

Aus der Klinik für Zahnerhaltung und Parodontologie  
(Direktor: Prof. Dr. C. Dörfer)  
im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel  
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

---

**Vergleich zweier maschineller Ein-Feilen-  
Aufbereitungssysteme mithilfe eines 3D-Printing-  
Verfahrens.**

**Eine In-vitro-Studie.**

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde der Zahnheilkunde  
der Medizinischen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

**Doreen Schröter**

aus Templin

Kiel 2018

1. Berichterstatter: Prof. Dr. B. Größner-Schreiber

2. Berichterstatter: Prof. Dr. H.-J. Wenz

Tag der mündlichen Prüfung: 19.06.2019

Zum Druck genehmigt, Kiel, den 14.04.2019

gez.: Prof. Dr. Johann Roider  
(Vorsitzender des Ausschusses für Promotion)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Anatomie des Wurzelkanals.....	2
1.1.1 Wurzelkanalkrümmung.....	3
1.2 Ziele der Wurzelkanalaufbereitung.....	5
1.3 Aufbereitungsfehler bei gekrümmtem Kanalverlauf.....	5
1.4 Die manuelle Wurzelkanalaufbereitung.....	6
1.5 Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung.....	7
1.5.1 Entwicklung.....	8
1.5.2 Eigenschaften der Nickel-Titan-Instrumente.....	10
1.6 Herstellungsverfahren von Kunststoffblöcken.....	12
1.6.1 3D-Druck-Verfahren (3D-Printing-Verfahren).....	12
1.7 Fragestellung.....	13
<b>2 Material und Methoden</b> .....	<b>15</b>
2.1 In der Studie verwendete Feilensysteme.....	15
2.1.1 Reciproc-System.....	15
2.1.1.1 Feilendesign.....	16
2.1.1.2 Anwendung.....	17
2.1.2 F6 SkyTaper.....	18
2.1.2.1 Feilendesign.....	19
2.1.2.2 Anwendung.....	19
2.2 Versuchsaufbau.....	20
2.2.1 Herstellung der Untersuchungskörper.....	20
2.2.2 Gruppeneinteilung.....	21
2.2.3 Vorbereitung der Untersuchungskörper.....	21
2.2.4 Fotodokumentation der Untersuchungskörper.....	23

2.2.5 Instrumente und Geräte.....	25
2.2.6 Vorversuch.....	27
2.3 Versuchsablauf .....	27
2.3.1 Versuchsgruppe A: Maschinelle Aufbereitung mit dem Reciproc-System .....	28
2.3.2 Versuchsgruppe B: Maschinelle Aufbereitung mit dem F6 SkyTaper-System .....	29
2.3.3 Aufbereitungszeit .....	29
2.4 Versuchsauswertung .....	30
2.5 Statistische Analyse .....	35
<b>3 Ergebnisse .....</b>	<b>36</b>
3.1 Auswertung je Feilensystem .....	36
3.1.1 Auswertung Reciproc .....	36
3.1.2 Auswertung F6 SkyTaper .....	40
3.1.2.1 Auswertung F6 SkyTaper (25/06) .....	40
3.1.2.2 Auswertung F6 SkyTaper (30/06) .....	43
3.2 Auswertung der Feilensysteme gegeneinander, je Kanalkonfiguration .....	45
3.2.1 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 60R8 .....	46
3.2.2 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 60R5 .....	47
3.2.3 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 60R2 .....	49
3.2.4 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 45R8 .....	51
3.2.5 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 45R5 .....	53
3.2.6 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 45R2 .....	55
3.2.7 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 30R8 .....	57
3.2.8 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 30R5 .....	59
3.2.9 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 30R2 .....	61
3.3 Auswertung der Feilensysteme gegeneinander, über alle Untersuchungsblöcke.....	64
3.4 Aufbereitungszeit .....	65
3.4.1 Vergleich der Aufbereitungszeiten der beiden Aufbereitungssysteme .....	66

3.4.2 Aufbereitungszeiten Reciproc .....	68
3.4.3 Aufbereitungszeiten F6 SkyTaper (25/06 + 30/06) .....	69
3.5 Nebenauswertung (Stufenbildung, Frakturen) .....	70
<b>4 Diskussion.....</b>	<b>72</b>
4.1 Diskussion von Material und Methode .....	73
4.1.1 Auswahl der Untersuchungskörper.....	73
4.1.2 Auswahl der Kanalkonfigurationen .....	74
4.1.3 Fotodokumentation und Bildauswertung .....	74
4.2 Diskussion der Ergebnisse .....	75
4.3 Schlussfolgerung (und Ausblick).....	79
<b>5 Zusammenfassung .....</b>	<b>81</b>
<b>6 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>83</b>
<b>7 Anhang .....</b>	<b>90</b>
7.1 Abkürzungsverzeichnis .....	90
7.2 Tabellenverzeichnis .....	90
7.3 Abbildungsverzeichnis.....	92
<b>8 Danksagung .....</b>	<b>94</b>
<b>9 Lebenslauf .....</b>	<b>95</b>

# 1 Einleitung

Die Endodontie ist ein Teilbereich der Zahnerhaltung, der sich mit der Anatomie und Physiologie des Endodonts sowie mit der Ätiologie, Prävention, Pathologie, Diagnostik und Therapie seiner Erkrankungen oder Verletzungen befasst. Das Endodont umfasst die Zahnpulpa (Zahnmark) sowie die sie umgebenden und mit ihr physiologischerweise kommunizierenden Gewebe, wie das Dentin und das periapikale beziehungsweise laterale Parodont (WEBER 2010).

In unserer Bevölkerung wächst der Wunsch auf Zahnerhalt bis ins hohe Alter, was sich im Jahrbuch der KZBV widerspiegelt. Die Anzahl der endodontischen Behandlungen (Wurzelkanalfüllungen) stieg in den alten Bundesländern zwischen den Jahren 1970 und 2014 von 3.165.000 auf 6.076.000, wohingegen die Anzahl der Extraktionen von 17.186.000 auf 10.575.000 abfiel. Die neuen Bundesländer zeigten mit einer Zunahme der durchgeführten Wurzelkanalfüllungen zwischen den Jahren 1991 und 2014 von 946.000 auf 1.026.000 und einer Abnahme der Zahnextraktionen von 4.671.000 auf 2.224.000 einen vergleichbaren Verlauf (MUND et al. 2015).

Die Gründe für eine Wurzelkanalbehandlung sind vielseitig. In mehr als 90 % der Fälle jedoch liegt die Hauptursache in einer kariösen Läsion des Zahnes und ihrer Auswirkung auf die Pulpa (irreversibel geschädigte oder nekrotische Pulpa). Darüber hinaus können sowohl traumatisch bedingte Verletzungen des Zahnes als auch thermische beziehungsweise chemische Reize zu einer Entzündung der Pulpa führen, die eine Wurzelkanalbehandlung nötig machen. Zudem stellt eine geplante Wurzelspitzenresektion, Hemisektion oder Amputation eine Indikation zur Wurzelkanalbehandlung dar. Aus prothetischer Sicht kann eine notwendige Devitalisation zur Verankerung eines Wurzelstiftes, ein zweifelhafter Pulpazustand vor restaurativen Maßnahmen, sowie die drohende Pulpaeröffnung während der Präparation eines Zahnes mit Fehlstellung, Grund einer Wurzelkanalbehandlung sein (EUROPÄISCHE GESELLSCHAFT FÜR ENDODONTOLOGIE 2004). Der langfristige Erhalt des Zahnes als funktionsfähige Kauereinheit sowie die Wiederherstellung gesunder periradikulärer Strukturen stellen die Ziele der Wurzelkanalbehandlung dar (STELLUNGNAHME DES DGZ BEIRATS 2005). Für den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung und der daraus resultierenden Prognose des zu erhaltenden Zahnes spielt die Wurzelkanalaufbereitung eine entscheidende Rolle. In zahlreichen

Studien konnte gezeigt werden, dass rotierende Nickel-Titan-Aufbereitungssysteme aufgrund ihrer hohen Flexibilität der konventionellen Aufbereitung mit Edelmetallinstrumenten überlegen sind (SONNTAG et al. 2003; GUELZOW et al. 2005; STAVILECI et al. 2013). Die Anwendung rotierender Nickel-Titan-Systeme führt bei der Aufbereitung vor allem von gekrümmten Kanälen zu einer gleichmäßig konischen Kanalform mit nur geringer Verlagerung des Kanals (GUELZOW et al. 2005; PAQUÉ et al. 2005; SONNTAG et al. 2007). Dennoch lassen sich signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Nickel-Titan-Systemen erkennen (SCHÄFER et al. 2006b). Zudem können Aufbereitungsfehler auch bei der maschinellen Aufbereitung nicht vollständig eliminiert werden (YOSHIMINE et al. 2005; SCHÄFER et al. 2006a). Eine ständige Weiter- beziehungsweise Neuentwicklung von maschinellen Aufbereitungssystemen mit hochflexiblen und effizienten Nickel-Titan-Feilen macht es erforderlich, vergleichende Studien durchzuführen, um einen Überblick über die Eigenschaften der einzelnen Systeme sowie deren Vor- und Nachteile zu erhalten.

## **1.1 Anatomie des Wurzelkanals**

Die genaue Kenntnis der Anatomie und Morphologie der Zähne und speziell des Wurzelkanalsystems ist Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung von Wurzelkanalbehandlungen (HELLWIG et al. 2009).

Beim Wurzelkanal handelt es sich um ein stark verzweigtes dreidimensionales Kanalsystem, das zahlreiche Seitenkanäle und Verzweigungen aufweist. Die Häufigkeit der akzessorischen Wurzelkanäle nimmt von koronal (1,6 %) über das mittlere Wurzelkanaldrittel (8,8 %) nach apikal hin (17 %) zu. Die Prämolaren und Molaren zeigen die größte Anzahl an Verzweigungen, während die Schneidezähne weitaus weniger Gabelungen aufweisen (DE DEUS 1975). Am Pulpakammerboden im Bereich der Bifurkation oder Trifurkation von mehrwurzligen Zähnen sind häufig (26 %) sekundäre Kanäle, sogenannte Pulpaperiodontalkanäle, anzutreffen (DAMMASCHKE et al. 2004). Des Weiteren sind Ausbuchtungen, Isthmen, multiple Foramina oder apikale Ramifikationen (apikales Delta) allgegenwärtig. Die Wurzelkanäle eines Zahnes variieren stark in ihrer Form und Anzahl. Der Hauptkanal verjüngt sich zur Wurzelspitze hin und weist etwa 1,0 mm koronal des anatomischen Apex die engste Stelle auf, die als apikale Konstriktion (physiologisches Foramen) bezeichnet wird (VANDE VOORDE und BJORNDAHL 1969; DUMMER et al. 1984). In der Regel

befindet sich die apikale Konstriktion am Übergang des Wurzelzements in das Wurzelzement. Diese weist in 90 % - 95 % einen Durchmesser von etwa 0,15 - 0,25 mm auf und stellt die Verbindung des Pulpagewebes in das pulpoparodontale Mischgewebe dar. Mit zunehmendem Alter kommt es aufgrund der Produktion von Sekundär- und Tertiärdentin zur Verengung der apikalen Konstriktion (HÜLSMANN 2008). Zudem vergrößert sich der Abstand vom physiologischen Foramen zum anatomischen Apex infolge der apikalen Apposition von Wurzelzement (HÜLSMANN et al. 2007).

Wurzelkanäle zeigen selten einen runden Querschnitt auf. Häufig ist dieser oval, wobei mit einem größeren Durchmesser in vestibulo-oraler als in mesio-distaler Richtung zu rechnen ist (CARROTTE 2004).

### 1.1.1 Wurzelkanalkrümmung

Studien zeigen, dass fast alle Wurzelkanäle Krümmungen aufweisen (PINEDA und KUTTLER 1972; SCHÄFER et al. 2002a). Am häufigsten sind die Krümmungen mit 85 % im apikalen Drittel lokalisiert (PINEDA und KUTTLER 1972; WEINE et al. 1976). Zur Berechnung des Krümmungswinkels sind in der Literatur unterschiedliche Verfahren beschrieben worden. Nach der Methode von Schneider et al. erfolgte die Messung des Krümmungswinkels zwischen einer Geraden, die durch die Längsachse des Wurzelkanals verläuft und einer zweiten Geraden, die durch das Foramen apikale und dem Schnittpunkt, an dem der Wurzelkanal die Längsachse des Zahnes verlässt, gebildet wird (SCHNEIDER 1971), (Abbildung 1).



Abbildung 1: Schematische Darstellung zur Bestimmung des Krümmungswinkels nach Schneider (1971)

Eine Modifizierung dieser Methode durch Cunningham und Senia oder Kartal und Cimilli machte die Beschreibung des Kanalverlaufs mehrfach gekrümmter Kanäle möglich (CUNNINGHAM und SENIA 1992; KARTAL und CIMILLI 1997). Pruett et al. erfasste neben der Winkelmessung zusätzlich den Radius der Krümmung, der beschreibt, in welchem Ausmaß sich die Wurzelkanalkrümmung vom geraden Kanalverlauf ändert (PRUETT et al. 1997). Wurzelkanäle, die den gleichen Krümmungswinkel aufweisen, können sich demzufolge im Wurzelkanalradius stark unterscheiden. Je geringer der Krümmungsradius des Wurzelkanals, desto stärker weicht die Wurzelkanalkrümmung vom geraden Kanalverlauf ab (Abbildung 2).

