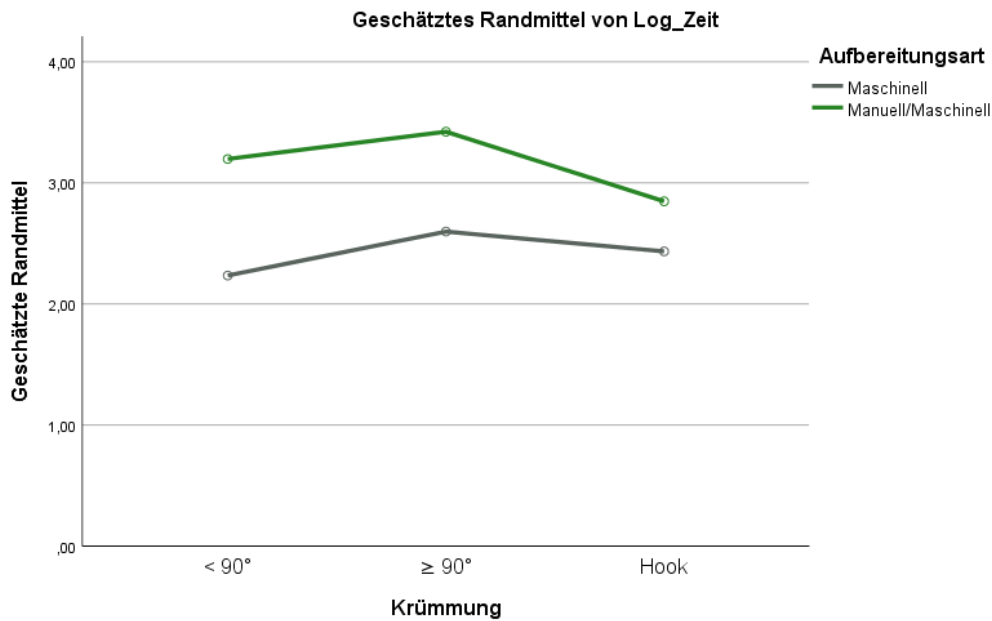


Abbildung 11: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand - Interaktion zwischen Aufbereitungsart und Krümmung

### 3.1.2. Die maschinellen Aufbereitungsinstrumente

Die verschiedenen Aufbereitungsinstrumente haben ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Der zeitliche Aufwand für die Präparation mit der R25 blue ist signifikant höher im Vergleich zu den anderen maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (F360, HyFlex EDM, Procodile, VDW.ROTATE 020). Den kürzesten zeitlichen Aufwand für die Präparation zeigt die VDW.ROTATE 020, im Vergleich zu der HyFlex EDM, der F360 und der R25 blue ist der Unterschied signifikant. Der zeitliche Aufwand für die Präparation mit der F360 ist im Vergleich zu der Procodile und der VDW.ROTATE 020 signifikant länger. Der zeitliche Aufwand der Präparation mit der HyFlex EDM ist im Vergleich zu der VDW.ROTATE 020 signifikant länger. Die Unterschiede zwischen der F360 und der HyFlex EDM, der Procodile und der HyFlex EDM und der Procodile und der VDW.ROTATE sind nicht signifikant. Die Aufbereitungsart (maschinell vs. manuell/maschinell) hat einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Die Versuchsgruppen, in denen die Aufbereitung kombiniert (manuell/maschinell) erfolgt, zeigen einen signifikant höheren zeitlichen Aufwand als die Versuchsgruppen, in denen die Aufbereitungsart ausschließlich maschinell ist.

Neben der Aufbereitungsart hat auch die Krümmung des Wurzelkanals einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Der zeitliche Aufwand ist in der 3. Versuchsreihe (Hook) signifikant niedriger als in der 1. ( $< 90^\circ$ ) und 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ). Der zeitliche Aufwand ist in der 1. Versuchsreihe ( $< 90^\circ$ ) nicht signifikant niedriger als in der 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ).

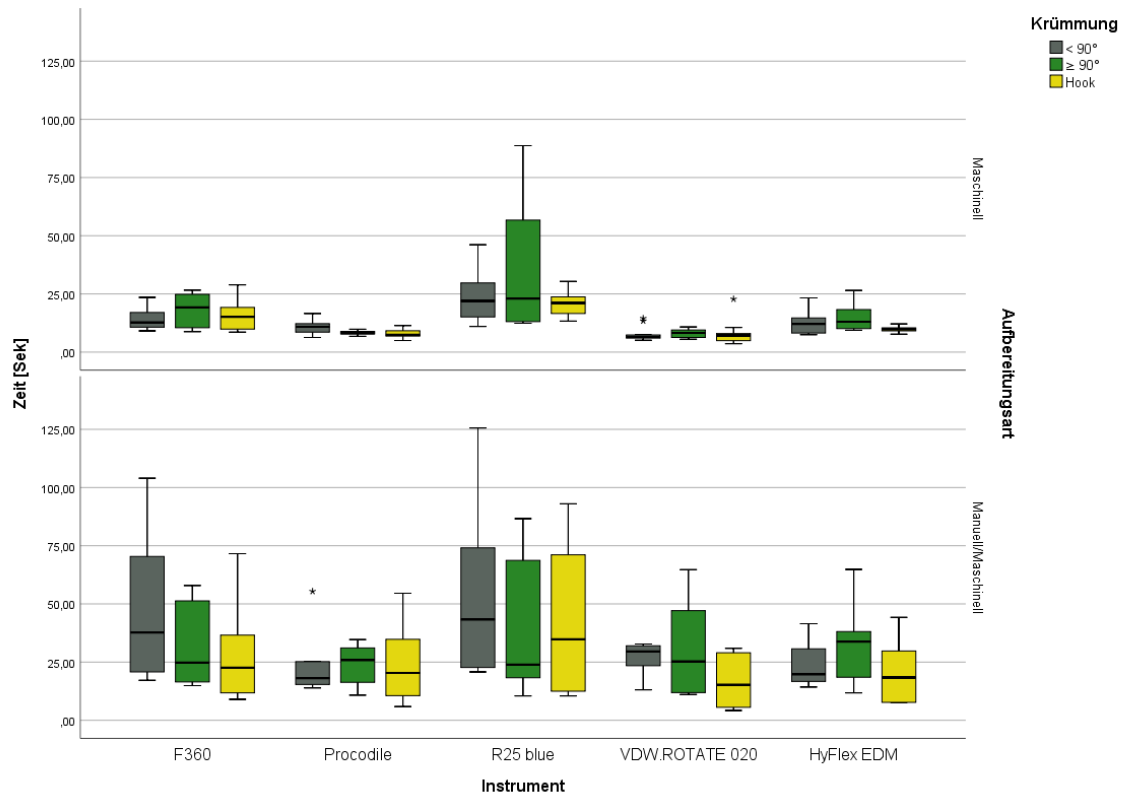


Abbildung 12: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (9. - 18. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand

Außerdem ist eine Interaktion zwischen der Aufbereitungsart (maschinell vs. manuell/maschinell) und der Instrumente erkennbar. Die Aufbereitungsarten (maschinell vs. manuell/maschinell) zeigen eine Interaktion mit den Instrumenten F360, Procodile und VDW.ROTATE 020. Bei der kombinierten manuellen/maschinellen Aufbereitung ist der zeitliche Aufwand für alle Instrumente höher als für die ausschließlich maschinelle Aufbereitung, für jene drei Instrumente ist die Zunahme des zeitlichen Aufwandes im Verhältnis noch höher.



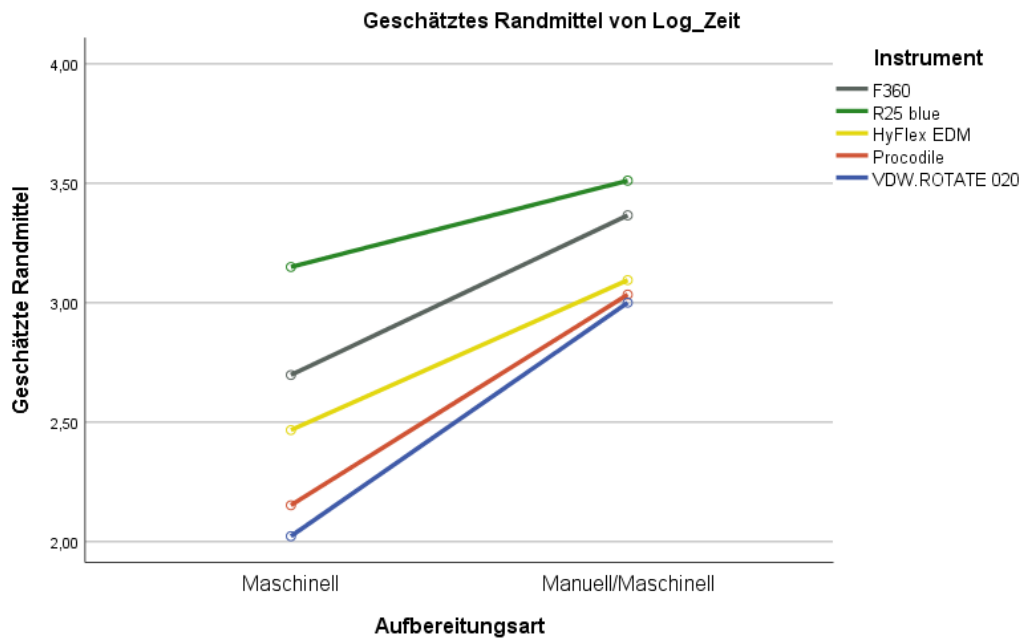


Abbildung 13: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (9. - 18. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand - Interaktion zwischen Aufbereitungsart und Instrument

### 3.1.3. Maschinelle Gleitfad- vs. maschinelle Aufbereitungsinstrumente

Beim Vergleich des zeitlichen Aufwandes zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen der Aufbereitung mit maschinellen Gleitfad- und der Aufbereitung mit maschinellen Aufbereitungsinstrumenten. Die Aufbereitungsart hingegen hat einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Die Versuchsgruppen, in denen die Aufbereitung kombiniert (manuell/maschinell) erfolgt, zeigen einen signifikant höheren zeitlichen Aufwand als die Versuchsgruppen, in denen die Aufbereitungsart ausschließlich maschinell war. Dies zeigt sich sowohl bei der Verwendung der maschinellen Gleitfad- als auch bei der Verwendung der maschinellen Aufbereitungsinstrumente. Neben der Aufbereitungsart hat auch die Krümmung des Wurzelkanals einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Der zeitliche Aufwand ist in der 3. Versuchsreihe (Hook) signifikant niedriger als in der 1. ( $< 90^\circ$ ) und 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ).

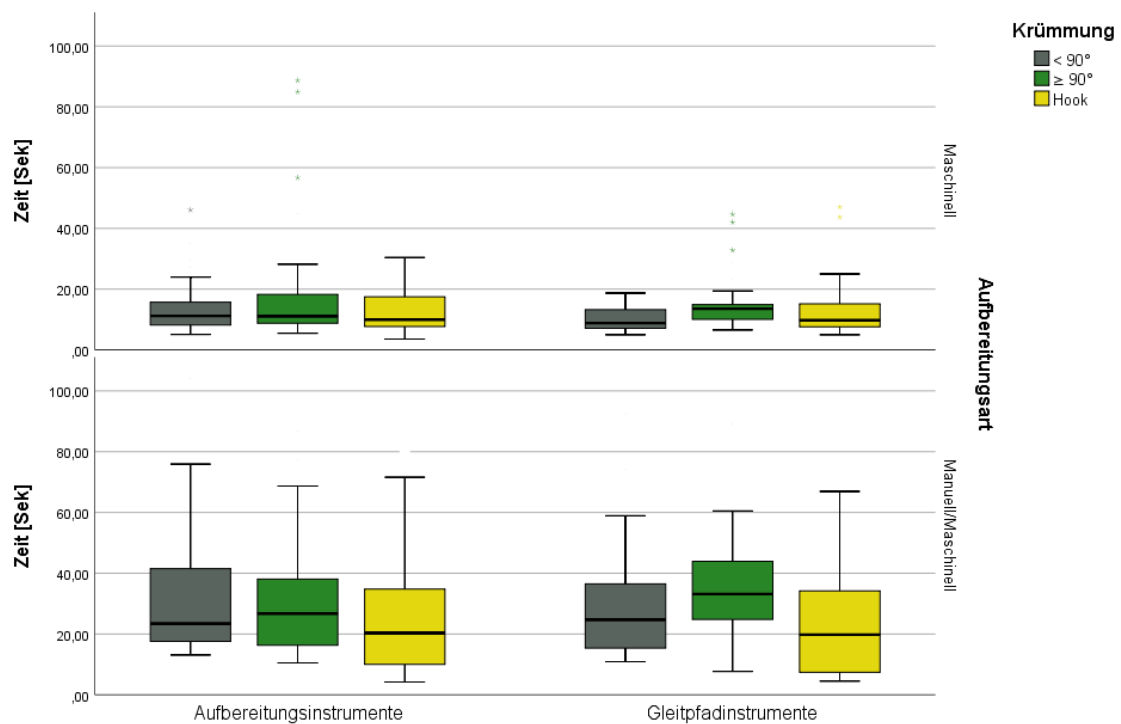


Abbildung 14: Vergleich der maschinellen Gleitfad- und der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand

Außerdem ist eine Interaktion zwischen der Aufbereitungsart (maschinell vs. manuell/maschinell) und der Krümmung erkennbar. In der 3. Versuchsreihe (Hook) nimmt der zeitliche Aufwand sowohl bei den Versuchsgruppen mit der maschinellen Aufbereitungsart als auch bei den Versuchsgruppen mit der kombinierten manuellen/maschinellen Aufbereitungsart ab. In den Versuchsgruppen mit der kombinierten Aufbereitungsart ist die Abnahme noch deutlicher.