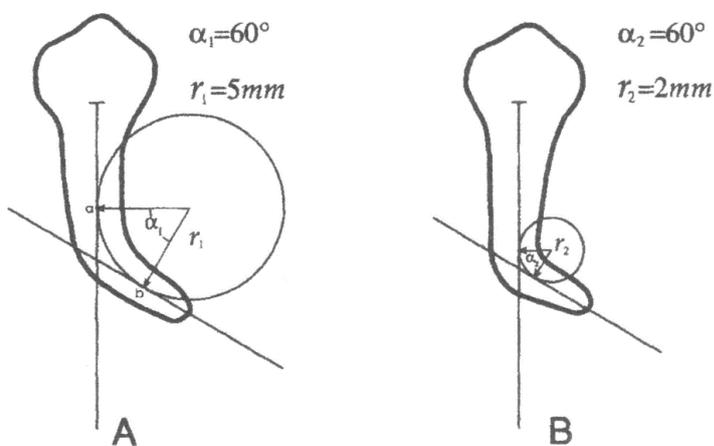


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bedeutung des Krümmungsradius nach Pruett et al. (1997). Die Kanalgeometrie der beiden Wurzelkanäle unterscheidet sich nur im Krümmungsradius ( $r_1 = 5 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 2 \text{ mm}$ ), während der Krümmungswinkel bei beiden Wurzelkanälen gleich ist ( $\alpha_1$  und  $\alpha_2 = 60^\circ$ ).

## 1.2 Ziele der Wurzelkanalaufbereitung

Folgende Kriterien müssen bei der Wurzelkanalaufbereitung umgesetzt werden (STELLUNGNAHME DGZ/DGZMK 2005; HÜLSMANN et al. 2007):

- Vollständige Entfernung des vitalen und des nekrotischen Pulpagewebes.
- Weitestgehende Eliminierung der Mikroorganismen sowie Neutralisierung der Bakterientoxine. Entfernung des infizierten Wurzelkanalwanddentins.
- Beibehaltung des originären Wurzelkanalverlaufs, d.h. der aufbereitete Wurzelkanal sollte den ursprünglichen Verlauf umschließen.
- Der aufbereitete Wurzelkanal sollte von apikal nach koronal konisch gestaltet sein, wobei die engste Stelle am apikalen Endpunkt des Wurzelkanals liegen sollte, ohne dabei durch einen übermäßigen Materialabtrag die Wurzel unnötig zu schwächen.
- Die apikale Konstriktion des Wurzelkanals sollte erhalten bleiben.
- Vermeidung von Instrumentenfraktur, apikalen Blockaden, Perforationen, Veränderung der endodontischen Arbeitslänge (Über- und Unterinstrumentierung), apikales Überpressen von infiziertem Material oder Spülflüssigkeiten.

## 1.3 Aufbereitungsfehler bei gekrümmtem Kanalverlauf

### **Elbow, Zip, Ledge, Transportation, Perforation**

Bei der Präparation von gekrümmten Kanälen kommt es häufig bei der Anwendung von Edelstahlfeilen zu Aufbereitungsfehlern (WEINE et al. 1975), (Abbildung 3). Edelstahlfeilen weisen eine relativ hohe Steifigkeit auf, die mit ansteigender Instrumentengröße zunimmt. Die Steifigkeit eines Instruments kann zu Begradigungen und Abweichungen des Kanalverlaufs (Transportationen) führen, wobei Abschnitte des Kanals unbearbeitet bleiben (PETERS et al. 2003; CALBERSON et al. 2004). Zudem zählen Stufenbildungen (Ledge), meist mit Verlust der Arbeitslänge und Perforationen, zu den häufigsten Aufbereitungsfehlern bei gekrümmten Wurzelkanälen. Bei den Perforationen unterscheidet man die laterale Perforation (Strip Perforation), die durch eine Überinstrumentierung oder Begradigung an der Innenseite des mittleren Kanalanteils stark gekrümmter Kanäle auftritt, von der apikalen Perforation, die bevorzugt an der Außenseite der Krümmung, durch forciertes Arbeiten mit den Aufbereitungsinstrumenten, entsteht. Durch die Anwendung vorgebogener Edelmetallinstrumente beziehungsweise die Anwendung flexibler Feilen, wie zum

Beispiel Nickel-Titan-Feilen, können Aufbereitungsfehler verhindert oder zumindest reduziert werden (PETTIETTE et al. 1999).

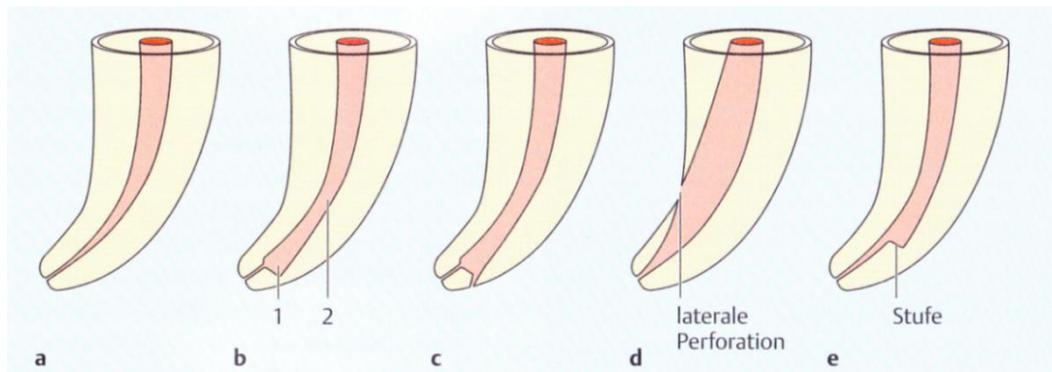


Abbildung 3: Aufbereitungsfehler bei der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle: a) korrekte Präparation, b) Zip (1) und Elbow (2), c) apikale Perforation, d) laterale Perforation, e) Stufe (Hülsmann M., Checklisten der Zahnmedizin Endodontie, 2008)

#### 1.4 Die manuelle Wurzelkanalaufbereitung

Für die Handaufbereitung wurden bis zum Jahr 1960 Instrumente aus Karbonstahl verwendet, die im Anschluss durch einen rostfreien Edelstahl (säurebeständigen Chrom-Nickel-Edelstahl) ersetzt wurden. Seit 1998 kommen zudem auch Nickel-Aluminium- und Nickel-Titan-Instrumente zur manuellen Wurzelkanalpräparation zum Einsatz.

Ein Handinstrument besteht aus Griff, Schaft und Arbeitsteil. Das schneidende Arbeitsteil umfasst immer eine Länge von 16 mm (Abbildung 4). Am Griff der Feilen befinden sich die ISO-Symbole für den Instrumententyp: Reamer (Dreieck), K-Feile (Rechteck), Hedstroem-Feile (Kreis). Zudem ist der Griff entsprechend seiner Größe farbig markiert und mit der Größennummer versehen. Die Instrumentenlänge (21, 25, 28 und 31 mm) wird durch die Länge des Schaftes, der eine Variabilität zwischen 5 und 15 mm aufweisen kann, bestimmt.

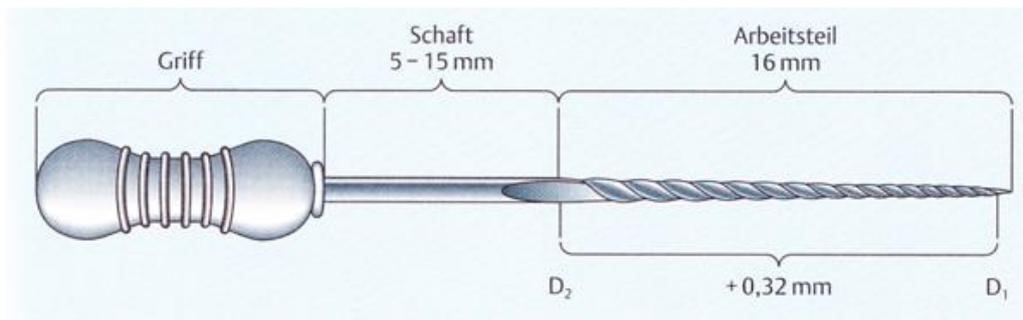


Abbildung 4: Maße bei ISO-Instrumenten.  $D_1$  = Durchmesser des Kegels des Arbeitsteils, dieser wird als ISO-Stärke in 1/100 mm angegeben.  $D_2$  = Durchmesser am Ende des Arbeitsteils.  $D_2 = D_1 + 0,32 \text{ mm}$ , bei einer Konizität von 2%. (Hülsmann M., Checklisten der Zahnmedizin Endodontie, 2008)

Zur Aufbereitung vor allem gekrümmter Kanäle fanden verschiedene Modifikationen im Instrumentendesign statt. Die Veränderungen des Instrumentenquerschnittes (dreieckig oder rhomboedrisch) und die daraus resultierende Abnahme des Kerndurchmessers führte zu einer Steigerung der Flexibilität der Instrumente. Als Produkte sind hier die Flexicut-Feilen (VDW GmbH, München, Deutschland), Flexoreamer, K-Flexofeilen (Maillefer, Ballaigues, Schweiz) und die K-Flex-Feile (Kerr, Romulus, Michigan) zu erwähnen. Zudem bieten Wurzelkanalinstrumente mit einer Battspitze, einer nicht schneidenden Instrumentenspitze, beachtliche Vorteile. Durch ein selbstzentrierendes Arbeitsverhalten der Spitze können Begradigungen gekrümmter Kanäle und das Perforationsrisiko minimiert werden (z.B. Flexoreamer, K-Flexofilen).

Neue Materialien wie zum Beispiel die Nickel-Titan-Legierung, deren Elastizitätsmodul lediglich ein Fünftel des Chrom-Nickel-Stahles beträgt, besitzen eine bedeutend höhere Flexibilität bei höherer Torsionsfestigkeit (WALIA et al. 1988).

## 1.5 Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung

Die maschinelle Aufbereitung ist besonders bei der Präparation gekrümmter Kanäle hinsichtlich der Formgebung sowie der Arbeitszeit der konventionellen manuellen Aufbereitung überlegen. Aus diesem Grund wurden zahlreiche maschinell angetriebene Geräte entwickelt, die die Wurzelkanalaufbereitung erleichtern und die dafür benötigte Zeit deutlich verkürzen sollen.

### 1.5.1 Entwicklung

1899 entwickelte William H. Rollins einen aus Uhrfedern oder feinen Klaviersaiten gefertigten Wurzelkanalbohrer, der über einen Mikromotor angetrieben wurde. Rollins ließ die gefertigten Instrumente mit Hilfe des maschinell angetriebenen Winkelstücks bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von lediglich 100 U/min im Wurzelkanal rotieren, um eine Fraktur der grazen Instrumente zu vermeiden (HÜLSMANN 2008). Die eigentliche Ära der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung begann Ende der 50er Jahre mit der Entwicklung des ersten maschinell angetriebenen Winkelstücks, dem sogenannten Racer-System (Cardex) von Binder, welches über eine starre Hubbewegung mit einer Amplitude von 1 mm verfügte (BINDER 1958). Eine neuere Version des Racer-Winkelstücks führte Auf- und Abbewegungen mit einer Amplitude von 2 mm durch. Bei dem im Jahr 1964 von Dr. Riitano entwickelten Giromatic-System (Micro Mega, Besancon, Frankreich) fand eine reziproke Rotationsbewegung von 90° statt. Der später eingeführte Endolift der Firma Kerr (Karlsruhe, Deutschland) kombinierte erstmals die Hubbewegung mit einer Rotationsbewegung (90°). Mit dem im Jahr 1984 durch den Franzosen Levy entwickelten Canal-Finder-System (SET, Marseille, Frankreich) wurde erstmals ein maschinelles Aufbereitungssystem entwickelt, welches über ein nicht vollständig starres Bewegungsmuster verfügte. Die primäre Bewegungsrichtung ist eine Hubbewegung mit einer variablen Amplitude von 0,3 – 1 mm, erst durch den Kontakt mit der Kanalwand kommt es zu einer Rotationsbewegung des Instruments. Weitere Vertreter dieser Gruppe sind in der folgenden Tabelle dargestellt (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Maschinelle Aufbereitungssysteme mit flexiblem Bewegungsablauf**

	<b>Hersteller</b>	<b>Bewegungsablauf</b>
Excalibur	W&H	Aleatorische (seitliche) Schwingungen (ca. 2.000 Hertz, 1,4 – 2 mm Amplitude)
Endoplaner	Microna	Schabbewegung auf Zug + freie Rotation
Canal-Finder-System	SET	Hubbewegung (0,3 mm – 1,0 mm) + freie Rotation bei Friktion
Canal-Leader 2000	S.E.T.	Hubbewegung (0,4 - 0,8 mm) + Rotation (20 - 30°)
Intra-Endo 3-LDSY	KaVo	Hubbewegung + freie Rotation bei axialer Belastung
IMD 9GX	HiTech	360°-Rotation mit variabler, torque-abhängiger Umdrehungszahl
EndoFlash	KaVo	Drehmomentbegrenzte Rotation

Ein revolutionärer Durchbruch in der Wurzelkanalaufbereitung gelang Walia et al. im Jahr 1988 durch die Einführung der Nickel-Titan-Instrumente, die bis zur heutigen Zeit in der Endodontie zunehmend an Bedeutung gewonnen haben und mittlerweile ein unverzichtbarer Bestandteil geworden sind (WALIA et al. 1988). Mit Hilfe der vollrotierenden, maschinell angetriebenen Aufbereitungsinstrumente aus Nickel-Titan wurde das Aufbereiten englumiger, stark gekrümmter Kanäle unter Beibehaltung des ursprünglichen Kanalverlaufes bei signifikanter Zeitersparnis ermöglicht (BRYANT et al. 1999). Die zuerst eingeführten rotierenden Nickel-Titan-Systeme (LightSpeed®, ProFile®, GT-Feilen) waren mit nicht geschliffenen Schneidekanten, sogenannten „radial lands“, ausgestattet. Zudem wiesen diese einen neutralen Schneidekantenwinkel auf, der eine optimale Ausrichtung der Instrumente im Wurzelkanal ermöglicht und damit eine Verlagerung des Kanals vermindern sollte. Modernere Nickel-Titan-Systeme (z.B. FlexMaster®, Hero642®, ProTaper®, RaCe-Systeme®) verfügen in der Regel über einen konvexen Dreikant-Querschnitt, der einen effektiveren Abtrag des Wurzelkanaldentins ermöglicht. Derzeit verfügbare Nickel-Titan-Systeme (z.B. Reciproc®, F360®, F6 SkyTaper®, One Shape®) zeigen verschiedenste Modifizierungen auf. Zu den Modifizierungen zählen das Material

(M-Wire®), der Querschnitt (z. B. S-förmig), der Abstand zwischen den Schneiden oder die Konizität (= Taper) der Wurzelkanalfeile, die die Zunahme des Instrumentendurchmessers pro Millimeter Arbeitslänge von der Spitze definiert. Um das Frakturrisiko der Nickel-Titan-Instrumente zu vermeiden, ist bei der Verwendung vollrotierender Systeme prinzipiell darauf zu achten, dass die instrumentenspezifischen Drehzahlen eingehalten werden. Zudem sollten nur Antriebsmotoren mit Drehmomentbegrenzung verwendet werden. Seit mehreren Jahren stehen verschiedene Antriebsmotoren speziell zur Anwendung von vollrotierenden- bzw. reziprok betriebenen Nickel-Titan-Instrumenten zur Verfügung (z.B. VDW.SILVER® RECIPROC® - Endomotor), auf denen bereits in einer Feilendatenbank die Drehzahlen und Drehmomentwerte (Torque) der gängigsten Nickel-Titan-Systeme programmiert sind.

### **1.5.2 Eigenschaften der Nickel-Titan-Instrumente**

Anfang der 60er Jahre wurde im Naval Ordnance Laboratory der US-Armee (Silver Spring, Maryland/USA) von W.F. Buehler die Nickel-Titan-Legierung entwickelt. Bis zu den 80er Jahren wurden die Nickel-Titan-Legierungen als Nitinol, ein Akronym für Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory, bezeichnet. In der Zahnmedizin fand die Nickel-Titan-Legierung erstmals im Jahr 1971 in der Kieferorthopädie in Form von Drahtbögen Verwendung (ANDREASEN und MORROW 1978). Walia et al. stellten im Jahr 1988 die ersten Wurzelkanalaufbereitungsinstrumente aus Nickel-Titan vor (WALIA et al. 1988).

Die Legierung der heute auf dem Markt vertriebenen Nickel-Titan-Instrumente besteht aus etwa 55 m% Nickel sowie 45 m% Titan. Im Vergleich zu den alltäglich verwendeten Edelstahlinstrumenten weisen die Nickel-Titan-Aufbereitungsinstrumente ein weitaus geringeres Elastizitätsmodul auf. Es beträgt lediglich ein Fünftel des entsprechenden Wertes der Chrom-Nickel-Stahl-Legierung (WALIA et al. 1988). Dadurch lässt sich das pseudoelastische Verhalten der Instrumente erklären: aufgrund ihrer inneren Spannung kehren die Instrumente nach Abschluss der Belastung in ihre Ausgangsform zurück. Diese Eigenschaft wird auch als Formgedächtnis (Shape-Memory-Effekt) bezeichnet (LEE et al. 1988; THOMPSON 2000). Wird jedoch das Elastizitätsmaximum überschritten, so kann es zum Bruch des Instruments kommen. Zudem führt der häufige Gebrauch der Instrumente zu Veränderungen der Materialeigenschaften, wodurch die Elastizität proportional mit der

Häufigkeit der Anwendung abnimmt und schließlich einen Ermüdungsbruch nach sich ziehen kann (RAPISARDA et al. 2000). Aufbereitungsfeilen aus einer Nickel-Titan-Legierung verfügen über ein deutlich geringeres Biegemoment im Vergleich mit Edelmetallinstrumenten, wodurch die Flexibilität von Nickel-Titan-Instrumenten beachtlich gesteigert wird. In der Studie von Walia et al. konnte gezeigt werden, dass Nickel-Titan-Instrumente im Vergleich zu den Edelmetallinstrumenten eine dreifach höhere Flexibilität besaßen (WALIA et al. 1988). Die flexiblen Instrumente eignen sich daher besonders für die Aufbereitung gekrümmter Kanäle und führen zu weniger Aufbereitungsfehlern (WALIA et al. 1988; ESPOSITO und CUNNINGHAM 1995; ZMENER und BALBACHAN 1995).

Die Herstellung der Nickel-Titan-Instrumente erfolgt, im Gegensatz zu den verdrehten Edelmetallfeilen (z.B. Kerr-Feilen, Reamer), durch Fräsung der Rohlinge, da es aufgrund der Pseudoelastizität von Nickel-Titan-Legierungen zur Instrumentenfraktur kommen würde (WALIA et al. 1988; SCHÄFER 1997). Demzufolge führt ein starkes Verdrehen des Instruments, als Folge des Verklemmens der Instrumentenspitze im Wurzelkanal, zu einem Bruch des Instruments, dem sogenannten Torsionsbruch. Durch den Fräsvorgang entstehen grundsätzlich kleine Oberflächendefekte, die zu einer geringeren Schneidleistung der Nickel-Titan-Feilen an den Schneidekanten führen können (THOMPSON 2000; ALAPATI et al. 2003). Zunehmend findet eine Modifizierung der Nickel-Titan-Legierungen statt, was zur Verbesserung der Materialeigenschaften führt. Neuartige Feilen werden aus M-Wire®-Nickel-Titan mit einem reduzierten Nickelanteil (50,8 m%) und einem speziellen thermischen Behandlungsprozess gefertigt. Diese zeigen ein deutlich verbessertes zyklisches Ermüdungsverhalten sowie eine höhere Flexibilität gegenüber den handelsüblichen Nickel-Titan-Legierungen (PEREIRA et al. 2013). Die überlegene Ermüdungsfestigkeit ist sehr wahrscheinlich auf die einzigartige nanokristalline martensitische Mikrostruktur der Legierung zurückzuführen (YE und GAO 2012). Eine der neuesten Entwicklungen in der Endodontie stellen die seit 2011 im Handel erhältlichen Controlled-Memory Nickel-Titan-Instrumente dar (z.B. HyFlex®CM™). Prozentual weisen die durch ein spezielles Produktionsverfahren hergestellten Feilen einen geringeren Nickelanteil (52 m%) als die Mehrzahl der herkömmlichen Nickel-Titan-Instrumente mit einem Nickelgehalt von 54 bis 55 m% auf (ZINELIS et al. 2010). Im Gegensatz zu den handelsüblichen Nickel-Titan-Feilen weisen die Controlled-Memory

Nickel-Titan-Instrumente bei Raumtemperatur ein martensitisches Verhalten auf, was ein Vorbiegen der Feilen ähnlich wie bei Edelstahlfeilen erlaubt. Durch Wärmebehandlung beim Autoklavieren oder im Glasperlensterilisator nimmt das Instrument die Ursprungsform wieder an, sodass eine Mehrfachverwendung der Feile ermöglicht wird (COLTÈNE PRODUKT Broschüre 2013). Pongione et al. fanden heraus, dass die Controlled-Memory drahtbasierten Instrumente (HyFlex<sup>®</sup>CM<sup>™</sup>) deutlich flexibler und widerstandsfähiger gegen zyklische Ermüdung als die handelsüblichen Nickel-Titan-Legierungen (EndoSequence<sup>®</sup>, Brasseler, USA) oder M-Wire<sup>®</sup>-Nickel-Titan-Instrumente (ProFile<sup>®</sup> Vortex<sup>™</sup>, Dentsply, USA) waren (PONGIONE et al. 2012).

## **1.6 Herstellungsverfahren von Kunststoffblöcken**

### **1.6.1 3D-Druck-Verfahren (3D-Printing-Verfahren)**

Charles Hull entwickelte 1984 den weltweit ersten 3D-Drucker und legte damit den Grundstein für eine neue Fertigungstechnologie. Bereits zwei Jahre später entdeckte er eine Technik namens Stereolithographie, die das Erstellen eines 3D-gedruckten Objekts ermöglichte. Mit seiner Erfindung hatte er die schnelle Fertigung von kleinen Teilen aus Kunststoff im Sinn, wie sie in diversen Industriezweigen als Prototypen für die unterschiedlichsten Bauteile gebraucht werden. Die 3D-Druck-Technologie wird in der heutigen Zeit in vielzähligen Bereichen wie zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Architektur, Modellbau, Maschinenbau, Bildungswesen, Medizin und Zahnmedizin eingesetzt.

Die für diese Untersuchung gedruckten transparenten Kunststoffblöcke (mit eingelassenen artifiziellen Wurzelkanälen) wurden mittels dem Polygrafie-Verfahren, einem additiven 3D-Druckvorgang, hergestellt. Hierzu diente der erstmals 2012 vorgestellte Präzisions-Drucker Objekt30 Pro der Firma Stratasys (Eden Prairie, USA). Bei diesem Verfahren wird ein flüssiges Photopolymer (Kunstharz) Schicht für Schicht (Dicke 16 µm) aufgebracht, wobei jede einzelne Schicht mithilfe eines UV-Lichts ausgehärtet wird. Mithilfe des 3D-Druck-Verfahrens ist es erstmals möglich Kunststoffblöcke mit gedrucktem Wurzelkanal mit einer Genauigkeit von ~ 100 µm zu produzieren. Ein weiterer Vorteil ist die Produktion von Kunststoffblöcken mit frei konfigurierbaren Kanälen in großen Mengen und mit geringem Zeitaufwand. Bei den geläufigen Kunststoffblöcken z.B. der Firma VDW GmbH oder Dentsply Maillefer

kommt es während des Herstellungsprozesses häufig zu deutlichen Abweichungen innerhalb einer Kanalkonfiguration (Abbildung 5). Die Herstellung normierter Kanalkonfigurationen ist mittels der ursprünglichen Herstellungsverfahren also nicht gewährleistet.



Abbildung 5: Darstellung der auftretenden Abweichungen innerhalb einer Kanalkonfiguration bei der Fertigung der Kunststoffblöcke mittels herkömmlicher Herstellungsverfahren

Die Produktion identischer und somit normierter Blöcke mittels dem 3D-Druckverfahren gewährleistet eine optimale Voraussetzung für Vergleichsstudien und könnte somit zukünftig als ein Standard-Test-Verfahren für Nickel-Titan-Aufbereitungssysteme dienen. Zudem wird es erstmals durch die Bestimmung verschiedenster Kanalkonfigurationen möglich, unter standardisierten Bedingungen Grenzbereiche des Einsatzes von Nickel-Titan-Feilen zu bestimmen.

## 1.7 Fragestellung

Die Endodontie hat in den letzten Jahrzehnten weltweit eine bedeutende Weiterentwicklung (Nickel-Titan-Instrumente, Einführung des Mikroskops) erfahren, mit dem Ziel, die Behandlungsergebnisse zu verbessern (KIEFNER 2012). Maschinelle Aufbereitungssysteme kommen in den Zahnarztpraxen immer mehr zum Einsatz (ALKHAYER 2006; TRUCKENMÜLLER 2015), da diese die Aufbereitung insbesondere von gekrümmten Kanälen erleichtern sollen (SONNTAG et al. 2003; GUELZOW et al. 2005). Die ursprünglichen Kanalformen können erhalten und dadurch die Erfolgsprognose in einem antimikrobiell ausgerichteten Behandlungskonzept verbessert werden (STELLUNGNAHME DGZ/DGZMK 2005). Seit einigen Jahren ist eine Zunahme der maschinellen Ein-(Zwei)-Feilen-Aufbereitungssysteme (Reciproc®, Wave One®, One Shape®, F360®) auf dem Markt zu erkennen, die die Wurzelkanalaufbereitung mit nur einer beziehungsweise zwei Feilen ermöglicht. Diese

Form der Aufbereitung soll die Erhaltung der ursprünglichen Kanalform bei einer signifikant verkürzten Aufbereitungszeit gewähren (GOLDBERG et al. 2012; BÜRKLEIN et al. 2013).