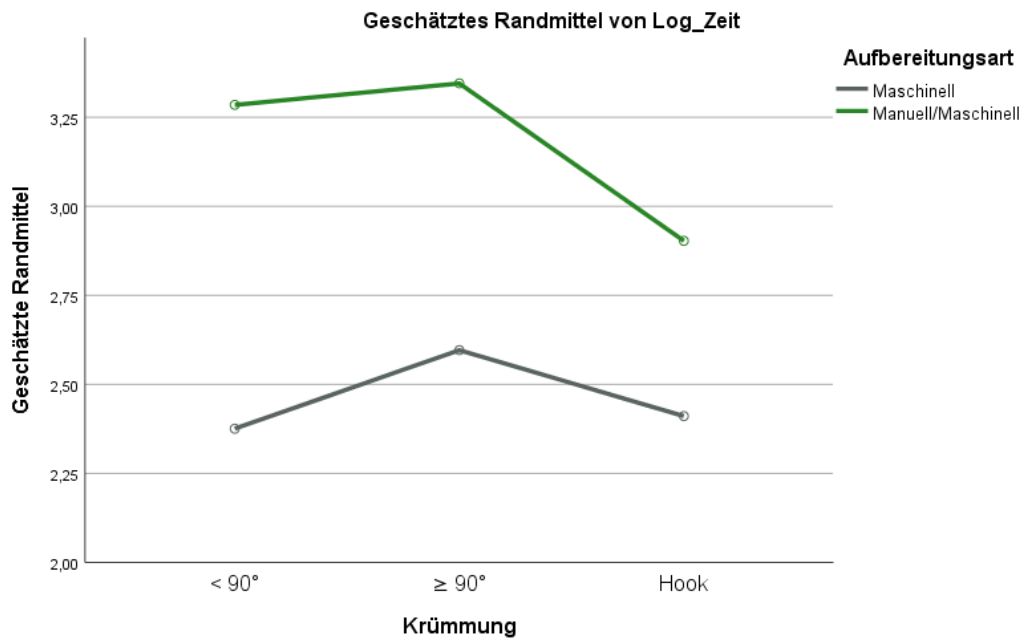


Abbildung 15: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- und der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Zeitlicher Aufwand - Interaktion zwischen Aufbereitungsart und Krümmung

## 3.2. Dentinabtrag und Erreichen der Arbeitslänge

### 3.2.1. Die maschinellen Gleitpfadinstrumente

#### Dentinabtrag

In der 1. Versuchsreihe (< 90°) führen die HyFlex EDM Glidepath File ohne initiales manuelles Scouting und die VDW.ROTATE 015 mit initialem manuellen Scouting nur in 10% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die VDW.ROTATE 015 ohne initiales manuelles Scouting und die R-PILOT mit initialem manuellen Scouting führen in 20% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die R-PILOT ohne initiales manuelles Scouting führt in 30% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die PathGlider mit initialem manuellen Scouting und die HyFlex EDM Glidepath File mit initialem manuellen Scouting führen in 40% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die PathGlider ohne initiales manuelles Scouting führt in 50% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Das initiale manuelle Scouting führt in der 1. Versuchsreihe bei der PathGlider, bei der R-PILOT und bei der VDW.ROTATE 015 dazu, dass um 10% seltener ein übermäßiger Dentinabtrag erfolgt. Bei der HyFlex EDM Glidepath

File führt das initiale manuelle Scouting aber dazu, dass um 30% häufiger ein übermäßiger Dentinabtrag erfolgt.

Tabelle 2: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ) - Übermäßiger Dentinabtrag

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	10%	40%
VDW.ROTATE 015	20%	10%
R-PILOT	30%	20%
PathGlider	50%	40%

In der 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) führt die HyFlex EDM Glidepath File ohne initiales manuelles Scouting in 20% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die HyFlex EDM Glidepath File mit initialem manuellen Scouting führt in 50% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die VDW.ROTATE 015 mit initialem manuellen Scouting führt in 80% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die R-PILOT ohne initiales manuelles Scouting und die PathGlider ohne initiales manuelles Scouting führen in 90% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. In allen anderen, nicht genannten Versuchsgruppen erfolgt in der 2. Versuchsreihe in 100% der Fälle ein übermäßiger Dentinabtrag. Das initiale manuelle Scouting führt in der 2. Versuchsreihe bei der VDW.ROTATE 015 dazu, dass in nur 80% der Fälle statt in 100% der Fälle ein übermäßiger Dentinabtrag erfolgt. Bei den anderen Gleitpfadinstrumenten führt das initiale manuelle Scouting zu einem Nachteil: Bei der HyFlex EDM Glidepath File wird durch das initiale manuelle Scouting um 30% häufiger übermäßig Dentin abgetragen. Bei der PathGlider und bei der R-PILOT wird statt in 90% der Fälle durch das initiale manuelle Scouting in 100% der Fälle übermäßig Dentin abgetragen.

Tabelle 3: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) - Übermäßiger Dentinabtrag

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	20%	50%
VDW.ROTATE 015	100%	80%
R-PILOT	90%	100%
PathGlider	90%	100%

In der 3. Versuchsreihe (Hook) führen die VDW.ROTATE 015 mit initialem manuellen Scouting und die R-PILOT mit initialem manuellen Scouting in 70% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die HyFlex EDM Glidepath File ohne initiales manuelles Scouting führt in 80% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die VDW.ROTATE 015 ohne initiales manuelles Scouting, die HyFlex EDM Glidepath File mit initialem manuellen Scouting und die VDW.ROTATE 020 mit initialem manuellen Scouting führen in 90% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. In allen anderen, nicht genannten Versuchsgruppen erfolgt in der 3. Versuchsreihe in 100% der Fälle ein übermäßiger Dentinabtrag. Das initiale manuelle Scouting führt in der 3. Versuchsreihe bei der R-PILOT dazu, dass nur in 70% der Fälle statt in 100% der Fälle ein übermäßiger Dentinabtrag erfolgt. Bei der VDW.ROTATE 015 wird durch das initiale manuelle Scouting um 20% seltener übermäßig Dentin abgetragen. Bei der HyFlex EDM Glidepath File wird durch das initiale manuelle Scouting aber um 10% häufiger übermäßig Dentin abgetragen.

Tabelle 4: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): 3. Versuchsreihe (Hook) - Übermäßiger Dentinabtrag

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	80%	90%
VDW.ROTATE 015	90%	70%
R-PILOT	100%	70%
PathGlider	100%	100%

Insgesamt wird durch die HyFlex EDM Glidepath File signifikant seltener übermäßig Dentin abgetragen als durch die Gleitpfadinstrumente PathGlider und R-PILOT. Im Vergleich mit der VDW.ROTATE 015 führt die HyFlex EDM Glidepath File nicht signifikant seltener zum übermäßigen Dentinabtrag. Die Aufbereitungsart (maschinell vs. manuell/maschinell) hat keinen signifikanten Einfluss auf den Dentinabtrag. Die kombinierte Aufbereitungsart führt aber seltener zum übermäßigen Dentinabtrag. Die Krümmung hat einen signifikanten Einfluss auf den Dentinabtrag: In der 2. ( $\geq 90^\circ$ ) und 3. Versuchsreihe (Hook) wird signifikant häufiger übermäßig Dentin abgetragen als in der 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ).

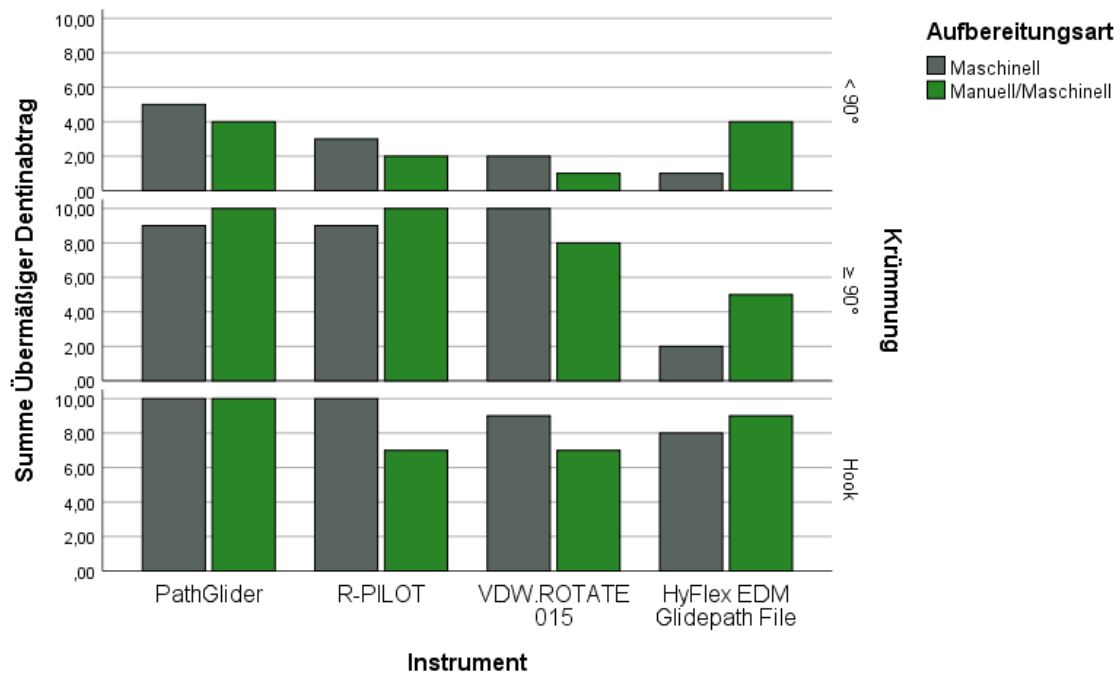


Abbildung 16: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Übermäßiger Dentinabtrag

### Erreichen der Arbeitslänge

In der 1. Versuchsreihe (< 90°) wird in 90% der Fälle die korrekte Arbeitslänge durch die HyFlex EDM Glidepath File ohne initiales manuelles Scouting und durch die VDW.ROTATE 015 mit initialem manuellen Scouting erreicht. Durch die VDW.ROTATE 015 ohne initiales manuelles Scouting und durch die R-PILOT mit initialem manuellen Scouting wird in 80% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die R-PILOT ohne initiales manuelles Scouting wird in 70% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die PathGlider mit initialem manuellen Scouting und durch die HyFlex EDM Glidepath File mit initialem manuellen Scouting wird in 60% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die PathGlider ohne initiales manuelles Scouting wird in 50% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Das initiale manuelle Scouting führt in der 1. Versuchsreihe bei der PathGlider, bei der R-PILOT und bei der VDW.ROTATE 015 dazu, dass um 10% häufiger die korrekte Arbeitslänge erreicht wird. Bei der HyFlex EDM Glidepath File führt das initiale manuelle Scouting aber dazu, dass um 30% seltener die korrekte Arbeitslänge erreicht wird.

Tabelle 5: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumenten (1. - 8. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ) - Erreichen der Arbeitslänge

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	90%	60%
VDW.ROTATE 015	80%	90%
R-PILOT	70%	80%
PathGlider	50%	60%

In der 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) wird durch die HyFlex EDM Glidepath File ohne initiales manuelles Scouting in 80% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die HyFlex EDM Glidepath File mit initialem manuellen Scouting wird in 50% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die VDW.ROTATE 015 mit initialem manuellen Scouting wird in 20% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die R-PILOT ohne initiales manuelles Scouting und durch die PathGlider ohne initiales manuelles Scouting wird in 10% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die rein maschinelle Gleitpfadherstellung mit der VDW.ROTATE, der R-PILOT und der PathGlider wird in 0% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Das initiale manuelle Scouting führt in der 2. Versuchsreihe bei der VDW.ROTATE 015 dazu, dass in 20% der Fälle statt in 0% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht wird. Bei den anderen Gleitpfadinstrumenten verschlechtert das initiale manuelle Scouting das Ergebnis: Bei der HyFlex EDM Glidepath File wird durch das initiale manuelle Scouting um 30% seltener die korrekte Arbeitslänge erreicht. Bei der PathGlider und bei der R-PILOT wird statt in 10% der Fälle durch das initiale manuelle Scouting in 0% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht.

Tabelle 6: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumenten (1. - 8. Versuchsgruppe): 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ): Erreichen der Arbeitslänge

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	80%	50%
VDW.ROTATE 015	0%	20%
R-PILOT	10%	0%
PathGlider	10%	0%

In der 3. Versuchsreihe (Hook) wird durch die VDW.ROTATE 015 mit initialem manuellen Scouting in 30% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die HyFlex EDM Glidepath File ohne initiales manuelles Scouting und durch die

R-PILOT mit initialem manuellen Scouting wird in 20% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die VDW.ROTATE 015 ohne initiales manuelles Scouting und durch die HyFlex EDM Glidepath File mit initialem manuellen Scouting wird in 10% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die PathGlider wird in 0% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht, auch das initiale manuelle Scouting bringt hierbei keinen Vorteil. Durch die rein maschinelle Gleitpfadherstellung mit der R-PILOT wird ebenfalls in 0% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Das initiale manuelle Scouting führt in der 3. Versuchsreihe bei der R-PILOT dazu, dass in 20% der Fälle statt in 0% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht wird. Bei der VDW.ROTATE 015 wird durch das initiale manuelle Scouting um 20% häufiger die korrekte Arbeitslänge erreicht. Bei der HyFlex EDM Glidepath File wird durch das initiale manuelle Scouting um 10% seltener die korrekte Arbeitslänge erreicht.

Tabelle 7: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumenten (1. - 8. Versuchsgruppe): 3. Versuchsreihe (Hook): Erreichen der Arbeitslänge

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	20%	10%
VDW.ROTATE 015	10%	30%
R-PILOT	0%	20%
PathGlider	0%	0%

Insgesamt wird durch die HyFlex EDM Glidepath File signifikant häufiger die korrekte Arbeitslänge erreicht als durch die PathGlider und die R-PILOT. Im Vergleich zur VDW.ROTATE 015 wird durch die HyFlex EDM Glidepath File nicht signifikant häufiger die korrekte Arbeitslänge erreicht. Die Aufbereitungsart (maschinell vs. manuell/maschinell) hat keinen Einfluss auf das Erreichen der Arbeitslänge. Die Krümmung hat einen signifikanten Einfluss auf das Erreichen der Arbeitslänge. In der 2. ( $\geq 90^\circ$ ) und 3. Versuchsreihe (Hook) wird signifikant seltener die korrekte Arbeitslänge erreicht als in der 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ).