Die vorgelegte Arbeit vergleicht in einer in-vitro-Untersuchung zwei maschinelle Ein-(Zwei)-Feilen-Aufbereitungssysteme (Reciproc<sup>®</sup>, F6 SkyTaper<sup>®</sup>), bei denen es sich um ein vollrotierendes und ein reziprok arbeitendes System handelt.

Die Zielsetzung dieser Arbeit soll die Untersuchung des Abtragverhaltens der beiden maschinellen Aufbereitungssysteme (Reciproc<sup>®</sup>, F6 SkyTaper<sup>®</sup>) mithilfe einer computergestützten Auswertung sein. Durch die genormten Blöcke, die unter Verwendung eines 3D-Printing-Verfahrens hergestellt wurden, ist es erstmals möglich, die Systeme auch bei extrem stark gekrümmten Kanälen zu testen. Die gewonnenen Ergebnisse sollen darüber hinaus dazu dienen, ein zukünftiges Standard-Test-Verfahren für Nickel-Titan-Feilensysteme zu entwickeln.

## **2 Material und Methoden**

Die Untersuchung fand an 540 Kunststoffblöcken (Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) mit simulierten gekrümmten Kanälen in der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie des Universitätsklinikums Schleswig-Holstein statt. Die Aufbereitung erfolgte durch die Doktorandin selbst, die als berufstätige Zahnärztin theoretische und praktische Erfahrungen sowohl in der Handaufbereitung (Crown-Down-Technik, Step-Back-Technik) als auch in der maschinellen Aufbereitung mit vollrotierenden beziehungsweise reziprok arbeitenden Nickel-Titan-Aufbereitungssystemen aufwies.

### **2.1 In der Studie verwendete Feilensysteme**

#### **2.1.1 Reciproc-System**

Das in dieser Studie verwendete Feilensystem Reciproc, welches im Jahr 2011 auf dem dentalen Markt erschienen ist, wurde von Dr. Ghassan Yared in Zusammenarbeit mit der Firma VDW (VDW GmbH, München, Deutschland) entwickelt. Bei dem reziprok arbeitenden Aufbereitungssystem handelt es sich um ein „One-File-System“, welches die Aufbereitung des Wurzelkanals mit nur einer Feile ermöglicht. In Anlehnung an die im Jahr 1985 von Roane et al. vorgestellte „Balanced-force-Technik“, die auf Bewegungen im beziehungsweise gegen den Uhrzeigersinn basiert, beschrieb Yared im Jahre 2008 erstmals die reziproke Bewegung bei der maschinellen Aufbereitung von Wurzelkanälen (ROANE et al. 1985). Für die Aufbereitung kommen spezielle Motoren zum Einsatz, die in der Lage sind reziproke Bewegungen mit speziellen Drehwinkeln durchzuführen. Bei der reziproken Aufbereitung rotiert die Feile zunächst in Schneiderichtung und wird anschließend durch Umkehr der Drehrichtung wieder freigegeben, um ein Verklemmen des Instruments im Wurzelkanal zu verhindern. Mithilfe der im Motor gespeicherten Drehwinkel, welche deutlich kleiner sind als die Winkel, bei denen das Instrument bei einem Verklemmen im Wurzelkanal brechen würde, soll nach Herstellerangaben das Frakturrisiko der Feilen reduziert werden. Eine komplette Umdrehung von 360° setzt sich aus mehreren reziproken Bewegungen zusammen. Um ein kontinuierliches Vordringen der Reciproc-Feile nach apikal zu gewährleisten, ist der Drehwinkel in Schneiderichtung größer als in die Gegenrichtung.

Reciproc-Feilen (VDW GmbH, München, Deutschland) bestehen aus M-Wire-Nickel-Titan und sind für den Einmalgebrauch (Single-Use-Produkt) konzipiert. Durch die Einmalanwendung der Feilen wird die Gefahr der Kreuzkontamination vermieden. Abrupt auftretende Krümmungen im apikalen Bereich stellen eine Kontraindikation in der Anwendung von Reciproc-Feilen dar.

### 2.1.1.1 Feilendesign

Das Feilensystem Reciproc besteht aus drei verschiedenen Instrumenten unterschiedlicher Größe (R25, R40, R50), (Abbildung 6). Die Größe des Instruments richtet sich nach dem Durchmesser des Wurzelkanals. Die R25, die an der Instrumentenspitze einen Durchmesser von 0,25 mm und eine Konizität von 8 % (auch Taper .08) aufweist, stellt die Indikation für enge, im Röntgenbild nicht oder nur unvollständig sichtbare Kanäle dar. Erreicht eine Handfeile der ISO-Größe 020 passiv die Arbeitslänge und das Röntgenbild zeigt den kompletten Verlauf des Kanals, so wird nach Herstellerangaben die Anwendung der R40 nahe gelegt. Diese Aufbereitungsfeile weist an der Instrumentenspitze einen Durchmesser von 0,40 mm und einen Taper von .06 auf. Für weite Wurzelkanäle, bei denen sich eine Handfeile mit der ISO-Größe 030 passiv auf Arbeitslänge einbringen lässt, wird die Anwendung der R50-Feile empfohlen. Diese Feile verfügt über einen Durchmesser von 0,50 mm an der Instrumentenspitze und eine Konizität von 5 %. Alle Reciproc-Instrumente weisen innerhalb der ersten drei Millimeter ab Instrumentenspitze die angegebene Konizität auf, danach verläuft die Konizität regressiv. Das bedeutet, dass sich die Konizität im weiteren Verlauf des Arbeitsschrittes in Richtung Schaft verringert.



Abbildung 6: Darstellung der Reciproc-Feilen 25/08, 40/06, 50/05 (von oben nach unten)

Der Abstand zwischen den Schneiden hingegen ist progressiv. Diese Anordnung soll den Abtransport des Debris sowie die Effizienz der Schneidleistung erhöhen. Die Reciproc-Feilen sind in den unterschiedlichen Arbeitslängen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich und weisen eine nicht schneidende Instrumentenspitze auf (Abbildung 7a). Der Querschnitt des Instruments ist gekennzeichnet durch eine S-Form und besitzt zwei aktive Schneiden (Abbildung 7b).

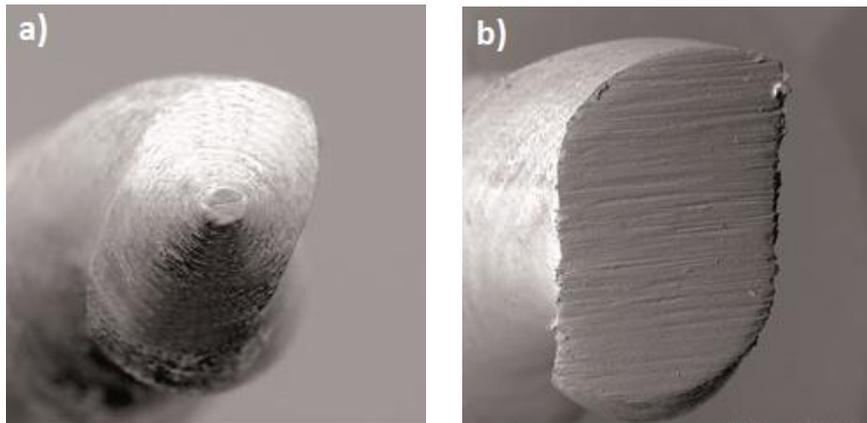


Abbildung 7: Quelle: Broschüre Reciproc (2013), VDW; REM-Aufnahmen von Dr. David Sonntag, Universität Düsseldorf a) nicht schneidende Instrumentenspitze b) S-förmiger Querschnitt

### 2.1.1.2 Anwendung

Die Wurzelkanalaufbereitung mit Reciproc eröffnet in den meisten Fällen die Möglichkeit, auf eine initiale Erweiterung des Wurzelkanals bis zur ISO-Größe 015 (Gleitpfad) zu verzichten. Durch die Bewegung des Instruments im und gegen den Uhrzeigersinn kann ein Verkleben der Aufbereitungsfeile verhindert werden. Ausnahmen bieten Wurzelkanäle, die bei der Bestimmung der Arbeitslänge ein Vorbiegen des Handinstruments (C-PILOT® Feile, VDW GmbH, München, Deutschland) mit der ISO-Größe 010 erfordern, um die volle Arbeitslänge zu erreichen. In diesen Fällen muss ein Gleitpfad bis zu einer ISO-Größe 015 hergestellt werden. Bei der Wurzelkanalaufbereitung ohne Gleitpfad empfiehlt der Hersteller die Auswahl der geeigneten Feile anhand des Ausgangsröntgenbildes (Diagnostisches Röntgenbild) zu wählen. Anhand dieses Röntgenbildes wird die erste Längenmessung des Wurzelkanals durchgeführt. Die Feile wird zunächst erst auf 2/3 der Arbeitslänge, die durch einen Silikon-Stopper gekennzeichnet wird, eingestellt. Ein geradliniger Zugang zum Wurzelkanal ist obligat. Das Instrument wird rotierend in den feuchten

Kanal eingeführt und langsam mit einem leicht nach apikal gerichteten Druck auf- und abbewegt, wobei die Amplitude der pickenden Bewegung 3 mm nicht übersteigen sollte. Eine Auf- und Abbewegung wird als ein Pick bezeichnet. Die Entfernung der Feile aus dem Kanal sollte nach drei Picks, beziehungsweise wenn das Instrument im Kanal nicht weiter vordringen kann, erfolgen. Im Anschluss wird der Kanal gespült und das Instrument gereinigt. Unter Verwendung einer Feile der ISO-Größe 010 wird im nächsten Schritt die Gängigkeit des Kanals überprüft. Dabei ist darauf zu achten, dass die Feile nur 3 mm über die bereits aufbereitete Länge in den Kanal eingebracht werden sollte. Ein Fortführen der Aufbereitung erfolgt bis 2/3 der Aufbereitungslänge erreicht sind. Anschließend wird die Arbeitslänge mittels der Feile ISO-Größe 010 endometrisch ermittelt und die Aufbereitung bis zum Erreichen der definitiven Arbeitslänge fortgeführt.

### 2.1.2 F6 SkyTaper

Das in der Studie untersuchte vollrotierende Ein-Feilen-System F6 SkyTaper (Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) ist seit 2014 im Handel. Die Aufbereitung gerader und gekrümmter Kanäle, die röntgenologisch vollständig sichtbar sind, stellt die Indikation für das F6 SkyTaper-System dar. Bei Wurzelkanälen mit starken, abrupt auftretenden Krümmungen im apikalen Bereich sowie starker Kalzifizierung des Wurzelkanals ist der Einsatz des Feilensystems kontraindiziert. Die Instrumente sind nur für den Einmalgebrauch (bei einem Patienten) vorgesehen, wobei bis zu drei Wurzelkanäle mit einer Feile behandelt werden können. Auch hier gilt, dass die Instrumente während der Behandlung inspiziert werden müssen und bei den ersten Anzeichen von Materialermüdung entsorgt werden sollten.

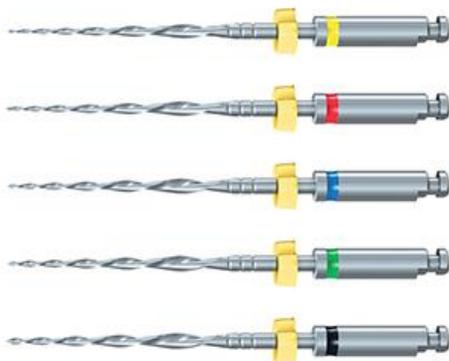


Abbildung 8: Darstellung der F6 SkyTaper-Feilen 20/06, 25/06, 30/06, 35/06, 40/06 (von oben nach unten)

### 2.1.2.1 Feilendesign

Das F6 SkyTaper-Feilensystem verfügt über fünf unterschiedliche Feilengrößen (ISO 020, ISO 025, ISO 030, ISO 035, ISO 040), die die Aufbereitung verschiedenster Kanaldurchmesser größtenteils mit nur einer Feile ermöglichen sollen (Abbildung 8). Alle Instrumente sind in den Arbeitslängen 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich und weisen eine über die gesamte Arbeitslänge hinweg kontinuierliche Konizität von 6 % auf. Die Feile ist gekennzeichnet durch einen Doppel-S-Querschnitt und weist zwei aktive Schneidekanten auf (Abbildung 9). Die Instrumente werden aus einer Nickel-Titan-Legierung hergestellt und sind durch eine nicht schneidende Instrumentenspitze gekennzeichnet. Zur Aufbereitung können alle drehmomentbegrenzten Antriebsmotoren mit den dazugehörigen Winkelstücken verwendet werden.

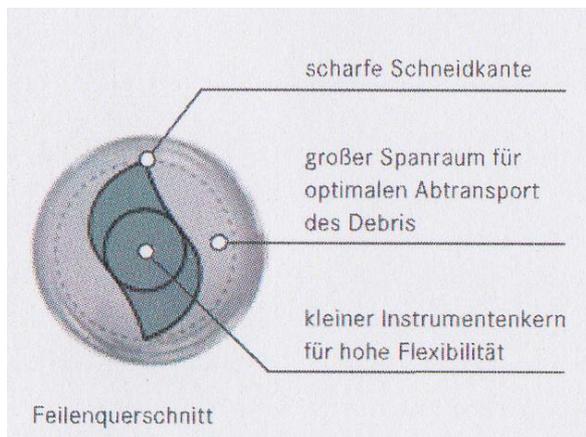


Abbildung 9: Quelle: Broschüre F6 SkyTaper (2015), Komet; Feilenquerschnitt

### 2.1.2.2 Anwendung

Vor dem Einsatz der F6 SkyTaper-Feile sollte nach Herstellerangaben mittels einer vorliegenden Röntgenaufnahme die Kanalmorphologie bestimmt werden. Sowohl die deutliche Darstellung des Kanaleingangs als auch die Herstellung eines Gleitpfads vor dem Gebrauch des vollrotierenden F6 SkyTaper-Instruments sind unerlässlich. Die Präparation erfolgt nach der Single-Length-Technik, das bedeutet, dass so lange mit der ausgewählten Aufbereitungsfeile gearbeitet wird, bis die volle Arbeitslänge erreicht ist. Das Drehmoment beträgt dabei 2,2 Ncm beziehungsweise 2,8 Ncm und die Drehzahl liegt zwischen  $300 \text{ Umin}^{-1}$  bis max.  $500 \text{ Umin}^{-1}$ . Welche der F6 SkyTaper-Feilen verwendet wird ist abhängig von der sondierten ISO-Größe des zu behandelnden Wurzelkanals (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Einsatz der entsprechenden F6 SkyTaper-Feile in Abhängigkeit von der zuvor sondierten Feilengröße**

<b>(Hand-) Feilengröße</b>	<b>F6 SkyTaper-Feile</b>
Sondierung mit ISO 010	ISO 020
Sondierung mit ISO 015	ISO 025
Sondierung mit ISO 020	ISO 030
Optional für weite Kanäle	ISO 035 und ISO 040

Das Instrument wird drehend in den feuchten Kanal eingeführt und auch hier mit kurzen Auf- und Abwärtsbewegungen (picking motion) im Kanal bewegt, wobei ein Zeitraum von 8 Sekunden nicht überschritten werden sollte. Die Aufbereitungsfeile wird zwischen den einzelnen Aufbereitungsintervallen gereinigt und der Wurzelkanal ausreichend und gründlich gespült, um das Debris zuverlässig zu entfernen.

## **2.2 Versuchsaufbau**

### **2.2.1 Herstellung der Untersuchungskörper**

Unter Verwendung eines 3D-Printing-Verfahrens (Objet30 Pro, Fa. Stratasys, Eden Prairie, USA) erfolgte durch die Firma Komet (Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) die Herstellung der 540 transparenten Kunststoffblöcke aus Acrylharz (VeroClear-RGD810, Fa. Stratasys, Eden Prairie, USA), in deren Mitte ein gekrümmter Wurzelkanal mit verschiedenen Kanalkonfigurationen eingelassen war. Das Besondere des 3D-Printing-Verfahrens besteht darin, dass sich Kopien der Kunststoffblöcke unterschiedlicher Kanalkonfigurationen und verschiedenster Wurzelkanalanatomien mit einer Genauigkeit von ~ 100 µm herstellen lassen. Die für diese Untersuchung artifiziell gedruckten Wurzelkanäle besaßen neun verschiedene Kanalkonfigurationen, die sich in der Wurzelkanalkrümmung und im Krümmungsradius sowie in der Lokalisation der Krümmung unterschieden (Abbildung 10). Nach der Methodik zur Berechnung der Wurzelkanalkrümmung nach Schneider wiesen die Wurzelkanäle Krümmungswinkel von 30°, 45° beziehungsweise 60° und Krümmungsradien nach Pruett von 2,0 mm, 5,0 mm und 8,0 mm auf (SCHNEIDER 1971; PRUETT et al. 1997). Die Länge des Wurzelkanals betrug in allen Blöcken

18 mm, der Durchmesser lag bei 0,15 mm (ISO 015). Jeder Block besaß zudem eine bis zu 4 mm tiefe konische Erweiterung am Kanaleingangsbereich.



Abbildung 10: Darstellung der neun verschiedenen Kanalkonfigurationen

### 2.2.2 Gruppeneinteilung

Die Aufteilung der 540 Kunststoffblöcke erfolgte in zwei Gruppen (Gruppe A und Gruppe B) mit je 270 Blöcken. Jede Gruppe enthielt jeweils dreißig Blöcke der neun verschiedenen Kanalkonfigurationen. In der Gruppe A wurde die Wurzelkanalaufbereitung mit dem Feilensystem Reciproc der Firma VDW (VDW GmbH, München, Deutschland) und in der Gruppe B mit dem F6 SkyTaper-Feilensystem der Firma Komet (Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) durchgeführt.

### 2.2.3 Vorbereitung der Untersuchungskörper

Da die Kunststoffblöcke auf der Oberfläche herstellungsbedingt eine raue Oberfläche aufwiesen, wurden sie zuvor auf einer Schleifmaschine (ATM Saphir 360 E Schleifmaschine, ATM GmbH, Mammelzen, Deutschland; Schleifpapier 400/800/1200/2400, Strüvers GmbH, Willich, Deutschland) bearbeitet, sodass nach der Bearbeitung eine glatte Oberfläche vorlag und somit eine bessere Darstellung des Kanalverlaufs auf den Fotos erreicht wurde. Im Anschluss wurden die Untersuchungsblöcke mit der Unterseite so auf einen flachen LEGO-Stein (LEGO, Billund, Dänemark; Fliese 2x2, grün) geklebt (LOCTITE 493; Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf, Deutschland), dass die Fläche des Kunststoffblocks, in dem sich das apikale Foramen befand, bündig mit dem LEGO-Stein abschloss. Mithilfe des LEGO-Steins konnte der Block jederzeit zur Fotodokumentation auf einer selbst entworfenen Konstruktion an einem dort angebrachten LEGO-Stein (LEGO, Billund,

Dänemark; Platte 2x6, grau) fixiert werden (Abbildung 11). Alle Blöcke wurden mit einer C-Pilot-Feile (VDW GmbH, München, Deutschland) der ISO-Größe 010 auf ihre Durchgängigkeit überprüft. Die 270 Blöcke der Gruppe A wurden mit dem Buchstaben „R“ für Reciproc und der Gruppe B mit dem Buchstaben „P“ für Prototyp gekennzeichnet, da zum Zeitpunkt der Untersuchung die Feile noch nicht auf dem Markt und der Name unbekannt war. Ebenso erhielten die Blöcke der beiden Gruppen eine Seriennummer von eins bis 270 aufsteigend. Unter Verwendung eines kleinen Rosenbohrers (Komet Dental Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) wurden der Buchstabe sowie die Seriennummer auf die Oberseite des LEGO-Steins eingraviert. In der folgenden Tabelle sind die Seriennummern der Kunststoffblöcke mit ihrer entsprechenden Kanalkonfiguration dargestellt (Tabelle 3).



Abbildung 11: Fixierungsvorrichtung mit Untersuchungsblock

**Tabelle 3: Zeigt die Seriennummern beider Gruppierungen der Blöcke mit dem dazugehörigen Krümmungswinkel/-radius**

<b>Seriennummer</b>	<b>Krümmungswinkel in °</b>	<b>Krümmungsradius in mm</b>
<b>1-30</b>	30	2
<b>31-60</b>	30	5
<b>61-90</b>	30	8
<b>91-120</b>	45	2
<b>121-150</b>	45	5
<b>151-180</b>	45	8
<b>181-210</b>	60	2
<b>211-240</b>	60	5
<b>241-270</b>	60	8

Zusätzlich wurden die Blöcke mit einem schmalen Kreuz auf der linken und rechten Seite des Kanaleingangs versehen, sodass mithilfe eines Computerprogramms die erhaltenen Aufnahmen vor, während und nach der Kanalaufbereitung übereinander projiziert werden konnten. Auch hierzu diente ein kleiner Rosenbohrer.

Vor der Aufbereitung wurden alle in der Studie verwendeten Blöcke (n = 540) in einer reproduzierbaren Position mit einer digitalen Spiegelreflexkamera (Canon EOS 400D, Tokio, Japan) fotografiert und die Bilder auf einem Laptop (Lenovo ThinkPad Edge E530c, China, USA, Singapur) abgespeichert.

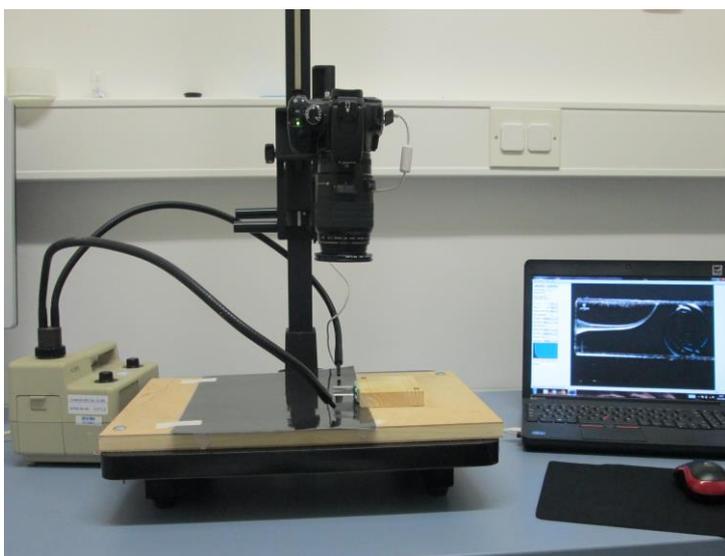
Im Anschluss wurden die Kunststoffblöcke mit einem medizinischen Klebeband (Leukoplast®; BSN medical GmbH, Hamburg, Deutschland) abgeklebt, sodass der Verlauf des Wurzelkanals nicht mehr zu erkennen war und damit der Wurzelkanalbehandlung am Patienten entsprach.

#### **2.2.4 Fotodokumentation der Untersuchungskörper**

Zur Fotodokumentation diente eine Spiegelreflexkamera (Canon EOS 400D, Tokio, Japan), die an einen Reproständer (Nikon Repro-Copy Outfit PF4, NIKON Corporation, Tokio, Japan) befestigt wurde (Abbildung 12). Unter Verwendung des Reproständers konnte ein konstanter Abstand zum Objekt garantiert werden. Für die Aufnahmen wurde ein 100 mm/ 1:2,8 USM Makro-Objektiv (Canon, Tokio, Japan)

gewählt. Bei der Einstellung der Kamera wurde auf eine hohe Bildauflösung sowie auf eine gute Bildqualität geachtet. Unter Verwendung des AV-Modus (Aperture-Value-Modus) wurde die Belichtungszeit mittels des festgelegten Blendenwerts (f/18) automatisch durch die Kamera angepasst. Auf einen Belichtungsausgleich wurde verzichtet. Des Weiteren wurde die Kamera auf Einfachauslösung, automatischen Weißabgleich und manuelle Fokussierung eingestellt. Die Lichtempfindlichkeit betrug ISO 400 (Abbildung 12).

Auf der Grundplatte des Reprostativs wurde eine Holzplatte geschraubt, auf der sich die selbst entworfene Lego-Stein-Fixierungsvorrichtung befand (Abbildung 11). Die Fixierungsvorrichtung gewährleistete eine reproduzierbare Ausrichtung der zu fotografierenden Kunststoffblöcke vor, während und nach der Aufbereitung. Um einen besseren Kontrast zu den weißen Wurzelkanälen zu erzielen, wurde ein schwarzer Hintergrund (Fotokarton FOLIA®, Max Bringmann KG, Wendelstein, Deutschland) gewählt. Als Lichtquelle diente eine LED-Kaltlichtlampe (KL 1500, SCHOTT AG, Mainz, Deutschland) mit einem zweiarmigen Lichtleiter. Die Kamera wurde über eine USB-Schnittstelle mit einem Laptop (Lenovo ThinkPad Edge E530c, China, USA, Singapur) verbunden. Mithilfe der Software DSLR Remote Pro 2.4 (Breeze Systems Limited, Camberley, United Kingdom) wurde die Fernsteuerung (um Verwackelungen zu vermeiden) der Spiegelreflexkamera sowie das direkte Abspeichern der Bilder auf den Laptop ermöglicht. Die Bilder wurden mit einer Nummer und einem Buchstaben entsprechend der Beschriftung des Blocks im JPEG-Format abgespeichert. Eine Zuordnung der Bilder für die Weiterverarbeitung wurde dadurch sichergestellt.



<b>Tv</b>	Auto
<b>Av</b>	18
<b>Mode</b>	Av
<b>ISO</b>	400
<b>Exposure compensation</b>	None
<b>Size/Quality</b>	Large/fine
<b>White balance</b>	Auto
<b>Metering Mode</b>	Partial
<b>Drive modus</b>	Single shot
<b>AF Mode</b>	Manual Focus
<b>Picture Style</b>	Standard

Abbildung 12: Versuchsaufbau mit Kameraeinstellungen

### 2.2.5 Instrumente und Geräte

Die Überprüfung der Gängigkeit des Kanals sowie die regelmäßige Kontrolle der Arbeitslänge nach jeder Instrumentenanwendung (Rekapitulation) erfolgte mittels C-Pilot-Feilen (VDW GmbH, München, Deutschland) der ISO-Größe 010. Diese wiesen eine Arbeitslänge von 25 mm und eine Konizität von 2 % auf (Abbildung 13).