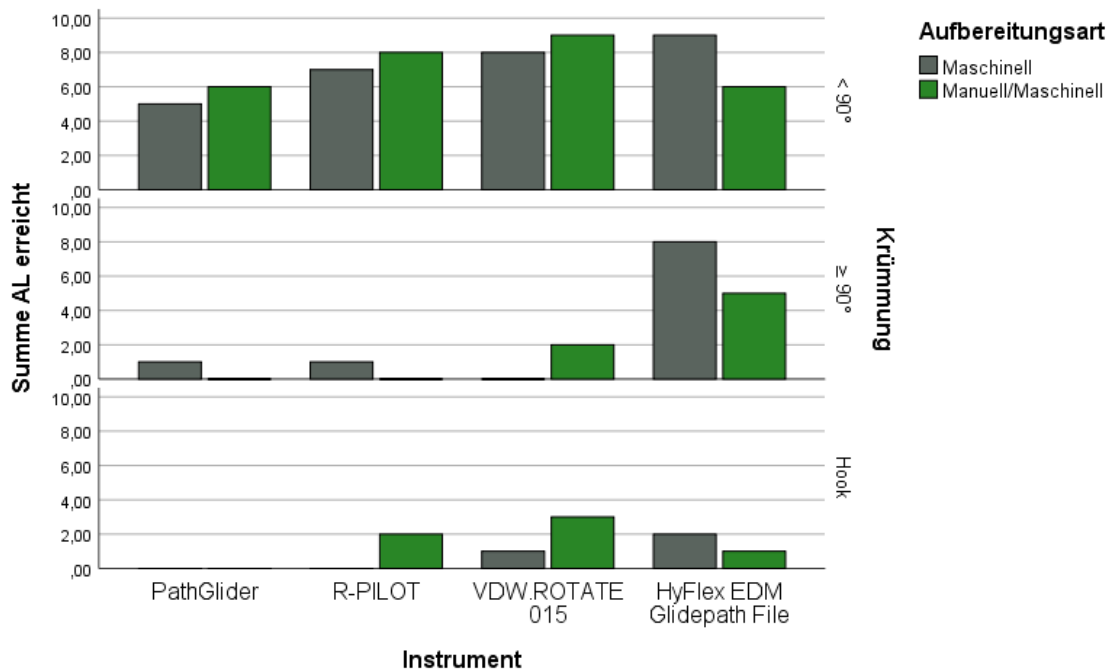


Abbildung 17: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Erreichen der Arbeitslänge

### 3.2.2. Die maschinellen Aufbereitungsinstrumente

#### Dentinabtrag

In der 1. Versuchsreihe ( $< 90^\circ$ ) führt die VDW.ROTATE 020 mit initialem manuellem Scouting in 30% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die HyFlex EDM mit initialem manuellem Scouting führt in 40% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die F360 (sowohl mit als auch ohne initiales manuelles Scouting), die Procodile (sowohl mit als auch ohne initiales manuelles Scouting), die R25 blue (sowohl mit als auch ohne initiales manuelles Scouting) und die VDW.ROTATE 020 ohne initiales manuelles Scouting führen in 50% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die HyFlex EDM ohne initiales manuelles Scouting führt in 60% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Das initiale manuelle Scouting führt in der 1. Versuchsreihe bei der VDW.ROTATE 020 und bei der HyFlex EDM dazu, dass um 20% seltener ein übermäßiger Dentinabtrag erfolgt. Bei der Aufbereitung mit der F360, mit der Procodile und mit der R25 blue führt das initiale manuelle Scouting zu keinem Unterschied beim Dentinabtrag.

Tabelle 8: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ) - Übermäßiger Dentinabtrag

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM	60%	40%
VDW.ROTATE 020	50%	30%
R25 blue	50%	50%
F360	50%	50%
Procodile	50%	50%

In der 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) führen die maschinellen Aufbereitungsinstrumente dieser Studie zu 100% zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Das initiale manuelle Scouting bringt dabei keinen Vorteil. In der 3. Versuchsreihe (Hook) führen die HyFlex EDM, die R25 blue, die F360 und die Procodile in 100% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Das initiale manuelle Scouting führt bei der VDW.ROTATE 020 dazu, dass nur in 90% statt in 100% der Fälle ein übermäßiger Dentinabtrag stattfindet. Dies beruht aber darauf, dass es in diesem Fall zu einer Fraktur des NiTi-Handinstruments kam. Die korrekte Arbeitslänge wurde dementsprechend nicht erreicht.

Tabelle 9: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): 3. Versuchsreihe (Hook) - Übermäßiger Dentinabtrag

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM	100%	100%
VDW.ROTATE 020	100%	90%
R25 blue	100%	100%
F360	100%	100%
Procodile	100%	100%

Insgesamt führt die VDW.ROTATE 020 am sichersten zu keinem übermäßigen Dentinabtrag, der Unterschied ist aber zu keinem der anderen Aufbereitungsinstrumente signifikant. Die kombinierte (manuell/maschinell) Aufbereitungsart führt nicht signifikant seltener zu einem übermäßigen Dentinabtrag. Die Krümmung hat einen signifikanten Einfluss auf den Dentinabtrag. In der 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) wird zu 100% übermäßig Dentin abgetragen und in der 3. Versuchsreihe (Hook) wird signifikant häufiger übermäßig Dentin abgetragen als in der 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ).

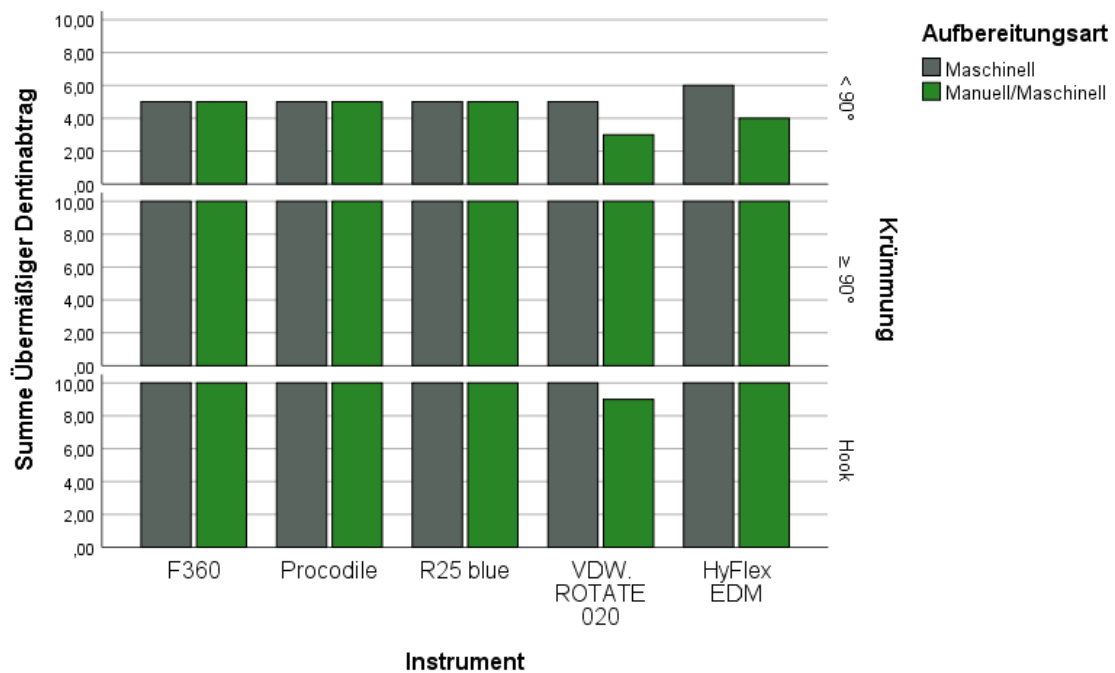


Abbildung 18: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): Übermäßiger Dentinabtrag

### Erreichen der Arbeitslänge

Mit den Aufbereitungsinstrumenten wird nur in der 1. Versuchsreihe ( $< 90^\circ$ ) die korrekte Arbeitslänge erreicht. In der 1. Versuchsreihe ( $< 90^\circ$ ) wird durch die VDW.ROTATE 020 mit initialem manuellen Scouting in 70% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die F360 ohne initiales manuelles Scouting und durch die HyFlex EDM mit initialem manuellen Scouting wird in 60% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die F360 mit initialem manuellen Scouting, durch die Procodile (sowohl mit als auch ohne initiales manuelles Scouting), durch die R25 blue (sowohl mit als auch ohne initiales manuelles Scouting) und durch die VDW.ROTATE 020 ohne initiales manuelles Scouting wird in 50% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Durch die HyFlex EDM ohne initiales manuelles Scouting wird in 40% der Fälle die korrekte Arbeitslänge erreicht. Das initiale manuelle Scouting führt in der 1. Versuchsreihe bei der VDW.ROTATE 020 und bei der HyFlex EDM dazu, dass um 20% häufiger die korrekte Arbeitslänge erreicht wird. Bei der Aufbereitung mit der F360 führt das initiale manuelle Scouting dazu, dass um 10% seltener die korrekte Arbeitslänge erreicht wird. Bei

der Aufbereitung mit der Procodile und mit der R25 blue führt das initiale manuelle Scouting zu keinem Unterschied beim Erreichen der Arbeitslänge.

Tabelle 10: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ) - Erreichen der Arbeitslänge

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM	40%	60%
VDW.ROTATE 020	50%	70%
R25 blue	50%	50%
F360	60%	50%
Procodile	50%	50%

In der 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) und in der 3. Versuchsreihe (Hook) wird durch kein maschinelles Aufbereitungsinstrument die korrekte Arbeitslänge erreicht (0%). Auch das initiale manuelle Scouting zeigt keinen Vorteil. Insgesamt wird durch die VDW.ROTATE 020 am sichersten die korrekte Arbeitslänge erreicht, der Unterschied ist aber zu keinem der anderen Aufbereitungsinstrumente signifikant. Durch die kombinierte (manuell/maschinell) Aufbereitungsart wird nicht signifikant häufiger die korrekte Arbeitslänge erreicht. Die Krümmung hat einen signifikanten Einfluss auf den Dentinabtrag. Es wird nur in der 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ) überhaupt die korrekte Arbeitslänge erreicht.

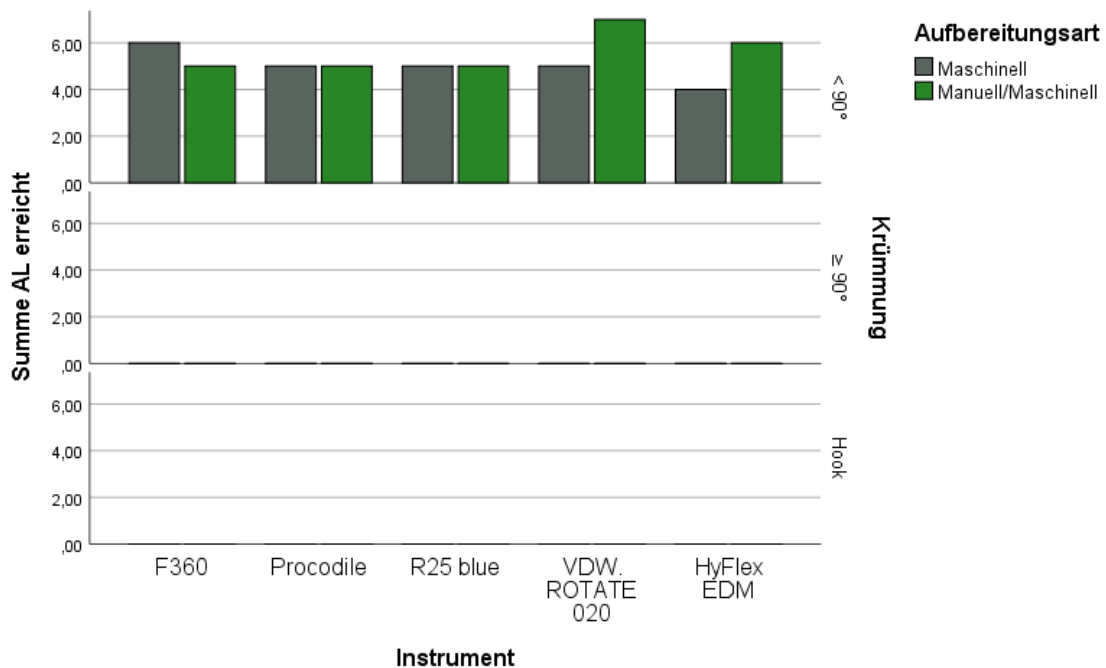


Abbildung 19: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (9. - 18. Versuchsgruppe): Erreichen der Arbeitslänge

### 3.2.3. Maschinelle Gleitfad- vs. maschinelle Aufbereitungsinstrumente

#### Dentinabtrag

Insgesamt führen die Gleitfadinstrumente in der 1. Versuchsreihe (<90°) seltener zu einem übermäßigen Dentinabtrag (in 10 - 50% der Fälle) als die Aufbereitungsinstrumente (in 30 - 60% der Fälle). Die HyFlex EDM und VDW.ROTATE 020 mit initialem manuellen Scouting sind die einzigen Aufbereitungsinstrumente, die ähnliche Werte erreichen können wie die Gleitfadinstrumente (30 - 40%).

Tabelle 11: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe (<math><90^\circ</math>) - Übermäßiger Dentinabtrag

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	10%	40%
VDW.ROTATE 015	20%	10%
R-PILOT	30%	20%
PathGlider	50%	40%
HyFlex EDM	60%	40%
VDW.ROTATE 020	50%	30%
R25 blue	50%	50%
F360	50%	50%
Procodile	50%	50%

In der 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) kommt es durch die Aufbereitungsinstrumente in 100% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag kommt. Das initiale manuelle Scouting führt bei den Aufbereitungsinstrumenten zu keinem Unterschied beim Dentinabtrag. Nur durch die Gleitpfadinstrumente kann ein nicht übermäßiger Dentinabtrag erreicht und die Kanalanatomie erhalten werden.

Tabelle 12: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) - Übermäßiger Dentinabtrag

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	20%	50%
VDW.ROTATE 015	100%	80%
R-PILOT	90%	100%
PathGlider	90%	100%
HyFlex EDM	100%	100%
VDW.ROTATE 020	100%	100%
R25 blue	100%	100%
F360	100%	100%
Procodile	100%	100%

In der 3. Versuchsreihe (Hook) führen alle Aufbereitungsinstrumente außer der VDW.ROTATE 020 in 100% der Fälle zu einem übermäßigen Dentinabtrag kommt. Das initiale manuelle Scouting führt bei der VDW.ROTATE 020 dazu, dass nur in 90% der Fälle statt in 100% der Fälle ein übermäßiger Dentinabtrag erfolgt. Dies beruht darauf, dass es in diesem Fall zu einer Fraktur des NiTi-Handinstruments kam. Die korrekte Arbeitslänge wurde dementsprechend nicht erreicht. Nur durch die Gleitpfadinstrumente HyFlex EDM, VDW.ROTATE 015

und R-PILOT kann ein nicht übermäßiger Dentinabtrag erreicht und die Kanal-anatomie erhalten werden.

Tabelle 13: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): 3. Versuchsreihe (Hook) - Übermäßiger Dentinabtrag

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	80%	90%
VDW.ROTATE 015	90%	70%
R-PILOT	100%	70%
PathGlider	100%	100%
HyFlex EDM	100%	100%
VDW.ROTATE 020	100%	90%
R25 blue	100%	100%
F360	100%	100%
Procodile	100%	100%

Insgesamt wird durch die HyFlex EDM Glidepath File signifikant seltener übermäßig Dentin abgetragen als durch alle Aufbereitungsinstrumente (F360, Procodile, R25 blue, VDW.ROTATE 020, HyFlex EDM) und als durch die Gleitpfadinstrumente PathGlider und R-PILOT. Die Aufbereitungsart (maschinell vs. manuell/maschinell) hat keinen signifikanten Einfluss auf den Dentinabtrag. Die kombinierte Aufbereitungsart führt aber seltener zum übermäßigen Dentinabtrag. Die Krümmung hat einen signifikanten Einfluss auf den Dentinabtrag. In der 2. ( $\geq 90^\circ$ ) und 3. Versuchsreihe (Hook) wird signifikant häufiger übermäßig Dentin abgetragen als in der 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ).