Abbildung 13: C-Pilot-Feile (ISO 010) zur Überprüfung der Gängigkeit des Kanals

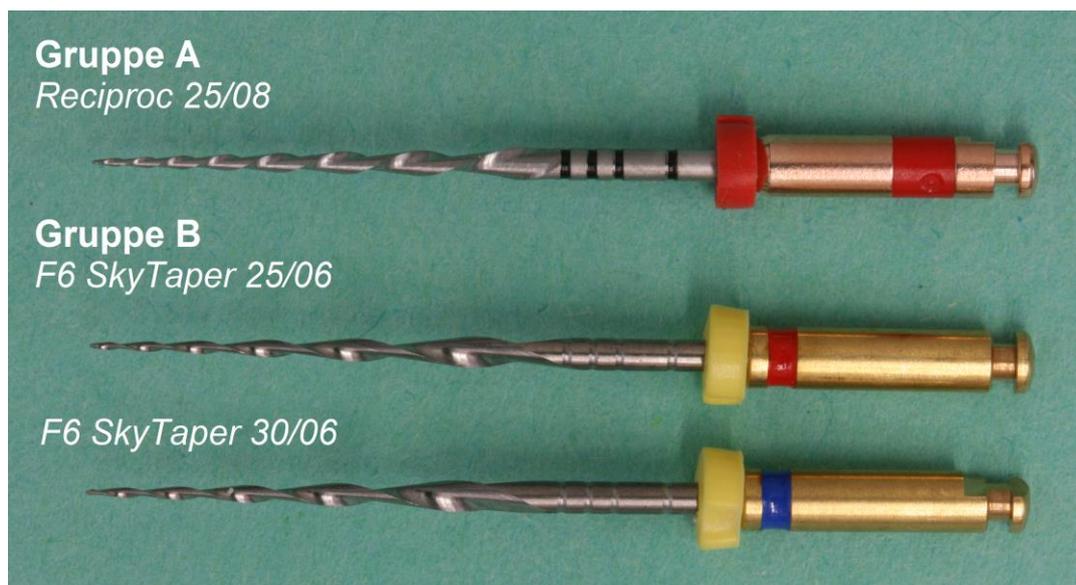
Zur Herstellung des Gleitpfads kamen K-Handfeilen der ISO-Größe 015 aus einer Nickel-Titan-Legierung (K-File Nitiflex, Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) zum Einsatz. Die K-Feilen hatten eine Arbeitslänge von 25 mm und eine Konizität von 2 % (Abbildung 14).



Abbildung 14: K-Handfeile (ISO 015) zur Herstellung des Gleitpfads

Für die maschinelle Aufbereitung der 540 unterschiedlich stark gekrümmten Wurzelkanäle wurden zwei verschiedenartige Aufbereitungssysteme verwendet. Bei den Aufbereitungssystemen handelte es sich wie bereits erwähnt zum einen um das reziprok arbeitende Ein-Feilen-System Reciproc der Firma VDW und zum anderen um das vollrotierende, zum Zeitpunkt der Studie noch als Prototyp bezeichnete, Ein-(Zwei)-Feilen-System F6 SkyTaper der Firma Komet.

Als Aufbereitungsfeile der Untersuchungsblöcke der Gruppe A diente die Reciproc-Feile R25 (25/08). In der Gruppe B, dem F6 SkyTaper-System, kamen zur Aufbereitung der Untersuchungskörper die Feilen 25/06 und 30/06 zum Einsatz (Abbildung 15). Die zusätzliche Anwendung der Aufbereitungsfeile 30/06 beim F6 SkyTaper-System erfolgte, um eine vergleichbare Konizität der beiden verschiedenen Aufbereitungssysteme im Kanalverlauf zu erzielen.



	Ø Instrumentenspitze	Ø D1	Ø D2	Ø D3	Ø D16
<b>Reciproc 25/08</b>	0,25	0,33	0,41	0,49	1,05
<b>F6SkyTaper 25/06</b>	0,25	0,31	0,37	0,43	1,21
<b>F6SkyTaper 30/06</b>	0,30	0,36	0,42	0,48	1,26

D=Abstand zur Instrumentenspitze/Durchmesser in mm

Abbildung 15: Verwendete Aufbereitungsfeilen und Darstellung der erzielten Aufbereitungsdurchmesser nach 1, 2, 3 und 16 mm hinter der Feilenspitze

Mittels des drehmomentbegrenzten VDW.SILVER® RECIPROC® - Endomotors und des dazugehörigen VDW 6:1 Endo-Winkelstücks wurden die zu testenden maschinellen Aufbereitungssysteme betrieben (VDW GmbH, München, Deutschland), (Abbildung 16). Der Endomotor ermöglicht sowohl die reziproke als auch die vollrotierende Arbeitsweise. Das Gerät enthält eine Feilenbibliothek mit voreingestellten Programmen bezüglich der vom Hersteller empfohlenen Umdrehungszahlen und Drehmomente für die gängigsten maschinellen Aufbereitungssysteme (wie z.B. Reciproc®, Wave One®, FlexMaster®, Mtwo® und ProTaper®). Innerhalb der Feilenbibliothek stehen freie Speicherplätze zur Verfügung und ermöglichen individuelle Einstellungen, wie zum Beispiel für das F6 SkyTaper-System, vorzunehmen.



Abbildung 16: VDW.SILVER® RECIPROC® - Endomotor mit VDW 6:1 Endo-Winkelstück

### 2.2.6 Vorversuch

Vor Beginn der Untersuchung machte sich die Behandlerin mit den beiden maschinellen Aufbereitungssystemen vertraut. Durch Lesen der Anwendungsempfehlung der Hersteller und der Durchführung eines Vorversuchs sammelte die Behandlerin praktische Erfahrungen mit beiden Feilensystemen. Im Vorversuch wurden pro Aufbereitungssystem fünf Blöcke der neun unterschiedlichen Kanalkonfigurationen aufbereitet. Diese Blöcke wurden nicht in die Auswertung der Studie miteinbezogen. Eine Reproduzierbarkeit der Aufbereitung konnte im Vorversuch sichergestellt werden.

### 2.3 Versuchsablauf

Die Aufbereitung begann in beiden Gruppen mit der Seriennummer eins und wurde fortlaufend bis zur Seriennummer 270 durchgeführt. Auf eine koronale Erweiterung des Kanals konnte verzichtet werden, da die Blöcke bereits einen konischen Trichter im koronalen Drittel des Wurzelkanals aufwiesen. Die Aufbereitung mit den beiden maschinellen Aufbereitungssystemen erfolgte nach der Single-Length Technik.

Die Arbeitslänge aller Kanäle betrug 17 mm. Zur Einstellung diente ein an der Feile befestigter Silikon-Stopper (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz), der mithilfe einer Messlehre (VDW GmbH, München, Deutschland) auf die entsprechende Länge gebracht wurde. Ein Feilenwechsel erfolgte nach Herstellerangaben sowie nach den

Erkenntnissen aus der Studie von Park et al. nach der Aufbereitung von fünf Wurzelkanälen (PARK et al. 2013).

Kam es während der Aufbereitung zu einer Instrumentenfraktur oder einer Stufenbildung, so wurde dieser Block dokumentiert und verworfen. Es folgte die Aufbereitung eines neuen Testkörpers mit der gleichen Kanalkonfiguration. Dies gewährleistete bei der statistischen Auswertung des Abtragverhaltens eine konstante Anzahl von Wurzelkanälen (n = 270) pro Gruppe.

### **2.3.1 Versuchsgruppe A: Maschinelle Aufbereitung mit dem Reciproc-System**

Die Versuchsreihe startete mit der Aufbereitung der Blöcke der Gruppe A. In dieser Gruppe kam das Ein-Feilensystem Reciproc (25/08) zum Einsatz. Nach Herstellerangaben konnte auf das Anlegen eines Gleitpfads verzichtet werden. Vor der endgültigen Aufbereitung wurde der Kanal mit Alkohol befeuchtet. Hierzu diente eine Spritze mit einer Endospülkanüle (Inject Luer-Lock Spritzen 2 ml, B. Braun Melsungen AG, Melsungen, Deutschland; Endo-Irrigation-Needels, Transcodent GmbH & Co. KG, Kiel, Deutschland). Die Aufbereitungsfeile wurde in den feuchten Kanal eingeführt und nach Angaben des Herstellers mit leichtem Druck dreimal nach apikal auf- und abbewegt („picking motion“), wobei die Auf- und Abbewegungen 3 mm nicht überschreiten sollten. Im Anschluss erfolgten die Reinigung der Feile im Clean-Stand (VDW GmbH, München, Deutschland) und ein gründliches Spülen (Inject Luer-Lock Spritzen 2 ml, B. Braun Melsungen AG, Melsungen, Deutschland; Endo-Irrigation-Needels, Transcodent GmbH & Co. KG, Kiel, Deutschland) des Wurzelkanals mit 2 ml Alkohol (Alkopharm 80, Brüggemann Alcohol Heilbronn GmbH, Heilbronn, Deutschland). Daraufhin wurde mittels einer C-Pilot-Feile der ISO-Größe 010 die Gängigkeit des Wurzelkanals, maximal 3 mm über die bereits aufbereitete Länge, überprüft. Die zuvor erläuterten Arbeitsschritte wiederholten sich, bis die Arbeitslänge erreicht wurde. Die anschließende Abschlussspülung mit 2 ml Alkohol sicherte die Entfernung der entstandenen Kunststoffspäne. Zur Trocknung des Kanals wurden RECIPROC-Papierspitzen (VDW GmbH, München, Deutschland) der ISO-Größe 025 verwendet.

### **2.3.2 Versuchsgruppe B: Maschinelle Aufbereitung mit dem F6 SkyTaper-System**

In der Gruppe B wurde die Aufbereitung mit dem vollrotierenden Feilensystem F6 SkyTaper (ISO 25/06 und 30/06) der Firma Komet durchgeführt. Das Anlegen eines Gleitpfads war nach Herstellerangaben notwendig. Dies erfolgte mittels Handfeilen der ISO-Größe 015. Die maschinelle Aufbereitung wurde mit einer kurzen Auf- und Abbewegung („picking motion“) für maximal 8 Sekunden im feuchten Kanal bei einer Drehzahl von 300 Upm und einem Drehmoment von 2,2 Ncm durchgeführt. Das Reinigen der Instrumente im Clean-Stand und das gründliche Spülen der Wurzelkanäle mit 2 ml Alkohol erfolgte auch hier nach jedem Arbeitsschritt. Zudem wurde nach jeder Instrumentenanwendung eine Rekapitulation der Arbeitslänge mittels einer C-Feile der ISO-Größe 010 durchgeführt. Nach Erreichen der Arbeitslänge mit der ISO-Größe 25/06 wurde der Kanal gründlich gespült und mit Papierspitzen der ISO-Größe 025 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) getrocknet. Im Anschluss wurde der Block nach Entfernung des Leukoplast® mit einer digitalen Kamera in repositionierbarer Position fotografiert. Der Block wurde erneut abgeklebt und die Aufbereitung des Wurzelkanals mit der ISO-Größe 30/06 fortgeführt. Auch hier erfolgten zum Abschluss eine gründliche Spülung zur Entfernung der Kunststoffspäne sowie das Trocknen des Kanals mittels Papierspitzen der ISO-Größe 030 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz).

### **2.3.3 Aufbereitungszeit**

In beiden Gruppen wurde die zur Aufbereitung eines Wurzelkanals investierte Zeit mittels einer Stoppuhr erfasst und dokumentiert. Die erfasste Zeit beinhaltete sowohl die Zeit der eigentlichen maschinellen Aufbereitung als auch das zwischenzeitliche Spülen und das Rekapitulieren des Wurzelkanals. Die Herstellung des Gleitpfads mit Handfeilen sowie die Durchführung von Zwischenaufnahmen mit der Spiegelreflexkamera waren nicht Bestandteil der Aufbereitungszeit.