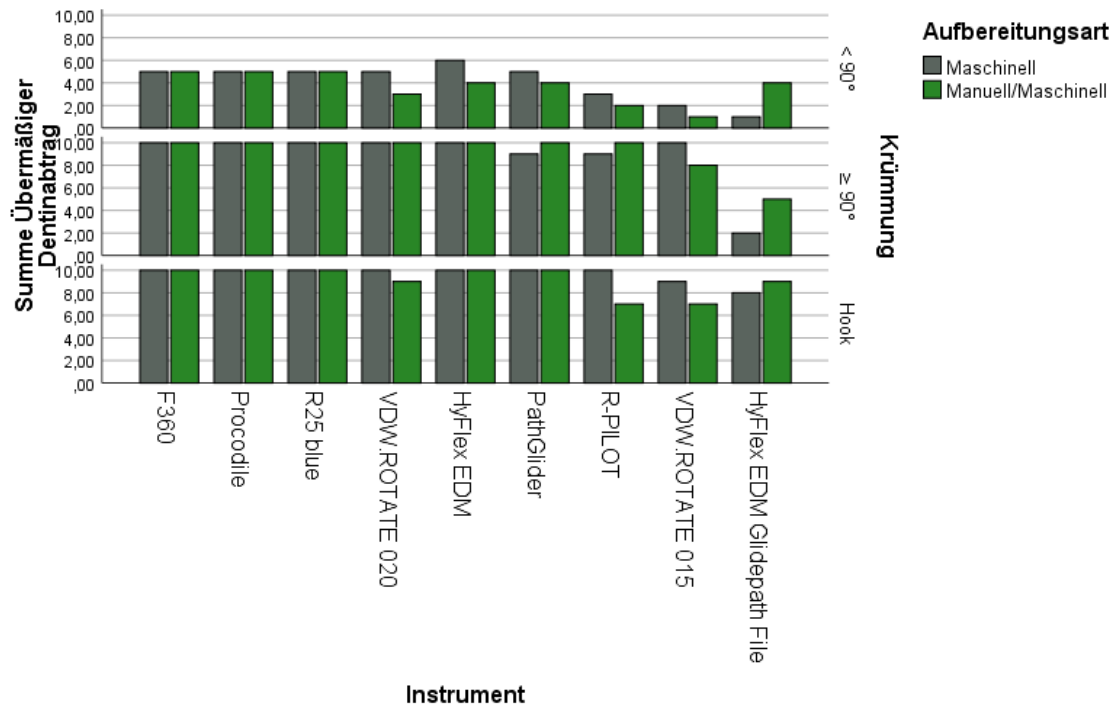


Abbildung 20: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Übermäßiger Dentinabtrag

### Erreichen der Arbeitslänge

Insgesamt erreichen die Gleitpfadinstrumente in der 1. Versuchsreihe häufiger die korrekte Arbeitslänge (in 50-90% der Fälle) als die Aufbereitungsinstrumente (in 40-70% der Fälle). Die HyFlex EDM, VDW.ROTATE 020 mit initialem manuellen Scouting und die F360 ohne initiales manuelles Scouting sind die einzigen Aufbereitungsinstrumente, die ähnliche Werte wie die Gleitpfadinstrumente erreichen (60 - 70%).

Tabelle 14: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): 1. Versuchsreihe ( $< 90^\circ$ ) - Erreichen der Arbeitslänge

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	90%	60%
VDW.ROTATE 015	80%	90%
R-PILOT	70%	80%
PathGlider	50%	60%
HyFlex EDM	40%	60%
VDW.ROTATE 020	50%	70%
R25 blue	50%	50%
F360	60%	50%
Procodile	50%	50%



In der 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) kann die korrekte Arbeitslänge nur durch die Gleitpfadinstrumente (in 10-80% der Fälle) erreicht werden. Bei den Aufbereitungsinstrumenten führt auch das initiale manuelle Scouting zu keinem Unterschied beim Erreichen der Arbeitslänge.

Tabelle 15: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) - Erreichen der Arbeitslänge

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	80%	50%
VDW.ROTATE 015	0%	20%
R-PILOT	10%	0%
PathGlider	10%	0%
HyFlex EDM	0%	0%
VDW.ROTATE 020	0%	0%
R25 blue	0%	0%
F360	0%	0%
Procodile	0%	0%

In der 3. Versuchsreihe (Hook) kann die korrekte Arbeitslänge auch nur durch Gleitpfadinstrumente (in 10-30% der Fälle) erreicht werden. Bei den Aufbereitungsinstrumenten führt auch das initiale manuelle Scouting zu keinem Unterschied beim Erreichen der Arbeitslänge.

Tabelle 16: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): 3. Versuchsreihe (Hook) - Erreichen der Arbeitslänge

Instrument	Maschinell	Manuell/Maschinell
HyFlex EDM Glidepath File	20%	10%
VDW.ROTATE 015	10%	30%
R-PILOT	0%	20%
PathGlider	0%	0%
HyFlex EDM	0%	0%
VDW.ROTATE 020	0%	0%
R25 blue	0%	0%
F360	0%	0%
Procodile	0%	0%

Insgesamt wird durch die HyFlex EDM Glidepath File signifikant häufiger die korrekte Arbeitslänge erreicht als durch alle Aufbereitungsinstrumente (F360, Procodile, R25 blue, VDW.ROTATE 020, HyFlex EDM) und als durch alle anderen Gleitpfadinstrumente (PathGlider, R-PILOT, VDW.ROTATE 015). Die

Aufbereitungsart (Maschinell vs. Manuell/Maschinell) hat keinen signifikanten Einfluss auf das Erreichen der Arbeitslänge. Die kombinierte Aufbereitungsart führt aber häufiger zum Erreichen der korrekten Arbeitslänge. Die Krümmung hat einen signifikanten Einfluss auf das Erreichen der Arbeitslänge. In der 2. ( $\geq 90^\circ$ ) und 3. Versuchsreihe (Hook) wird signifikant seltener die korrekte Arbeitslänge erreicht als in der 1. Versuchsreihe ( $<90^\circ$ ).

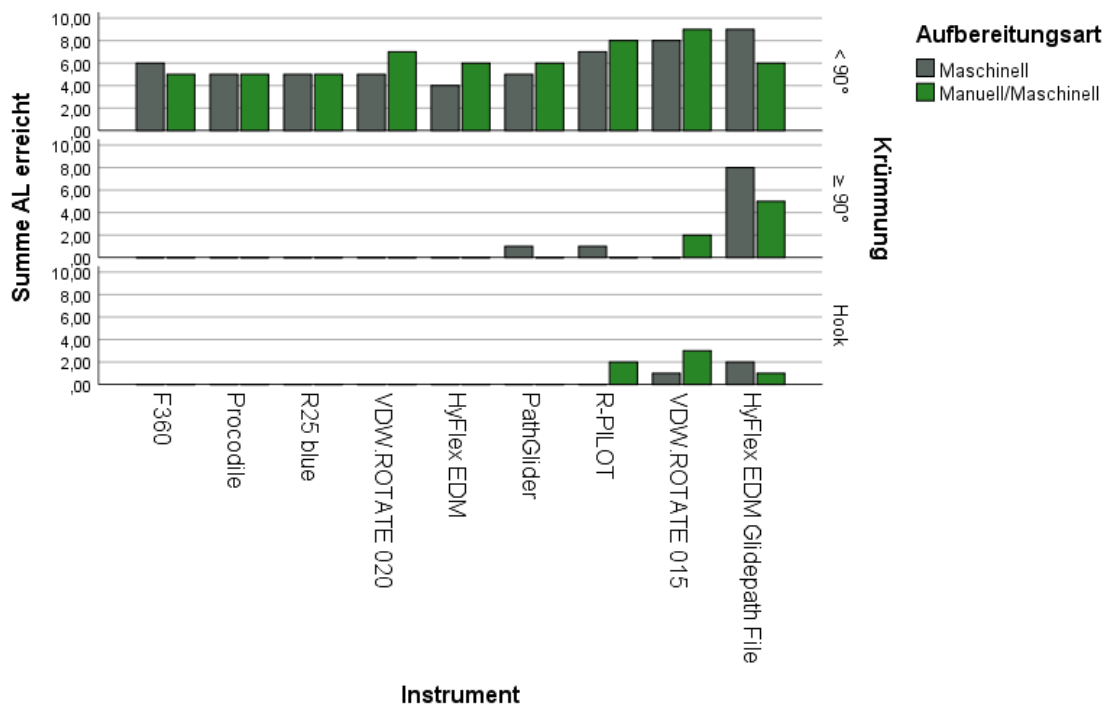


Abbildung 21: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Erreichen der Arbeitslänge

### 3.3. Arbeitssicherheit

#### 3.3.2. Die maschinellen Gleitpfadinstrumente

Es traten je eine Fraktur von NiTi-Handinstrumenten während des initialen manuellen Scoutings in der 1. ( $<90^\circ$ ) und in der 3. Versuchsreihe (Hook) und vier Frakturen bei der ausschließlich maschinellen Gleitpfadherstellung mit der HyFlex EDM Glidepath File in der 3. Versuchsreihe (Hook) auf.

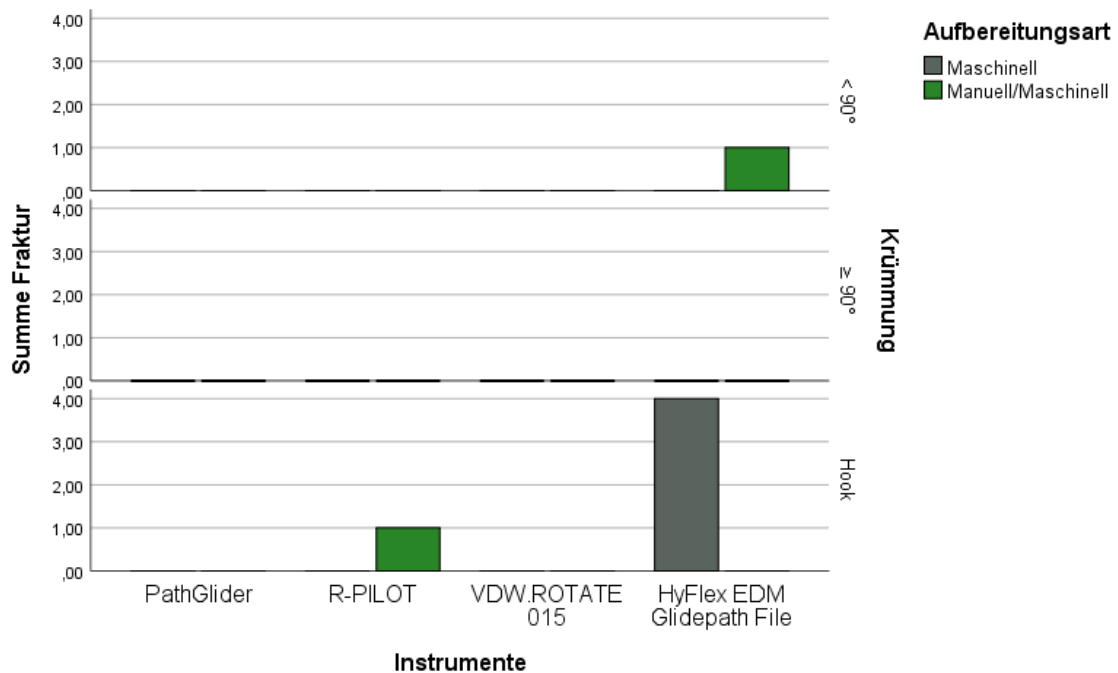


Abbildung 22: Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente (1. - 8. Versuchsgruppe): Arbeitssicherheit

### 3.3.3. Die maschinellen Aufbereitungsinstrumente

Es traten zwei Frakturen von NiTi-Handinstrumenten während des initialen manuellen Scoutings in der 2. Versuchsreihe ( $\geq 90^\circ$ ) und eine Fraktur eines NiTi-Handinstruments während des initialen manuellen Scoutings in der 3. Versuchsreihe (Hook) auf. Es kam zu keiner Fraktur eines maschinellen Aufbereitungsinstruments.

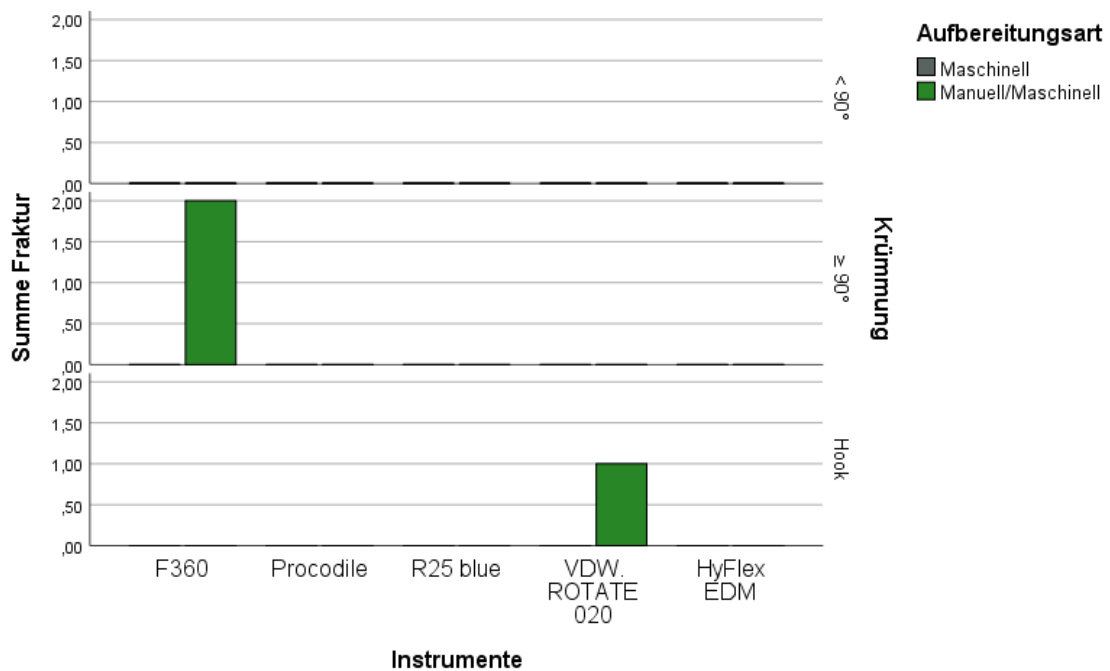


Abbildung 23: Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (9. - 18. Versuchsgruppe): Arbeitssicherheit

### 3.3.1. Maschinelle Gleitfad- vs. maschinelle Aufbereitungsinstrumente

Wenn man die aufgetretenen Fraktur von NiTi-Handinstrumenten außen vor lässt und nur die Frakturen der maschinellen Instrumente betrachtet, so kam es nur bei den maschinellen Gleitfadinstrumenten zu Frakturen. Kein einziges maschinelles Aufbereitungsinstrument ist frakturiert.

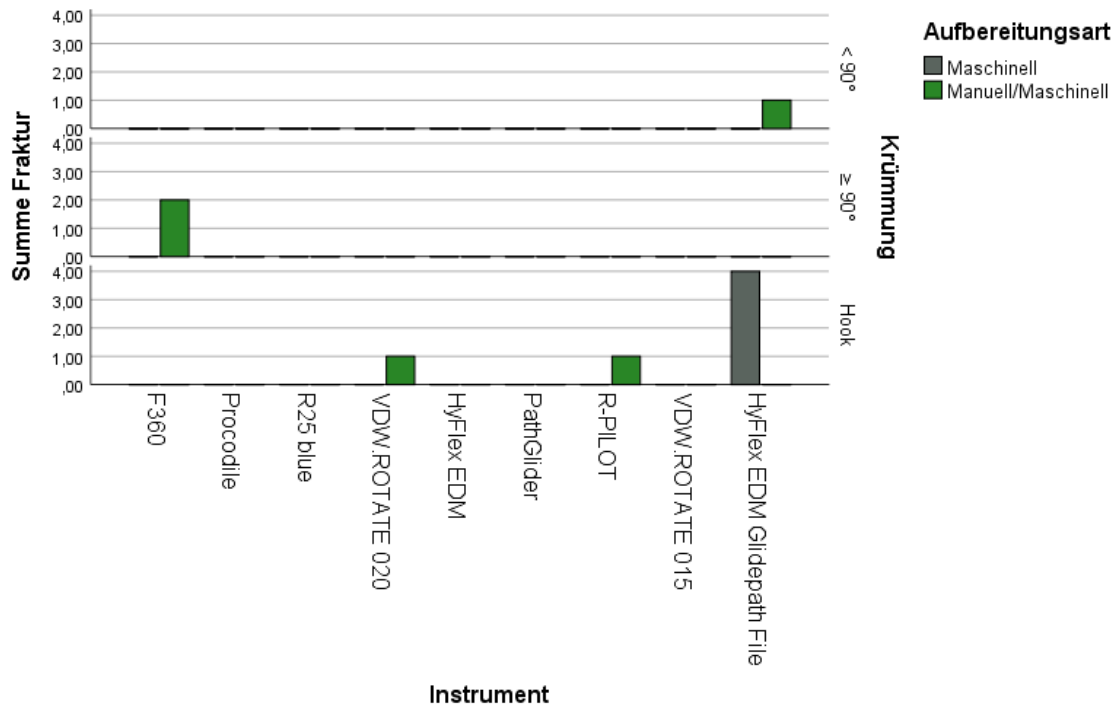


Abbildung 24: Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten (1. - 8. vs. 9. - 18. Versuchsgruppe): Arbeitssicherheit

## 4. Diskussion

### 4.1. Diskussion der Methode

#### 4.1.1. Auswahl der Präparate

Es gibt viele Studien, die sich mit der Gleitfadherstellung bei gekrümmten Wurzelkanälen beschäftigen. Die Krümmungen, die in diesen Studien untersucht werden, sind jedoch i.d.R. max. 45°. Es gibt keine Studien, die die Gleitfadherstellung bei sehr komplexer Kanalanatomie mit starken Wurzelkanalkrümmungen untersuchen. Daher wurden für diese Studie Weisheitszähne ausgewählt, die eine sehr komplexe Kanalanatomie mit Krümmungen von z.T.  $\geq 90^\circ$  oder mit Hook-Konfigurationen aufweisen, um diese Lücke im Bereich der wissenschaftlichen Studien zu füllen. Die Ergebnisse dieser Studie schaffen so auch eine bessere Grundlage für die Beurteilung der Erhaltbarkeit von Molaren - insbesondere auch von Weisheitszähnen - mit sehr komplexer Kanalanatomie und starken Krümmungen durch eine Wurzelkanalbehandlung. Bei der Auswahl der Präparate steht am Anfang die Entscheidung, ob die Versuche an echten, humanen Zähnen oder an Kunststoffzähnen, z.B. standardisierten Kunststoffblöcken, durchgeführt werden sollen. Die Entscheidung, die Versuche an 3D-gedruckten Zähnen durchzuführen, denen als Vorlage Scans von extrahierten, humanen Weisheitszähnen dienen, stellt einen guten Kompromiss dar. So erreichen wir auf diese Weise möglichst standardisierte Versuchsbedingungen. Der größte Nachteil bei der Verwendung von Kunststoffzähnen besteht darin, dass Kunststoff eine andere Härte und ein anderes Abrasionsverhalten als Dentin zeigt. Dies kann jedoch auch ein Vorteil sein und dazu beitragen, die Unterschiede zwischen den verschiedenen Instrumenten im Hinblick auf Substanzabtrag und Präparationsfehler besser aufzuzeigen (Miserendino et al., 1988). Bei der Bearbeitung von Kunststoff kann außerdem die entstehende Hitze zum Aufweichen des Kunststoffes führen. Dadurch kann es bei Kunststoff eher zum Verblocken der Schneidekanten der Instrumente kommen als bei Dentin, was eine Instrumentenfraktur begünstigen kann (Baumann and Roth, 1999). Insgesamt aber bestätigen

Studien an echten humanen Zähnen häufig die Ergebnisse, die an Kunststoffzähnen gewonnen werden (Morgental et al., 2013; Peters, 2004). Die vorab getroffenen Auswahlkriterien schaffen vergleichbare Versuchsbedingungen: Alle Wurzelkanäle sind nicht obliteriert und vollständig durchgängig, die Wurzeln sind intakt und zeigen ein abgeschlossenes Wurzelwachstum und an keinem Zahn wurde zuvor eine Wurzelkanalbehandlung begonnen. Alle Wurzelkanäle, die in dieser Studie untersucht werden, sind nach der Vorlage von CTs von echten, humanen Weisheitszähnen gedruckt worden, da v.a. bei Weisheitszähnen derart komplexe Kanalanatomien mit ausgeprägten Krümmungen vorkommen, für die wir uns in dieser Studie entschieden haben, um besonders aussagekräftige Ergebnisse für die verschiedenen Möglichkeiten der Gleitpfadherstellung präsentieren zu können. Bisher sind Studien, die sich mit derart ausgeprägten Wurzelkanalkrümmungen  $\geq 40^\circ$  befassen, in der aktuellen Forschung gerade im Hinblick auf die Gleitpfadherstellung noch unterrepräsentiert und Studien, die Krümmungen  $\geq 90^\circ$  und Hook-Konfigurationen untersuchen, sind selten. Diese Studie soll so auch dazu beitragen, eine bessere Grundlage für die Diskussion der Erhaltbarkeit von Molaren - v.a. auch von Weisheitszähnen - mit sehr komplexe Kanalanatomie und starken Krümmungen zu schaffen.

#### **4.1.2. Auswahl der Methode**

Um in dieser Studie vergleichbare Ergebnisse zu gewinnen, wurden durch den Behandler im Vorfeld Übungen mit den verschiedenen Instrumenten an 3D-gedruckten Zähnen durchgeführt. Um verschiedene Instrumente zu vergleichen, werden wie auch in anderen, vergleichbaren Studien der Dentinabtrag bzw. der Erhalt der Kanalanatomie, das Erreichen der Arbeitslänge, der Zeitaufwand und die Arbeitssicherheit untersucht. In dieser Studie werden sowohl Instrumente, die rotierend arbeiten, als auch Instrumente, die reziprok arbeiten, untersucht. Andere Studien haben gezeigt, dass beide Arbeitsweisen gut vergleichbar sind (Capar et al., 2014; Paqué et al., 2011). You et al. (2011) haben in ihrer Studie keine signifikanten Unterschiede bei der Kanalbegradigung beobachtet. Die ma-

schinellen Gleitpfadinstrumente dieser Studie zeigen ähnliche Größen und Konizitäten.

Tabelle 17: Maschinelle Gleitpfadinstrumente - Größe, Konizität und Arbeitsweise

	Größe	Konizität	Arbeitsweise
HyFlex EDM Glidepath File	015	0.03	Rotierend
VDW.ROTATE 015	015	0.04	Rotierend
R-PILOT	012,5	0.04	Reziprok
PathGlider	015	0.03	Rotierend

Ebenso besitzen die maschinellen Aufbereitungsinstrumente ähnliche Größen, die Konizitäten variieren zwischen 4-8%. Dies erschwert die Vergleichbarkeit geringfügig. Auch andere Studien haben jedoch Instrumente mit unterschiedlichen Größen und Konizitäten verglichen (Bürklein et al., 2012).

Tabelle 18: Maschinelle Aufbereitungsinstrumente - Größe, Konizität und Arbeitsweise

	Größe	Konizität	Arbeitsweise
HyFlex EDM	020	0.05	Rotierend
VDW.ROTATE 020	020	0.05	Rotierend
R25 blue	025	0.08	Reziprok
Procodile	025	0.06	Reziprok
F360	025	0.04	Rotierend

Die verschiedenen Instrumente besitzen unterschiedliche Materialeigenschaften und weisen unterschiedliche Instrumentenquerschnitte auf: Die Instrumente von VDW in dieser Studie besitzen alle einen S-Querschnitt, die PathGlider hat einen Drachenquerschnitt, die F360 und die Procodile zeigen einen Doppel-S-Querschnitt und das HyFlex EDM-System weist einen variierenden Querschnitt auf. Jedoch haben auch schon andere Studien gezeigt, dass der Instrumentenquerschnitt keinen signifikanten Einfluss auf den Dentinabtrag hat (Bürklein et al., 2015). Für die Auswertung der Wurzelkanalpräparation durch die verschiedenen Instrumenten gibt es verschiedene Möglichkeiten: z.B. vergleichende Analysen von Röntgenbildern, CT-Scans und Überlagerung von Schnittbildern des Wurzelkanals. In dieser Studie haben wir uns für die direkte, visuelle Auswertung der Wurzelkanalpräparation entschieden. Dies ermöglichen wir dadurch, dass wir 3D-gedruckte Zähne verwenden, deren Dentindicke im Bereich der Außenkurvatur genau festgelegt wurde. So können wir einen präzisen Rückschluss auf das



Erreichen der Arbeitslänge und den Dentinabtrag bzw. den Erhalt der Kanal Anatomie im Bereich der Außenkurvatur ziehen, in der es durch die Kraftentfaltung einer gekrümmten Feile nach Winkler (Winkler, 1996) zu einem Präparationsfehler kommen kann.

#### **4.1.3. Rolle des Behandlers**

Baumann and Roth (1999) haben in einer Studie zeigen können, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen unerfahrenen Studenten und erfahrenen Behandlern gibt bei der Aufbereitung mit maschinellen NiTi-Instrumenten hinsichtlich der Arbeitssicherheit und des Dentinabtrages bzw. des Erhalts der Kanal Anatomie. In dieser Studie kannten beide Gruppen das verwendete Aufbereitungssystem nicht, was zu mehr Frakturen führte. In vergleichbaren Studien, in denen das Aufbereitungssystem den Behandlern bekannt war, kam es zu vergleichsweise weniger Instrumentenfrakturen. Unerfahrene Behandler zeigen bei der maschinellen Aufbereitung signifikant bessere Ergebnisse als bei der manuellen Aufbereitung bei geringerem zeitlichen Aufwand. Dies bedeutet, dass der Erfolg bei der maschinellen Aufbereitung weniger vom Behandler abhängt als der Erfolg bei der manuellen Aufbereitung (Gluskin et al., 2001). Um behandlerbedingte Ursachen, die den Vergleich der Ergebnisse zwischen den unterschiedlichen Instrumenten stören könnten, zu verringern, wird die Aufbereitung in dieser Studie von einem einzigen Studenten durchgeführt.

## **4.2. Diskussion der Ergebnisse**

### **4.2.1. Zeitlicher Aufwand**

Die Erfahrung des Behandlers, die Aufbereitungsart bzw. -technik, die Anzahl der verwendeten Instrumente und die Komplexität der Wurzelkanalanatomie haben einen Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. In dieser Studie wurde die reine Aufbereitungszeit gemessen. Die Zeit, die z.B. für den Instrumentenwechsel benötigt wurde, wurde nicht erfasst. Dies ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit, der

tatsächlich benötigten Aufbereitungszeit. Als Nachteil dieser Variante ist zu nennen, dass die Ergebnisse nicht direkt mit dem klinischen Ablauf vergleichbar sind. Außerdem muss bei der Beurteilung des zeitlichen Aufwandes berücksichtigt werden, dass die Zeitmessung endete, wenn übermäßig Dentin abgetragen wurde, und der zeitliche Aufwand in diesen Fällen dementsprechend ggf. kürzer war als in Fällen, in denen die korrekte Arbeitslänge erreicht wurde. Bei dem Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente zeigt die HyFlex EDM Glidepath File den höchsten zeitlichen Aufwand, erreicht aber insgesamt auch am häufigsten die korrekte Arbeitslänge, was den höheren zeitlichen Aufwand nachvollziehbar macht. Han et al. (2018) kommen in ihrer Studie zu demselben Ergebnis, dass der zeitliche Aufwand für die Gleitpfadpräparation mit der HyFlex EDM Glidepath File signifikant höher ist als mit anderen Gleitpfadinstrumenten. Die besonderen Materialeigenschaften, der sich verändernde Instrumentenquerschnitt und die hohe Flexibilität der HyFlex EDM Glidepath File erfordern besondere Vorsicht und Geduld bei der Gleitpfadherstellung, was mit einem höheren zeitlichen Aufwand einhergeht. Die VDW.ROTATE 015 erreicht nicht signifikant seltener die korrekte Arbeitslänge, aber zeigt einen signifikant niedrigeren zeitlichen Aufwand im Vergleich mit der HyFlex EDM Glidepath File. Die hohe Schneidleistung und der angepasste S-Querschnitt bei hoher Flexibilität machen die VDW.ROTATE 015 effizienter und ermöglichen trotzdem ein ähnlich sicheres Erhalten der Kanal Anatomie. Bei dem Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumente zeigt die VDW.ROTATE 020 den niedrigsten zeitlichen Aufwand. Gleichzeitig wird durch sie auch am häufigsten die korrekte Arbeitslänge erreicht. Die feilen-spezifische Wärmebehandlung macht das VDW.ROTATE-System flexibler, ohne an Schneidleistung zu verlieren. Der angepasste S-Querschnitt sichert einen kontinuierlichen Abtransport von Debris bei höherer Schneidleistung. Dadurch kann die Aufbereitung nicht nur besonders effizient erfolgen, sondern auch die Kanal Anatomie im Vergleich zu den anderen Aufbereitungsinstrumenten sicherer erhalten werden. Es zeigt sich, dass es keinen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand hat, ob die Gleitpfadherstellung mit einem maschinellen Gleitpfadinstrument bzw. direkt die Aufbereitung einem maschinellen Aufbereitungsinstrument erfolgt. In der klinischen Situation muss aber natürlich