## 2.4 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Bilder wurde ein 15,6-Zoll-Laptop (Lenovo ThinkPad Edge E530c, China, USA, Singapur) verwendet. Mithilfe des Bildbearbeitungsprogramms Adobe Photoshop CS6 Extended (Adobe Systems GmbH, München, Deutschland) wurden die Bilder der Wurzelkanäle vor (Abbildung 17) und nach (Abbildung 18) der Aufbereitung vergrößert und übereinander gelegt. Zur Bestimmung des Abtragverhaltens der Aufbereitungsfeilen wurde dafür der aufbereitete Wurzelkanal bei reduzierter Deckkraft (50 %) auf den unbearbeiteten Kanal projiziert. Für eine optimale Übereinanderlagerung der Bilder dienten die rechts und links vom Kanaltrichter eingravierten Justierungskreuze (Abbildung 19). Durch die Veränderung der Deckkraft war es möglich, beide Wurzelkanäle einzeln und gleichzeitig darzustellen und die Kanalverläufe mit verschiedenen Farben zu markieren (Abbildung 20). Hierzu diente das RGB-Farbensystem, das durch das additive Mischen dreier Grundfarben (R = Rot, G = Grün und B = Blau) gekennzeichnet ist. Die Innenkurvatur des unbearbeiteten Wurzelkanals wurde blau und die Außenkurvatur grün eingezeichnet. Bei dem aufbereiteten Wurzelkanal wies die Innenkurvatur die Farbe Gelb und die Außenkurvatur die Farbe Rot auf. Da die Wurzelkanäle der gleichen Kanalkonfigurationen identisch waren, mussten die Linien des unbearbeiteten Blocks je Konfiguration nur einmal eingezeichnet werden und konnten bei allen anderen Blöcken der gleichen Konfiguration auf den unbearbeiteten Wurzelkanal kopiert werden. So war weiterhin gewährleistet, dass alle unbearbeiteten Kanäle je Kanalkonfiguration identisch waren. Das Einzeichnen der Linien sowie die Dokumentation der Stufenbildungen und Feilenfrakturen wurde bei einer Vergrößerung von 30 % bis 250 % durchgeführt.



Abbildung 17: Wurzelkanal vor der Aufbereitung



Abbildung 18: Aufbereiteter Wurzelkanal



Abbildung 19: Überlagerte Wurzelkanäle bei reduzierter Deckkraft

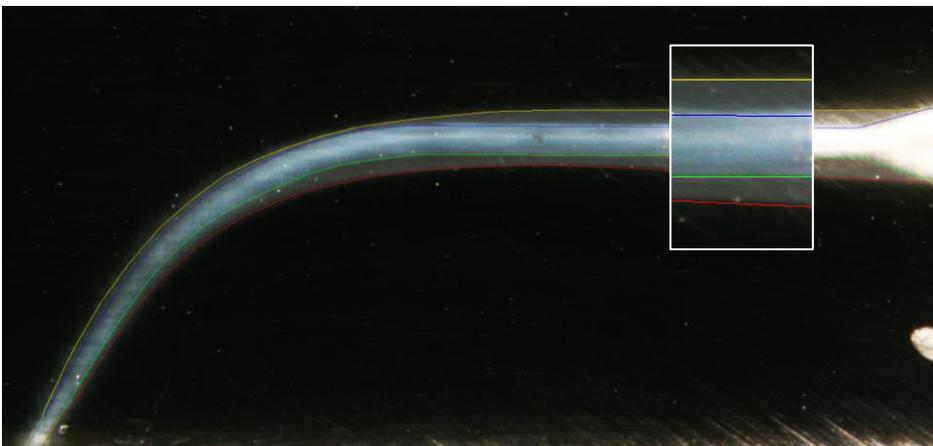


Abbildung 20: Überlagerte Wurzelkanäle mit eingezeichneten Linien

Anschließend erfolgte das Abspeichern des Bildes als PNG-Datei, die der weiteren Auswertung mittels einer selbst entwickelten Computersoftware diente. Zudem stellte die PNG-Datei eine verlustfreie Kompression des Bildmaterials sicher. Anhand der Computersoftware erfolgte die Berechnung des Materialabtrags an der Innen- und Außenkrümmung mithilfe eingezeichneter Linien. An der Innenkrümmung des unbearbeiteten Kanals, beginnend am Apex, wurden in einem Intervall von 15 Pixeln Messpunkte festgelegt, an denen mithilfe einer eingefügten Senkrechten jeweils die Bestimmung des Abtrags erfolgen sollte. Das Einfügen der Senkrechten gelang dadurch, dass in einem Arbeitsschritt zuvor eine Gerade erstellt wurde, die durch die im Intervall vorliegenden Messpunkte, die sich jeweils links und rechts vom Messpunkt befanden, verlief (Abbildung 21b). Im Anschluss wurde durch Parallelverschiebung der Geraden eine Tangente gebildet, die den zu bestimmenden Messpunkt schnitt. Die am zu bestimmenden Messpunkt eingefügte Senkrechte bildete insgesamt vier Schnittpunkte mit den Linien, die die Innen- bzw. Außenkrümmung des unbearbeiteten und aufbereiteten Kanals darstellten. Mithilfe dieser Schnittpunkte konnte sowohl an der Innen- als auch an der Außenkrümmung die Ausmessung des Abtrags erfolgen. Einerseits wurde die Distanz vom Schnittpunkt der Senkrechten mit der roten Linie (aufbereiteter Kanal, Innenkrümmung) und dem Schnittpunkt der Senkrechten mit der grünen Linie (unbearbeiteter Kanal, Innenkrümmung) und andererseits die Distanz vom Schnittpunkt der Senkrechten mit der gelben Linie (aufbereiteter Kanal, Außenkrümmung) und dem Schnittpunkt der Senkrechten mit der blauen Linie (unbearbeiteter Kanal, Außenkrümmung) berechnet (Abbildung 21c). Das Vorgehen erfolgte an jedem Messpunkt. Die ermittelten Werte (Angabe in Pixel) wurden als Textformat abgespeichert und später in eine Excel-Tabelle zur Auswertung übertragen. Zudem erfolgte eine Abspeicherung des Bildmaterials als JPEG-Format (Abbildung 21a).

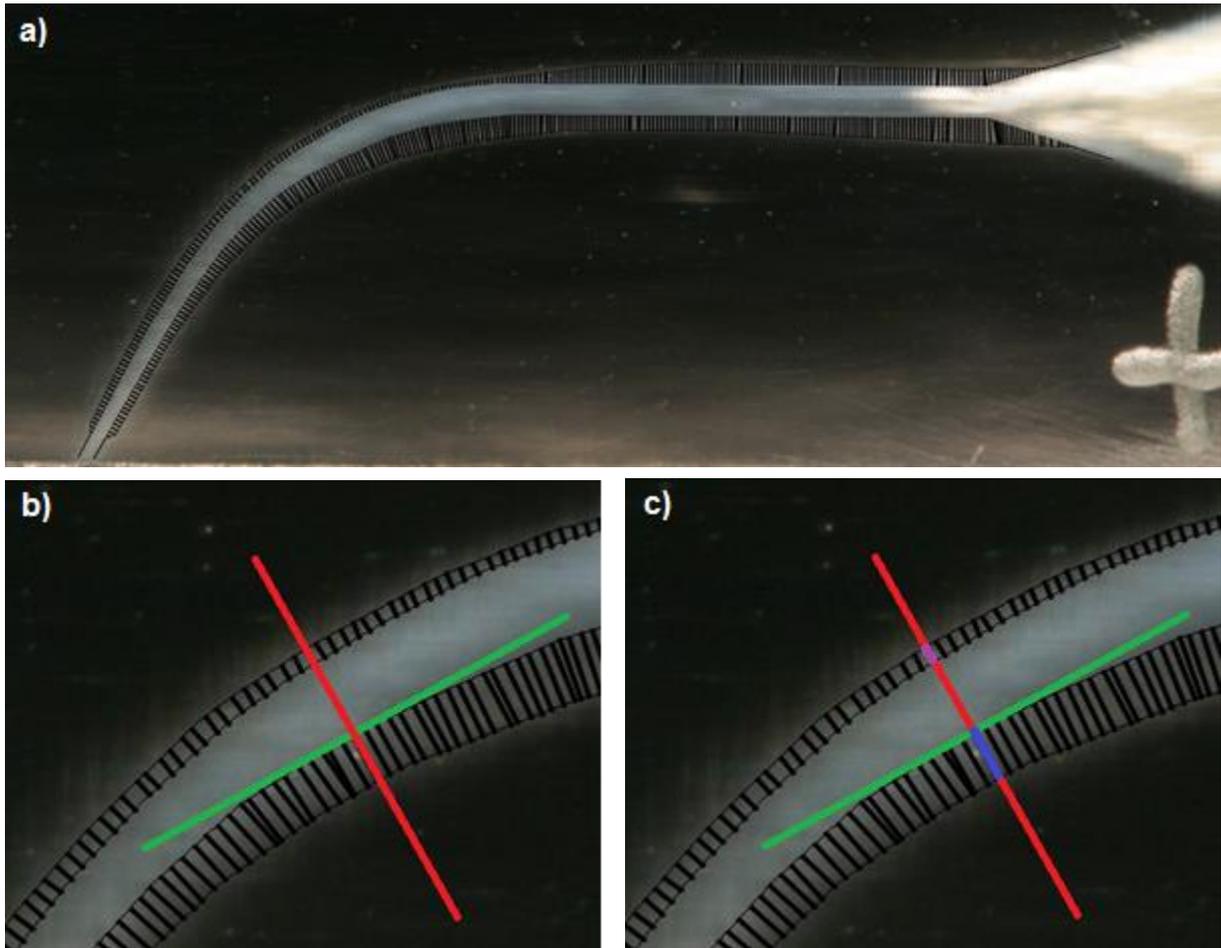


Abbildung 21: a) Computergestützte Auswertung der überlagerten Wurzelkanäle  
 b) Vergrößerte Darstellung mit eingezeichneter Tangente (grün), sowie der Senkrechten durch den Messpunkt  
 c) Darstellung der zu berechnenden Strecken; blaue Linie – Abtrag Innenkurvatur; lila Linie – Abtrag Außenkurvatur

Die in die Excel-Tabelle übertragenen Pixelwerte (Tabelle 4, Spalte A und B) dienen der Berechnung des Abtrags an der Innen- und Außenkurvatur entlang des Kanalverlaufs an den festgelegten Intervallpunkten.

**Tabelle 4: Ausschnitt Excel-Tabelle; Spalte A = Abtrag Außenkurvatur, Spalte B = Abtrag Innenkurvatur; Spalte C = Ergebnisse der MIN/MAX-Standardfunktion**

	A	B	C
1	0,98171	0,990754	0,9908716
2	0,957188	0,786645	0,8218291
3	1,298637	1,186183	0,9134061
4	1,140777	1,225395	0,9309461
5	...	...	...

Unter Verwendung der MIN/MAX-Standardfunktion (z.B. = MIN(A1:B1)/MAX(A1:B1)) wurde je Messpunkt der größere Wert durch den kleineren Wert dividiert. Das Ziel der Ermittlung der Standardabweichung durch die MIN/MAX-Standardfunktion war es, Ergebnisse mit Werten zwischen „null“ und „eins“ (Tabelle 4, Spalte C) zu erhalten. Der Wert eins definierte einen gleichmäßigen Abtrag an der Außen- und Innenkurvatur am definierten Messpunkt und bildet demnach den Optimalwert. Je weiter sich der Wert von dem Optimalwert „eins“ entfernte, desto unregelmäßiger war der Abtrag beziehungsweise desto ausgeprägter war die Verlagerung des Kanals. Basierend auf den berechneten Mittelwerten aller einzelnen Untersuchungsblöcke wurden anschließend die Mittelwerte der neun verschiedenen Kanalkonfigurationsgruppen je Aufbereitungsfeile ermittelt. Anhand der ermittelten Ergebnisse war es möglich, im nächsten Schritt die einzelnen Feilensysteme miteinander zu vergleichen.

Eine standardisierte Durchführung der Division der Messwerte aus der Spalte A (Außenkurvatur) mit den Messwerten aus der Spalte B (Innenkurvatur) und umgekehrt, hätte zur Folge, dass zum einen Werte zwischen „null“ und „eins“ und zum anderen Werte größer „eins“ berechnet würden. Auch bei Ergebnissen größer „eins“ würde gelten, je weiter der Wert von eins entfernt ist, desto größer die Unregelmäßigkeit im Abtrag. Bei der Berechnung des Mittelwerts mit Zahlen größer und kleiner „eins“, käme es zu einer positiven Verfälschung des Mittelwerts, da sich die Ergebnisse größer und kleiner „eins“ ausgleichen würden, und dies einen Mittelwert annähernd oder gleich „eins“ zur Folge hätte.

## **2.5 Statistische Analyse**

Die Datenerfassung wurde mit Microsoft Office 2013 (Microsoft Corporation, Redmond, Washington (USA)) durchgeführt. Die Auswertung der evaluierten Daten erfolgte mit dem Statistikprogramm GraphPad Prism 6.0 (GraphPad Software, La Jolla, Kalifornien (USA)).

Die Überprüfung von signifikanten Differenzen in der Aufbereitung zwischen den beiden Systemen Reciproc und F6 SkyTaper beziehungsweise zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen, wurde mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse ANOVA vollzogen. Zur Darstellung der signifikanten Unterschiede diente im Anschluss der Tukey Post-Hoc-Test. Die Signifikanz wurde auf  $p > 0,05$  festgelegt.