berücksichtigt werden, dass die maschinellen Gleitpfadinstrumente natürlich nur den 1. Schritt bei der Aufbereitung darstellen und der zeitliche Aufwand insgesamt natürlich höher ist, wenn vor den maschinellen Aufbereitungs- noch maschinelle Gleitpfadinstrumente verwendet werden. Da in der 1. Versuchsreihe durch die maschinellen Aufbereitungsinstrumente VDW.ROTATE 020 und HyFlex EDM die Kanal Anatomie ähnlich sicher erhalten werden kann, wie durch die maschinellen Gleitpfadinstrumente, lässt dies den Rückschluss zu, dass die Aufbereitung von Wurzelkanälen bis zu einer bestimmten Komplexität mit maschinellen Aufbereitungsinstrumenten deutlich effizienter erfolgen kann ohne, dass die Kanal Anatomie schlechter erhalten wird. Die Komplexität der Kanal Anatomie, die in dieser Studie durch die drei Versuchsreihen in drei Stufen repräsentiert wird, hat einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. In dieser Studie hat neben der Komplexität der Kanal Anatomie auch die Tatsache, ob es aufgrund sehr komplexer Kanal Anatomie (s. 3. Versuchsreihe) während der Versuche sehr schnell zu einem übermäßigen Dentinabtrag kommt, einen entscheidenden Einfluss auf den zeitlichen Aufwand. Dies erschwert die Bewertung des zeitlichen Aufwandes. In der Klinik ist davon auszugehen, dass der zeitliche Aufwand mit der Komplexität der Kanal Anatomie zunimmt. Bei dem Vergleich der verschiedenen maschinellen Gleitpfadinstrumente korreliert z.B. die Tatsache, dass in der 3. Versuchsreihe der zeitliche Aufwand am niedrigsten ist, damit, dass insgesamt auch signifikant am seltensten, max. in 30% der Fälle (durch die VDW.ROTATE 015) die korrekte Arbeitslänge erreicht wird und es im Vergleich schneller zu einem übermäßigen Dentinabtrag kommt. In der 2. Versuchsreihe wird trotz der anspruchsvollen Kanal Anatomie noch in bis zu 80% der Fälle (durch die HyFlex EDM Glidepath File) die korrekte Arbeitslänge erreicht werden, was den signifikant höheren zeitlichen Aufwand, v.a. im Vergleich zu der 1. Versuchsreihe erklärt. In der 1. Versuchsreihe wird zwar am häufigsten die korrekte Arbeitslänge erreicht, wegen der weniger komplexen Kanal Anatomie ist der zeitliche Aufwand aber dennoch geringer als in der 2. Versuchsreihe. Auch bei dem Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumente untereinander und beim Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten ist der zeitliche Aufwand in der 3. Versuchsreihe am niedrigsten

und in der 2. Versuchsreihe am höchsten. Dass die kombinierte Aufbereitungsart bei allen Vergleichen einen signifikant höheren zeitlichen Aufwand zeigt, ist nachvollziehbar, da die Anzahl der verwendeten Instrumente einen entscheidenden Einfluss auf den zeitlichen Aufwand hat. Einige Studien haben gezeigt, dass die maschinelle Gleitpfadherstellung einen geringeren zeitlichen Aufwand hat als die manuelle (Paleker and van der Vyver, 2017). Beim Vergleich der verschiedenen maschinellen Gleitpfadinstrumente ist die Interaktion zwischen der Aufbereitungsart und der Krümmung interessant. In der 3. Versuchsreihe nimmt der zeitliche Aufwand bei beiden Aufbereitungsarten ab, was darauf zurück zu führen ist, dass es schneller zu einem übermäßigen Dentinabtrag kommt. Bei der kombinierten manuellen/maschinellen Aufbereitungsart ist die Abnahme des zeitlichen Aufwandes noch deutlicher. Es überrascht, dass dennoch durch die kombinierte manuelle/maschinelle Aufbereitungsart häufiger die korrekte Arbeitslänge erreicht wird als durch die rein maschinelle. Das bedeutet, dass es in der klinischen Situation bei sehr komplexer Kanal Anatomie nicht nur vergleichsweise effizient sein kann, ein initiales manuelles Scouting vor der maschinellen Gleitpfadherstellung durchzuführen, sondern es auch dazu führen kann, die Kanal Anatomie sicherer zu erhalten.

#### **4.2.2. Dentinabtrag und Erreichen der Arbeitslänge**

Die Begradigung von Wurzelkanälen, die i.d.R. auf einem übermäßigen Dentinabtrag im Bereich der Außenkrümmung beruht, ist eine große Herausforderung bei der Gleitpfadherstellung oder Präparation von gekrümmten Wurzelkanälen (Petitette et al., 1999). Der übermäßige Dentinabtrag im Bereich der Außenkrümmung kann zu Präparationsfehlern führen (Hülsmann et al., 2005). Andere Studien haben gezeigt, dass neben dem Krümmungswinkel auch der Krümmungsradius einen Einfluss auf die Schwierigkeit der Aufbereitung haben (Pruett et al., 1997). Auch in dieser Studie können wir bestätigen, dass der Krümmungswinkel einen signifikanten Einfluss auf den Dentinabtrag im Bereich der Außenkrümmung hat: Sowohl beim Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente untereinander, beim Vergleich der maschinellen Aufbereitungsinstrumente untereinander als

auch beim Vergleich der maschinellen Gleitpfad- mit den maschinellen Aufbereitungsinstrumenten wird in der 2. und 3. Versuchsreihe, d.h. bei Krümmungen  $\geq 90^\circ$  und bei Hook-Konfigurationen, signifikant häufiger übermäßig Dentin im Bereich der Außenkrümmung abgetragen und signifikant seltener die korrekte Arbeitslänge erreicht als in der 1. Versuchsreihe (Krümmungen  $< 90^\circ$ ). Dass es mit zunehmenden Krümmungsradius schwieriger ist, die ursprüngliche Kanal Anatomie zu erhalten, ist nachvollziehbar, wird durch diverse Studien bestätigt und zeigt sich i.d.R. auch in der Klinik (Pruett et al., 1997). Die Bedeutung des Gleitpfades zu Beginn einer Wurzelkanalbehandlung, um Aufbereitungsfehler zu verringern und die Kanal Anatomie besser zu erhalten, wurde schon in vielen Studien bestätigt (Berutti et al., 2004; Elnaghy and Elsaka, 2014; Ha and Park, 2012; Patiño et al., 2005). Und auch in dieser Studie kann gezeigt werden, dass durch die Gleitpfadherstellung durch maschinelle Gleitpfadinstrumente signifikant seltener ein übermäßiger Dentinabtrag erzielt und signifikant häufiger die korrekte Arbeitslänge erreicht werden kann als durch die alleinige Verwendung von maschinellen Aufbereitungsinstrumenten. Maschinelle Gleitpfadinstrumente eignen sich durch ihre Materialeigenschaften, durch ihre geringeren Durchmesser und ihre kleineren Taper besser für die Gleitpfadherstellung bei komplexer Kanal Anatomie als maschinelle Aufbereitungsinstrumente. Durch die Gleitpfadherstellung mit maschinellen Gleitpfadinstrumenten kann die ursprüngliche Kanal Anatomie besser erhalten werden und Präparationsfehler können sicherer vermieden werden. Beim Vergleich der maschinellen Gleitpfadinstrumente untereinander zeigt sich, dass die HyFlex EDM Glidepath File fast allen anderen maschinellen Gleitpfadinstrumenten signifikant überlegen ist beim Erhalt der Kanal Anatomie und beim Erreichen der Arbeitslänge. Auch in anderen Studien hat das HyFlex EDM-System mit einer überlegenen Zentrierfähigkeit im Wurzelkanal überzeugt (Venino et al., 2017). Auch speziell die HyFlex EDM Glidepath File war in anderen Studien anderen Instrumenten überlegen und hat eine sehr gute Zentrierfähigkeit gezeigt (Han et al., 2018). Die Angabe von Coltene, dass die HyFlex EDM Glidepath File 015 besonders gut für stark gekrümmte Wurzelkanäle geeignet ist, konnte in dieser Studie bestätigt werden. Die HyFlex EDM Glidepath File eignet

sich durch die extrem flexible CM-Wire Legierung, die sie deutlich von allen anderen maschinellen Gleitfadinstrumenten dieser Studie abhebt, die hohe Widerstandsfähigkeit und Bruchsicherheit und durch die schonende rotierende Arbeitsweise besonders gut für die Präparation des Gleitpfades bei sehr komplexer Kanal Anatomie. Durch ihre gute Zentrierfähigkeit im Wurzelkanal und durch ihre extreme Flexibilität kann durch die HyFlex EDM Glidepath File in dieser Studie die ursprüngliche Kanal Anatomie am besten erhalten und Präparationsfehler am sichersten vermieden werden. Alleine die VDW.ROTATE 015 erzielt in dieser Studie ähnlich gute Ergebnisse wie die HyFlex EDM Glidepath File. Da das VDW.ROTATE-System noch sehr neu auf dem Markt ist, sind die Gleitfadinstrumente des Systems in den Studien noch unterrepräsentiert. Die eigenen Angaben, dass speziell die VDW.ROTATE 015 als Gleitfadinstrument auch für stark gekrümmte Wurzelkanäle und apikale Krümmungen geeignet ist und dass das VDW.ROTATE-System einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen wird, die die Instrumente flexibler macht, sodass die Feilen dem ursprünglichen Kanalverlauf besser folgen, können in unserer Studie bestätigt werden. Durch die VDW.ROTATE 015 lässt sich die ursprüngliche Kanal Anatomie in dieser Studie ähnlich sicher erhalten wie durch die HyFlex EDM Glidepath File. Durch ihre noch höhere Flexibilität ist die HyFlex EDM Glidepath File aber allen anderen maschinellen Gleitfadinstrumenten, auch der aus dem VDW.ROTATE-System, dieser Studie überlegen. Beim Vergleich der verschiedenen maschinellen Aufbereitungsinstrumente untereinander zeigt sich beim Erhalt der Kanal Anatomie und beim Erreichen der korrekten Arbeitslänge kein signifikanter Unterschied. Die Aufbereitungsinstrumente des VDW.ROTATE- und des HyFlex EDM-Systems sind den anderen Aufbereitungsinstrumenten etwas überlegen. Diese beiden Aufbereitungsinstrumente haben auch einen geringeren Durchmesser (020) als die anderen Aufbereitungsinstrumente (025), was bei sehr komplexer Kanal Anatomie von Vorteil zu sein scheint. Außerdem kann v.a. das HyFlex EDM-Aufbereitungsinstrument durch seine extreme Flexibilität die ursprüngliche Kanal Anatomie von stark gekrümmten Wurzelkanälen erhalten. Das Scouting und die initiale Schaffung eines manuellen Gleitpfades werden kontrovers diskutiert.

In vielen Studien wurden diverse Vorteile des Scoutings und der manuellen Gleitpfadpräparation genannt, unter anderem die Sicherstellung der Kanaldurchgängigkeit und die Reduzierung der Misserfolgsrate der nachfolgenden maschinellen Aufbereitungsinstrumente (Berutti et al., 2004). Andere Untersuchungen haben gezeigt, dass gerade das Scouting und die initiale Schaffung eines manuellen Gleitpfades oft zu Präparationsfehlern führt und die Kanalanatomie schlechter erhalten wird (Berutti et al., 2009; Pasqualini et al., 2012). Die meisten Studien haben verschiedene Vorteile der maschinellen gegenüber der manuellen Gleitpfadpräparation aufgezeigt, u.a. die geringere Fehleranfälligkeit und den besseren Erhalt der Kanalanatomie (Berutti et al., 2009; Pasqualini et al., 2012). Einige Studien sind auch zu dem Ergebnis gekommen, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen der manuellen und maschinellen Gleitpfadpräparation gibt und sich beide Varianten klinisch bewährt haben (Alves et al., 2012). Auch in dieser Studie wird belegt, dass das initiale manuelle Scouting weder vor der maschinellen Gleitpfadpräparation noch vor der maschinellen Aufbereitung einen signifikanten Vorteil bringt. Es wird durch das initiale manuelle Scouting zwar häufiger die Kanalanatomie erhalten und die korrekte Arbeitslänge erreicht, aber nicht signifikant häufiger. Es ist interessant, dass abhängig von den maschinellen Instrumenten, die verwendet werden, das initiale manuelle Scouting zu einem Vorteil führt, keinen Unterschied macht oder sogar zu einem Nachteil führt. Bei beiden Instrumenten des VDW.ROTATE-Systems und dem HyFlex EDM Aufbereitungsinstrument führt das initiale manuelle Scouting zu einer Verbesserung beim Erhalt der Kanalanatomie und beim Erreichen der Arbeitslänge. Das zeigt, dass die Aufbereitungsinstrumente des VDW.ROTATE-Systems und des HyFlex EDM-System sich auch gut für sehr komplexe Kanalanatomie eignen, aber ein vorheriges manuelles Scouting sinnvoll ist, um einen Gleitpfad mit einem gewissen Durchmesser für die Aufbereitungsinstrumente zu schaffen. Auch bei dem VDW.ROTATE Gleitpfadinstrument ist durch die geringere Flexibilität im Vergleich zu dem HyFlex EDM Gleitpfadinstrument ein vorheriges manuelles Scouting sinnvoll. Bei der Gleitpfadherstellung mit der R-Pilot führt das initiale manuelle Scouting häufiger zu einem Vorteil als zu einem

Nachteil, da die R-Pilot ebenfalls in ihrer Flexibilität z.B. der HyFlex EDM Glidepath File unterlegen ist und sich durch die reziproke Arbeitsweise von den rotierenden Gleitpfadinstrumenten unterscheidet. Dies macht ein initiales manuelles Scouting vor der Verwendung der R-Pilot bei sehr komplexer Kanalanatomie sinnvoll. Dies ist nachvollziehbar und kann durch die Ergebnisse diverser anderen Studien bestätigt werden, die gezeigt haben, dass das initiale manuelle Scouting die Kanaldurchgängigkeit sicherstellt und die Anwendung der nachfolgenden maschinellen Aufbereitungsinstrumente sicherer macht (Berutti et al., 2004). Bei der Gleitpfadherstellung mit der PathGlider ist kein eindeutiger Unterschied durch das initiale manuelle Scouting erkennbar. Auch andere Studien konnten aufzeigen, dass es bei einigen Instrumenten keinen signifikanten Unterschied zwischen der manuellen und maschinellen Gleitpfadpräparation gibt (Alves et al., 2012). Außerdem zeigen die Ergebnisse aber auch, dass die PathGlider insgesamt anderen maschinellen Gleitpfadinstrumenten bei sehr komplexer Kanalanatomie unterlegen ist und auch kein initiales manuelles Scouting dabei einen Vorteil bringt. Bei der F360, der Procodile und der R25 blue ist kein Unterschied durch das initiale manuelle Scouting erkennbar. Dies bestätigt z.B. die Ergebnisse der Studie von Bürklein et al. (2014), die ebenfalls feststellten, dass die Gleitpfadpräparation keinen signifikanten Einfluss auf die Kanalbegradigung z.B. bei der Aufbereitung mit der F360 hat. Dies zeigt, dass diese Instrumente für sehr komplexe Kanalanatomie weniger gut geeignet sind als die HyFlex EDM oder die VDW.ROTATE 020 und auch kein initiales manuelles Scouting einen Vorteil bringt. Besonders die Procodile und die R25 blue scheinen durch ihre aggressivere, reziproke Arbeitsweise in dieser Studie einen Nachteil zu bringen. Die Ergebnisse der Studie von Adıguzel and Tufenkci (2018), dass durch die R25 blue in den meisten Fällen die vollständige Arbeitslänge auch ohne Gleitpfad erreicht werden kann, kann auf sehr komplexe Kanalanatomie nicht übertragen werden. Auch der Durchmesser des Aufbereitungsinstrumentes ist entscheidend: Die F360, die Procodile und die R25 blue haben einen Durchmesser von 025, das VDW.ROTATE und das HyFlex EDM Aufbereitungsinstrument haben jeweils einen Durchmesser von 020. Bei sehr



komplexer Kanalanatomie ist es dementsprechend empfehlenswert auf Aufbereitungsinstrumente mit einem größeren Durchmesser zu verzichten, wenn es klinisch vertretbar ist, oder auf eine kontinuierliche Aufbereitung mit Instrumenten mit steigendem Durchmesser zurückzugreifen. Auch der Taper scheint einen Einfluss auf den Erhalt der Kanalanatomie zu haben. Die VDW.ROTATE 020 und das HyFlex EDM- Aufbereitungsinstrument haben einen Taper von 0.05. Die R25 blue hat einen Taper von 0.08 und die Procodile einen Taper von 0.06. Durch Instrumente mit einem kleineren Taper kann die ursprüngliche Kanalanatomie also besser erhalten werden. Dies bestätigt andere Studien (Bürklein et al., 2014; Saleh et al., 2015). Die F360 aber hat den geringsten Taper von 0.04 und kann die Kanalanatomie nicht besser erhalten. Bei der Gleitfadherstellung durch die HyFlex EDM Glidepath File führt das initiale manuelle Scouting zu einem deutlichen Nachteil beim Erhalt der Kanalanatomie und beim Erreichen der Arbeitslänge. Durch ihre extreme Flexibilität ist die HyFlex EDM Glidepath File manuellen Instrumenten überlegen, sodass ein initiales manuelles Scouting nur dazu führt, dass die ursprüngliche Kanalanatomie schlechter erhalten wird. Dies bestätigt die Ergebnisse anderer Studien, die den Vorteil der maschinellen Gleitfadpräparation aufgezeigt haben (Berutti et al., 2009; Pasqualini et al., 2012). Dass andere Studien gezeigt haben, dass die Kanalanatomie durch die reziproke Aufbereitung besser erhalten werden kann (Saber et al., 2015), kann in dieser Studie nicht bestätigt werden. Dabei spielt die Komplexität der Kanalanatomien dieser Studie sicher eine entscheidende Rolle. Die rotierende Arbeitsweise ist bei starken Krümmungen schonender als die aggressivere, reziproke Arbeitsweise. Die Instrumente, die die Kanalanatomie in dieser Studie am besten erhalten können und am häufigsten die korrekte Arbeitslänge erreichen, sind rotierend arbeitende Instrumente.

#### **4.2.3. Arbeitssicherheit**

Die Instrumentenfraktur bei der Aufbereitung insbesondere von gekrümmten Wurzelkanälen ist eine mögliche Komplikation (Suter, 2017). Sie kann durch eine Torsionsbelastung oder durch zyklische Ermüdung hervorgerufen werden. Die

Instrumentenfrakturen durch zyklische Ermüdung spielen klinisch insgesamt die größere Rolle. Je kleiner der Radius und je länger die Krümmung und, desto höher ist das Risiko einer Ermüdungsfraktur (Lopes et al., 2013). In dieser Studie frakturieren bei der manuellen Gleitpfadherstellungen 5 NiTi-Handinstrumente und bei der maschinellen Gleitpfadherstellung 4 HyFlex EDM Glidepath Files. Die extreme Flexibilität der HyFlex EDM Glidepath File ist für den Erhalt der ursprünglichen Kanal Anatomie ein enormer Vorteil, scheint aber auch mit einem erhöhten Risiko für eine Instrumentenfraktur einherzugehen. Bei den 5 Frakturen von NiTi-Handinstrument kommt es zu 2 Frakturen bei der 4. bzw. der 5. Benutzung. Dies bestätigt andere Studien, die aufgezeigt haben, dass die Belastungsdauer das Risiko einer Ermüdungsfraktur erhöht (Lopes et al., 2013). Die eine Fraktur kommt in der 1. und die andere Fraktur in der 3. Versuchsreihe vor. Frakturen durch zyklische Ermüdung können bei allen Wurzelkanalkrümmungen auftreten. Besonders ein kleiner Krümmungsradius erhöht aber das Risiko einer Fraktur durch zyklische Ermüdung. In der Klinik spielt die Ermüdungsfraktur eine große Rolle und kommt sowohl bei der manuellen, als auch bei der maschinellen Aufbereitung vor. Bei der Reevaluation zeigt sich weiter, dass bei 2 weiteren Frakturen der NiTi-Handinstrumente ein Fehldruck vorliegt und die Kanäle von apikal nicht durchgängig sind. Die Frakturen kommen in der 2. Versuchsreihe vor und bei der 1. Verwendung der Instrumente. Diese Torsionsfrakturen, die durch ein Verklemmen der Instrumentenspitze im Wurzelkanal verursacht werden, kommen in der Klinik ebenfalls v.a. bei der manuellen Aufbereitung vor. Bei der maschinellen Aufbereitung können Torsionsfrakturen durch die Drehmomentbegrenzung größtenteils verhindert werden, was als Vorteil der maschinellen Gleitpfadherstellung zu nennen ist. Bei der 5. Fraktur eines NiTi-Handinstrumentes ist der Wurzelkanal von apikal gängig und das Instrument frakturiert bei der 2. Verwendung. Diese Fraktur kommt in der 3. Versuchsreihe an einem Wurzelkanal mit einer Hook-Konfiguration vor. Dies Ergebnis bestätigt andere Studien, die gezeigt haben, dass lange Krümmungen mit einem kleinen Radius das Risiko einer Ermüdungsfraktur erhöhen (Lopes et al., 2013). Von den 4 Frakturen von HyFlex EDM Glidepath Files kommt eine Fraktur bei der 3. Verwendung vor. Die

3 anderen Frakturen kommen bei der 1. Verwendung vor. Die 4 Frakturen kommen alle an dem gleichen Wurzelkanal mit einer Hook-Konfiguration vor wie auch die Fraktur des einen NiTi-Handinstruments (s.o.). Alle Wurzelkanäle sind von apikal durchgängig. Dies bestätigt, dass lange Krümmungen mit einem kleinen Radius das Risiko einer Ermüdungsfraktur deutlich erhöhen (Lopes et al., 2013). Andere Studien haben aber auch gezeigt, dass das HyFlex EDM-System, auch die Gleitpfadinstrumente, grundsätzlich eine größere Resistenz gegen zyklische Ermüdung besitzt als andere maschinelle Aufbereitungssysteme, diese Resistenz aber auch entscheidend von der Wurzelkanalkrümmung abhängt (Capar et al., 2015; Yılmaz et al., 2017). Dies kann in dieser Studie insofern bestätigt werden, dass die HyFlex EDM Glidepath File bei starken Krümmungen ein höheres Frakturrisiko zeigt als bei geringeren Krümmungen. Allerdings zeigt die HyFlex EDM Glidepath File durch die extreme Flexibilität in dieser Studie ein höheres Frakturrisiko als die anderen maschinellen Gleitpfadinstrumente dieser Studie. Grundsätzlich verhindert der manuelle Gleitpfad Aufbereitungsfehler und verringert die Torque-Belastung, die besonders auf nachfolgende maschinelle Aufbereitungsinstrumente einwirkt, und so auch das Risiko der Instrumentenfraktur bei der nachfolgenden Aufbereitung. Dies bestätigt auch die Ergebnisse diverser anderer Studien (Berutti et al., 2004; Ha and Park, 2012; Patiño et al., 2005).

## 5. Zusammenfassung

Zähne mit sehr komplexer Kanalanatomie, insbesondere Weisheitszähne, stellen aufgrund ihrer anspruchsvoll zu erschließenden Wurzelkanäle in der Praxis eine Herausforderung bei der Wurzelkanalbehandlung dar. Häufig können sie bei endodontischen Problemen nicht erhalten werden und müssen extrahiert werden. Hinzukommt, dass es in der aktuellen Forschung keine Studien zu der Erschließung von Wurzelkanalkrümmungen von 70° - 180° gibt. Diese Studie hat sich eben mit dieser Lücke in der aktuellen Forschung beschäftigt. Die zentralen Fragestellungen dieser in-vitro-Studie an 3D-gedruckten Zähnen waren:

- Kann das initiale manuelle Erschließen vor der maschinellen Erschließung von Wurzelkanälen dazu beitragen, dass komplexe Wurzelkanäle bei Erhalt der ursprünglichen Kanalanatomie häufiger erschlossen werden können?
- Können bei sehr komplexer Kanalanatomie Wurzelkanäle durch die Verwendung maschineller Gleitpfadinstrumente bei Erhalt der Kanalanatomie häufiger erschlossen werden als durch maschinelle Aufbereitungsinstrumente?
- Welches maschinelle Gleitpfad-/Aufbereitungsinstrument kann sehr komplexe Wurzelkanäle bei Erhalt der Kanalanatomie am häufigsten erschließen?

Als Nebenaspekte wurden der zeitliche Aufwand und die Arbeitssicherheit untersucht. Die Studie umfasste 3 Versuchsreihen (je Versuchsreihe n=180, insgesamt n=560), die sich durch verschiedene Grade der Komplexität der Kanalanatomie unterscheiden. Die untersuchten Wurzelkanäle dieser Studie wurden aus 345 Micro-CTs von Weisheitszähnen ausgewählt. In jeder Versuchsreihe wurden die verschiedenen Instrumente mit und ohne initiales manuelles Scouting getestet. Zur Auswertung wurde klinisch die Dentindicke im Bereich der Außenkurvatur bestimmt. Folgende Erkenntnisse konnten in dieser Studie gewonnen werden und erlauben, diese Rückschlüsse für die Erschließung sehr komplexer Wurzelkanäle in der Praxis zu ziehen:

- Entgegen der weit verbreiteten Meinung führt das initiale manuelle Scouting zu keinem signifikanten Vorteil beim Erschließen der Wurzelkanäle, es kann darauf verzichtet werden.
- Die Erschließung komplexer Wurzelkanäle sollte mit modernen maschinellen Gleitpfadinstrumenten erfolgen.
- Von den getesteten maschinellen Gleitpfadinstrumente konnten die HyFlex EDM Glidepath File und die VDW.ROTATE 015 komplexe Wurzelkanäle bei Erhalt der Kanalanatomie zuverlässiger erschließen, wobei Frakturen der HyFlex EDM Glidepath File auftraten.

Die Ergebnisse dieser Studie erlauben den Rückschluss, dass sehr komplexe Kanalanatomien, z.B. bei Weisheitszähnen, in Zukunft kein Ausschlusskriterium für eine Wurzelkanalbehandlung sein müssen und dass diese Zähne in Zukunft auch erhalten werden können.

## 6. Literaturverzeichnis

- Adiguzel M and Tufenkci P (2018) Comparison of the ability of Reciproc and Reciproc Blue instruments to reach the full working length with or without glide path preparation. *Restorative Dentistry & Endodontics* 43(4). DOI: 10.5395/rde.2018.43.e41.
- Alves V de O, Bueno CE da S, Cunha RS, et al. (2012) Comparison among manual instruments and PathFile and Mtwo rotary instruments to create a glide path in the root canal preparation of curved canals. *Journal of Endodontics* 38(1): 117–120. DOI: 10.1016/j.joen.2011.10.001.
- Baumann MA and Roth A (1999) Effect of experience on quality of canal preparation with rotary nickel-titanium files. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 88(6): 714–718. DOI: 10.1016/S1079-2104(99)70015-6.
- Berutti E, Negro AR, Lendini M, et al. (2004) Influence of manual preflaring and torque on the failure rate of ProTaper rotary instruments. *Journal of Endodontics* 30(4): 228–230. DOI: 10.1097/00004770-200404000-00011.
- Berutti E, Cantatore G, Castellucci A, et al. (2009) Use of nickel-titanium rotary PathFile to create the glide path: comparison with manual preflaring in simulated root canals. *Journal of Endodontics* 35(3): 408–412. DOI: 10.1016/j.joen.2008.11.021.
- Blum JY, Machtou P, Ruddle C, et al. (2003) Analysis of mechanical preparations in extracted teeth using ProTaper rotary instruments: value of the safety quotient. *Journal of Endodontics* 29(9): 567–575. DOI: 10.1097/00004770-200309000-00007.
- Braun A, Schüttlöffel ME and Frentzen M (2003) Wurzelkanalbegradigung durch die Aufbereitung mit rotierenden NiTi-Systemen. *DZZ* (1): 42–45.
- Brendel KU (2001) Rationelle und minimalinvasive Wurzelkanalaufbereitung mit dem GT Rotary System. *Endodontie* 10(3): 259–276.
- Bürklein S and Schäfer E (2013) Critical evaluation of root canal transportation by instrumentation. *Endodontic Topics* 29(1): 110–124. DOI: 10.1111/etp.12043.
- Bürklein S, Hinschitza K, Dammaschke T, et al. (2012) Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. *International Endodontic Journal* 45(5): 449–461. DOI: 10.1111/j.1365-2591.2011.01996.x.

- Bürklein S, Poschmann T and Schäfer E (2014) Shaping Ability of Different Nickel-Titanium Systems in Simulated S-shaped Canals with and without Glide Path. *Journal of Endodontics* 40(8): 1231–1234. DOI: 10.1016/j.joen.2014.01.043.
- Bürklein S, Mathey D and Schäfer E (2015) Shaping ability of ProTaper NEXT and BT-RaCe nickel-titanium instruments in severely curved root canals. *International Endodontic Journal* 48(8): 774–781. DOI: 10.1111/iej.12375.
- Capar ID, Ertas H, Ok E, et al. (2014) Comparative study of different novel nickel-titanium rotary systems for root canal preparation in severely curved root canals. *Journal of Endodontics* 40(6): 852–856. DOI: 10.1016/j.joen.2013.10.010.
- Capar ID, Kaval ME, Ertas H, et al. (2015) Comparison of the cyclic fatigue resistance of 5 different rotary pathfinding instruments made of conventional nickel-titanium wire, M-wire, and controlled memory wire. *Journal of Endodontics* 41(4): 535–538. DOI: 10.1016/j.joen.2014.11.008.
- Cunningham CJ and Senia ES (1992) A three-dimensional study of canal curvatures in the mesial roots of mandibular molars. *Journal of Endodontics* 18(6): 294–300.
- DGZ (2004) Stellungnahme Good clinical practice: Die Wurzelkanalbehandlung. Available at: <http://www.dgzmk.de/zahnaerzte/wissenschaft-forschung/stellungnahmen/details/document/good-clinical-practice-die-wurzelkanalbehandlung.html> (accessed 25 March 2019).
- Elnaghy AM and Elsaka SE (2014) Evaluation of root canal transportation, centering ratio, and remaining dentin thickness associated with ProTaper Next instruments with and without glide path. *Journal of Endodontics* 40(12): 2053–2056. DOI: 10.1016/j.joen.2014.09.001.
- Gluskin AH, Brown DC and Buchanan LS (2001) A reconstructed computerized tomographic comparison of Ni-Ti rotary GT files versus traditional instruments in canals shaped by novice operators. *International Endodontic Journal* 34(6): 476–484. DOI: 10.1046/j.1365-2591.2001.00422.x.
- Ha J-H and Park S-S (2012) Influence of glide path on the screw-in effect and torque of nickel-titanium rotary files in simulated resin root canals. *Restorative Dentistry & Endodontics* 37(4): 215–219. DOI: 10.5395/rde.2012.37.4.215.
- Han Y, Bai YH and Hou XM (2018) [Glide path management of rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals]. *Beijing Da Xue Xue Bao. Yi Xue Ban = Journal of Peking University. Health Sciences* 50(1): 148–153.

- Hellwig E, Klimek J and Attin T (2013) *Einführung in die Zahnerhaltung*. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag GmbH.
- Hülsmann M, Peters OA and Dummer PMH (2005) Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics* 10(1): 30–76. DOI: 10.1111/j.1601-1546.2005.00152.x.
- Kartal N and Cimilli HK (1997) The degrees and configurations of mesial canal curvatures of mandibular first molars. *Journal of Endodontics* 23(6): 358–362. DOI: 10.1016/S0099-2399(97)80182-3.
- Keskin C, Inan U, Demiral M, et al. (2017) Cyclic Fatigue Resistance of Reciproc Blue, Reciproc, and WaveOne Gold Reciprocating Instruments. *Journal of Endodontics* 43(8): 1360–1363. DOI: 10.1016/j.joen.2017.03.036.
- Keskin C, Inan U, Demiral M, et al. (2018) Cyclic fatigue resistance of R-Pilot, WaveOne Gold Glider, and ProGlider glide path instruments. *Clinical Oral Investigations* 22(9): 3007–3012. DOI: 10.1007/s00784-018-2391-4.
- Kiefner P (2012) Moderne Endodontie - Ein Überblick. *Endodontie Journal* 11(1): 14–19.
- Kiefner P, Ban M and De-Deus G (2014) Is the reciprocating movement per se able to improve the cyclic fatigue resistance of instruments? *International Endodontic Journal* 47(5): 430–436. DOI: 10.1111/iej.12166.
- Komet Procodile Produktdetails (2019). Available at: <https://www.kometstore.de/V2/de-de/products/products-kometdental/procodile.aspx> (accessed 22 May 2019).
- Lopes HP, Vieira MVB, Elias CN, et al. (2013) Influence of the geometry of curved artificial canals on the fracture of rotary nickel-titanium instruments subjected to cyclic fatigue tests. *Journal of Endodontics* 39(5): 704–707. DOI: 10.1016/j.joen.2012.12.027.
- Miserendino LJ, Miserendino CA, Moser JB, et al. (1988) Cutting efficiency of endodontic instruments. Part III. Comparison of sonic and ultrasonic instrument systems. *Journal of Endodontics* 14(1): 24–30. DOI: 10.1016/S0099-2399(88)80237-1.
- Morgental RD, Vier-Pelisser FV, Kopper PMP, et al. (2013) Cutting efficiency of conventional and martensitic nickel-titanium instruments for coronal flaring. *Journal of Endodontics* 39(12): 1634–1638. DOI: 10.1016/j.joen.2013.08.016.
- Nagy CD, Szabó János and Szabó József (1995) A mathematically based classification of root canal curvatures on natural human teeth. *Journal of Endodontics* 21(11): 557–560. DOI: 10.1016/S0099-2399(06)80985-4.



- Nakagawa RKL, Alves JL, Buono VTL, et al. (2014) Flexibility and torsional behaviour of rotary nickel-titanium PathFile, RaCe ISO 10, Scout RaCe and stainless steel K-File hand instruments. *International Endodontic Journal* 47(3): 290–297. DOI: 10.1111/iej.12146.
- Paleker F and van der Vyver PJ (2016) Comparison of Canal Transportation and Centering Ability of K-files, ProGlider File, and G-Files: A Micro-Computed Tomography Study of Curved Root Canals. *Journal of Endodontics* 42(7): 1105–1109. DOI: 10.1016/j.joen.2016.04.005.
- Paleker F and van der Vyver PJ (2017) Glide Path Enlargement of Mandibular Molar Canals by Using K-files, the ProGlider File, and G-Files: A Comparative Study of the Preparation Times. *Journal of Endodontics* 43(4): 609–612. DOI: 10.1016/j.joen.2016.11.025.
- Paqué F, Zehnder M and De-Deus G (2011) Microtomography-based comparison of reciprocating single-file F2 ProTaper technique versus rotary full sequence. *Journal of Endodontics* 37(10): 1394–1397. DOI: 10.1016/j.joen.2011.06.031.
- Pasqualini D, Bianchi CC, Paolino DS, et al. (2012) Computed micro-tomographic evaluation of glide path with nickel-titanium rotary PathFile in maxillary first molars curved canals. *Journal of Endodontics* 38(3): 389–393. DOI: 10.1016/j.joen.2011.11.011.
- Passi S, Kaler N and Passi N (2016) What is a glide path? 2(2): 32–37.
- Patiño PV, Biedma BM, Liébana CR, et al. (2005) The influence of a manual glide path on the separation rate of NiTi rotary instruments. *Journal of Endodontics* 31(2): 114–116.
- Pereira ESJ, Peixoto IFC, Viana ACD, et al. (2012) Physical and mechanical properties of a thermomechanically treated NiTi wire used in the manufacture of rotary endodontic instruments. *International Endodontic Journal* 45(5): 469–474. DOI: 10.1111/j.1365-2591.2011.01998.x.
- Peters OA (2004) Current Challenges and Concepts in the Preparation of Root Canal Systems: A Review. *Journal of Endodontics* 30(8). Elsevier: 559–567. DOI: 10.1097/01.DON.0000129039.59003.9D.
- Pettiette MT, Metzger Z, Phillips C, et al. (1999) Endodontic complications of root canal therapy performed by dental students with stainless-steel K-files and nickel-titanium hand files. *Journal of Endodontics* 25(4): 230–234. DOI: 10.1016/S0099-2399(99)80148-4.
- Pruett JP, Clement DJ and Carnes DL (1997) Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *Journal of Endodontics* 23(2): 77–85. DOI: 10.1016/S0099-2399(97)80250-6.

- Roane JB, Sabala CL and Duncanson MG (1985) The 'balanced force' concept for instrumentation of curved canals. *Journal of Endodontics* 11(5): 203–211. DOI: 10.1016/S0099-2399(85)80061-3.
- Rödig T, Hülsmann M, Nordmeyer S, et al. (2009) *Grundlagen der modernen Endodontie*. Balingen: Spitta.
- Saber SEDM, Nagy MM and Schäfer E (2015) Comparative evaluation of the shaping ability of WaveOne, Reciproc and OneShape single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *International Endodontic Journal* 48(1): 109–114. DOI: 10.1111/iej.12289.
- Saleh AM, Vakili Gilani P, Tavanafar S, et al. (2015) Shaping ability of 4 different single-file systems in simulated S-shaped canals. *Journal of Endodontics* 41(4): 548–552. DOI: 10.1016/j.joen.2014.11.019.
- Schäfer E, Diez C, Hoppe W, et al. (2002) Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth. *Journal of Endodontics* 28(3): 211–216. DOI: 10.1097/00004770-200203000-00017.
- Schneider SW (1971) A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, and Oral Pathology* 32(2): 271–275.
- Suter B (2017) «Separated Root Canal Instruments – An overview of incidence, localisation, treatment strategies and outcome». *Swiss Dental Journal* 127(3): 233–237.
- Tchorz J (2016) Wurzelkanalaufbereitung – rotierend, reziprok, blue. *ZMK* 32(10): 670–671.
- Topçuoğlu HS and Topçuoğlu G (2017) Cyclic Fatigue Resistance of Reciproc Blue and Reciproc Files in an S-shaped Canal. *Journal of Endodontics* 43(10): 1679–1682. DOI: 10.1016/j.joen.2017.04.009.
- Topçuoğlu HS, Topçuoğlu G, Kafdağ Ö, et al. (2018) Cyclic fatigue resistance of new reciprocating glide path files in 45- and 60-degree curved canals. *International Endodontic Journal* 51(9): 1053–1058. DOI: 10.1111/iej.12915.
- VDW GmbH (2019) VDW.ROTATE Produktdetails. Available at: <http://www.vdw-dental.com/de/sortiment/produktdetail/> (accessed 22 May 2019).
- Venino PM, Citterio CL, Pellegatta A, et al. (2017) A Micro-computed Tomography Evaluation of the Shaping Ability of Two Nickel-titanium Instruments, HyFlex EDM and ProTaper Next. *Journal of Endodontics* 43(4): 628–632. DOI: 10.1016/j.joen.2016.11.022.

- Weber T (2010) *Memorix Zahnmedizin*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Willershausen B, Tekyatan H, Schulze R, et al. (2005) Bestimmung und Bedeutung von Wurzelkanalkrümmungen und Längenverhältnissen von OK-Prämolaren. *DZZ* 60(2): 87–90.
- Winkler R (1996) Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle. Modifizierte endodontische Aufbereitungstechnik. *Endodontie* 5(1): 17–27.
- Yılmaz K, Uslu G and Özyürek T (2017) In vitro comparison of the cyclic fatigue resistance of HyFlex EDM, One G, and ProGlider nickel titanium glide path instruments in single and double curvature canals. *Restorative Dentistry & Endodontics* 42(4): 282–289. DOI: 10.5395/rde.2017.42.4.282.
- You S-Y, Kim H-C, Bae K-S, et al. (2011) Shaping ability of reciprocating motion in curved root canals: a comparative study with micro-computed tomography. *Journal of Endodontics* 37(9): 1296–1300. DOI: 10.1016/j.joen.2011.05.021.
- Zupanc J and Schäfer E (2017) Endodontie. *Endodontie* 26(3): 269–281.

## 7. Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde in der Poliklinik für Zahnerhaltung unter Betreuung von PD Dr. med. dent. A. ElAyouti durchgeführt. Die Konzeption der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit PD Dr. med. dent. A. ElAyouti. Sämtliche Versuche wurden von mir eigenständig durchgeführt. Die statistische Auswertung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Biometrie durch Dr. L. Serna Higueta, PD Dr. med. dent. A. ElAyouti und mich. Ich versichere, das Manuskript selbständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 20.12.2020



---

Doktorand/in

## 8. Danksagung

Ich danke Herrn PD Dr. A. ElAyouti dafür, dass er das Thema mit mir zusammen ausgearbeitet hat und mich auf meinem Weg zur Promotion mit Ratschlägen, Anregungen und viel Geduld betreut hat.

Außerdem möchte ich mich herzlich bei Frau Dr. L. Serna Higuera vom Institut für klinische Epidemiologie und angewandte Biometrie in Tübingen bedanken, die mit viel Geduld alle meine Fragen beantwortet hat und mir bei der statistischen Auswertung eine sehr große Hilfe war.

Zum Schluss möchte ich meinen Eltern danken, die mich immer auf meinem Weg mit viel Liebe und Vertrauen unterstützt haben. Ich bin sehr dankbar, dass sie mir mein Studium der Zahnmedizin nicht nur finanziell ermöglicht haben, sondern mich stets in meinem Werdegang bestärken und mir zur Seite stehen.

## 9. Lebenslauf

### Persönliche Daten

Geburtsdatum und -ort	27.10.1992 in Hannover
Familienstand	ledig
Nationalität	Deutsch

### Bildungsweg

22.06.2020	Erteilung der Approbation als Zahnärztin
20.05.2020	Zahnärztliche Prüfung; Note: 1
05.10.2017	Zahnärztliche Vorprüfung; Note: 1
16.03.2016	Naturwissenschaftliche Vorprüfung; Note: 1
2015 – 2020	Studium der Zahnmedizin an der Eberhard Karls Universität Tübingen
2013 – 2015	Berufliche Tätigkeit im Dentallabor Lork&Wothe
2012 – 2013	Bundesfreiwilligendienst im Seniorenheim Friedrich- Rittelmeyer-Haus
2010 – 2012	Ausbildung zur zahnmedizinischen Fachangestellten
19.06.2010	Abitur am humanistischen Kaiser-Wilhelm- und Rats gymnasium in Hannover; Note: 2,1 Erwerb des großen Latinums und Graecums
2004 – 2010	Besuch des humanistischen Kaiser-Wilhelm- und Ratsgymnasiums in Hannover
2002 – 2004	Besuch der Orientierungsstufe Luerstraße in Hannover
1998 – 2002	Besuch der Johanna-Friesen-Grundschule in Hannover