## 3 Ergebnisse

In der Auswertung wurden 540 aufbereitete Kunststoffblöcke untersucht, wobei je Feilensystem insgesamt 270 Probekörper mit neun verschiedenen Kanalkonfigurationen evaluiert wurden. Je Kanalkonfiguration wurden 30 Blöcke aufbereitet und analysiert. Mithilfe der vor, während und nach der Aufbereitung angefertigten Fotoaufnahmen und eines computergestützten Auswertungsprogramms war es möglich, den Materialabtrag als Zahlenwert zu definieren und zu bestimmen. Der Materialabtrag an den Kanalwänden wurde anhand von grafischen Darstellungen in Form von Boxplots dargestellt. Die Ordinatenachse (y-Achse), welche durch die Werte „0“ bis „1“ gekennzeichnet ist, stellt das Verhältnis des Abtrags entlang des gesamten Wurzelkanals dar. Der Wert „1“ gibt den Höchstwert an, welcher durch einen gleichmäßigen Abtrag sowohl an der Innen- als auch an der Außenkrümmung gekennzeichnet ist. Je geringer die Werte der Ordinate von „1“ abweichen, desto gleichmäßiger ist der Abtrag an der Innen- und Außenkrümmung. Auf der Abszissenachse (x-Achse) sind in den folgenden Diagrammen die verwendeten Aufbereitungssysteme beziehungsweise die verschiedenen Kanalkonfigurationen dargelegt.

### 3.1 Auswertung je Feilensystem

Zu Beginn wurden die in der Studie verwendeten Aufbereitungsfeilen (Reciproc, F6 SkyTaper 25/06 und 30/06) einzeln evaluiert.

Mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse ANOVA konnte bei allen Aufbereitungsfeilen ein signifikanter Unterschied in der Abtragqualität zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen gezeigt werden ( $p < 0,0001$ ).

#### 3.1.1 Auswertung Reciproc

Die graphische Darstellung der Ergebnisse im Diagramm 1 und die in Tabelle 5 dargelegten Resultate veranschaulichen, dass bei den Kanalkonfigurationen mit gleichbleibenden Krümmungsradien und absteigenden Krümmungswinkeln (60R8-45R8-30R8; 60R5-45R5-30R5; 60R2-45R2-30R2) eine abnehmende Homogenität des Kanalverlaufs zu beobachten ist. Bei der Betrachtung der Kanalform mit gleichbleibenden Krümmungswinkeln und absteigenden Krümmungsradien (60R8-60R5-60R2; 45R8-45R5-45R2; 30R8-30R5-30R2) wird ersichtlich, dass die

Abnahme des Radius nur bedingt mit der Abnahme der Homogenität des Kanalverlaufs korreliert (nur bei 60R8-60R5-60R2). Die Wurzelkanäle mit Krümmungswinkeln von 30° beziehungsweise 45° wiesen bei einem Krümmungsradius vom 2 mm eine homogenere Aufbereitung gegenüber den Wurzelkanälen mit einem Radius von 5 und 8 mm auf. Am ungleichmäßigsten jedoch war der Abtrag an der inneren und äußeren Krümmung der Kanäle, die über einen Krümmungsradius von 5 mm verfügten.

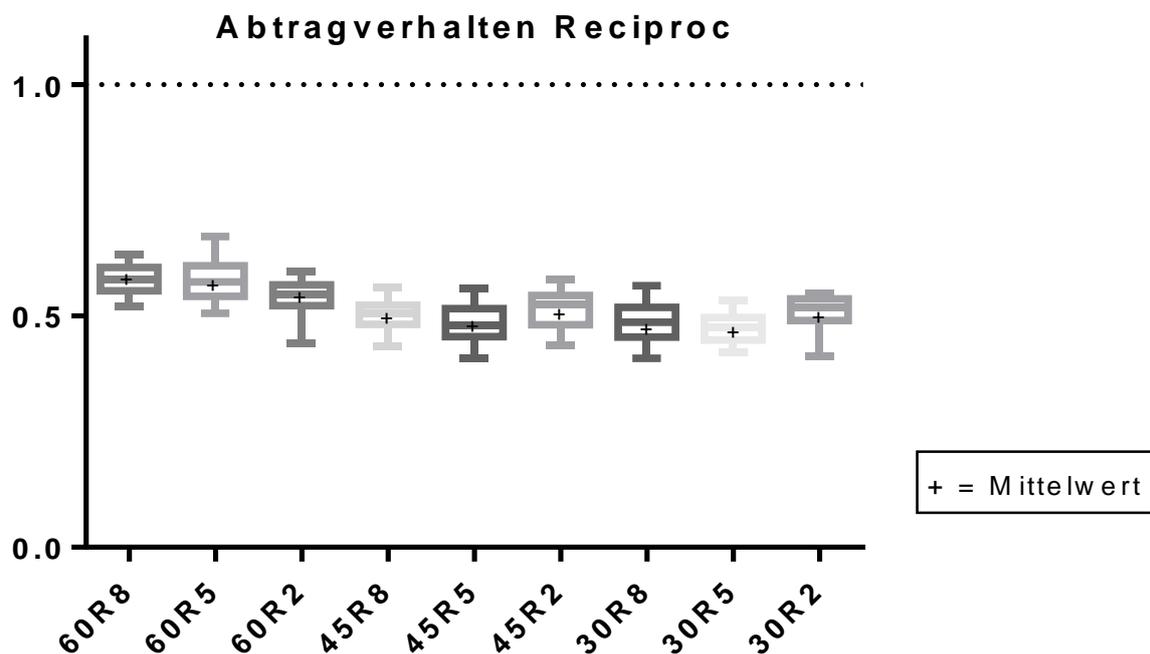


Diagramm 1: Darstellung des Abtragverhaltens der Reciproc-Feile je Kanalkonfiguration

Die Form des Kanals konnte am besten bei der Kanalkonfiguration 60R8 erhalten bleiben ( $M = 0,581 \pm 0,031$ ). Das geringste arithmetische Mittel zeigt sich bei den Wurzelkanälen, die einen Krümmungswinkel von 30° und einen Krümmungsradius von 5 mm aufweisen ( $M = 0,474 \pm 0,031$ ). Dies spricht für das inhomogenste Arbeiten der Feile an den Kanalwänden. Die Gruppen mit den Kanalformen 60R8, 30R5 und 45R8 weisen die geringsten Streuungen der Ergebnisse auf ( $SD_{60R8+30R5} = 0,031$ ;  $SD_{45R8} = 0,032$ ).

**Tabelle 5: Abtragverhalten Reciproc-System (Angaben in Pixel)**

Kanal-konfiguration	60R8	60R5	60R2	45R8	45R5	45R2	30R8	30R5	30R2
<b>Anzahl der Probekörper</b>	30	30	30	30	30	30	30	30	30
<b>Minimum</b>	0,520	0,506	0,441	0,435	0,409	0,436	0,409	0,422	0,412
<b>Median</b>	0,578	0,574	0,546	0,505	0,480	0,525	0,487	0,475	0,520
<b>Maximum</b>	0,632	0,671	0,597	0,561	0,559	0,579	0,565	0,534	0,549
<b>Mittelwert</b>	0,581	0,575	0,541	0,505	0,482	0,516	0,483	0,474	0,509
<b>Standard-abweichung</b>	0,031	0,042	0,038	0,032	0,041	0,040	0,042	0,031	0,036

Die Ergebnisse des Tukey Post-Hoc-Tests werden in der folgenden Tabelle dargelegt (Tabelle 6). Der Signifikanzvergleich zwischen den Kanalkonfigurationen mit gleichbleibenden Krümmungsradien und absteigenden Krümmungswinkeln (60R8-45R8-30R8; 60R5-45R5-30R5; 60R2-45R2-30R2) ergab, dass bei den Kanalkonfigurationen 60R8 vs. 45R8, 60R8 vs. 30R8, 60R5 vs. 45R5, 60R5 vs. 30R5 und 60R2 vs. 30R2 signifikante Differenzen bestehen. Beim Vergleich der Kanalkonfigurationen mit gleichbleibenden Krümmungswinkeln und absteigenden Krümmungsradien (60R8-60R5-60R2; 45R8-45R5-45R2; 30R8-30R5-30R2) konnte bei folgenden Kanalformen ein signifikanter Unterschied ermittelt werden: 60R8 vs. 60R2, 60R5 vs. 60R2, 45R5 vs. 45R2 und 30R5 vs. 30R2.

**Tabelle 6: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen; Aufbereitungsfeile: Recipro**

<b>Tukey Post-Hoc-Test</b>	<b>Mittlerer Unterschied in Pixel</b>	<b>Signifikanz p &lt; 0.05</b>	<b>p-Wert</b>	<b>95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz</b>
<b>60R8 vs. 60R5</b>	0,006	Nein	0,9995	-0,024 - 0,036
<b>60R8 vs. 60R2</b>	0,040	Ja	0,0014	0,010 - 0,070
<b>60R5 vs. 60R2</b>	0,034	Ja	0,0139	0,004 - 0,064
<b>45R8 vs. 45R5</b>	0,022	Nein	0,339	-0,008 - 0,052
<b>45R8 vs. 45R2</b>	-0,011	Nein	0,9659	-0,041 - 0,019
<b>45R5 vs. 45R2</b>	-0,033	Ja	0,018	-0,064 - (-0,003)
<b>30R8 vs. 30R5</b>	0,009	Nein	0,99	-0,021 - 0,039
<b>30R8 vs. 30R2</b>	-0,026	Nein	0,1635	-0,056 - 0,004
<b>30R5 vs. 30R2</b>	-0,035	Ja	0,0106	-0,065 - (-0,005)
<b>60R8 vs. 45R8</b>	0,076	Ja	< 0,0001	0,046 - 0,106
<b>60R8 vs. 30R8</b>	0,098	Ja	< 0,0001	0,067 - 0,128
<b>45R8 vs. 30R8</b>	0,021	Nein	0,3994	-0,009 - 0,051
<b>60R5 vs. 45R5</b>	0,092	Ja	< 0,0001	0,062 - 0,122
<b>60R5 vs. 30R5</b>	0,101	Ja	< 0,0001	0,070 - 0,131
<b>45R5 vs. 30R5</b>	0,008	Nein	0,9952	-0,022 - 0,038
<b>60R2 vs. 45R2</b>	0,025	Nein	0,1939	-0,005 - 0,055
<b>60R2 vs. 30R2</b>	0,032	Ja	0,0311	0,002 - 0,062
<b>45R2 vs. 30R2</b>	0,007	Nein	0,9989	-0,023 - 0,037

### 3.1.2 Auswertung F6 SkyTaper

#### 3.1.2.1 Auswertung F6 SkyTaper (25/06)

Der Vergleich der Abtragqualität an den künstlich geschaffenen Wurzelkanälen (n = 270) mittels des in der Studie verwendeten Feilensystems F6 SkyTaper 25/06 wird im folgenden Diagramm gezeigt (Diagramm 2).

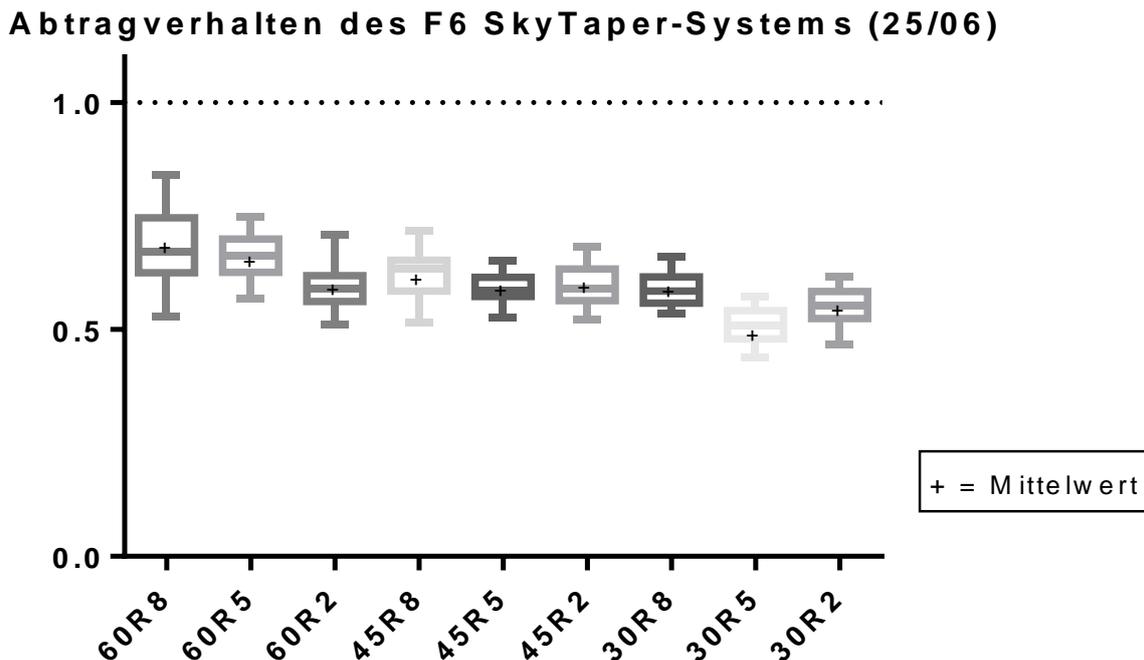


Diagramm 2: Darstellung des Abtragverhaltens des F6 SkyTaper-Systems (25/06) je Kanalkonfiguration

Bei Betrachtung der arithmetischen Mittel in der nachfolgenden Tabelle 7 wird sichtbar, dass die abnehmende Homogenität des Kanalverlaufs mit den Kanalkonfigurationen, welche gleichbleibende Krümmungsradien und absteigende Krümmungswinkel (60R8-45R8-30R8; 60R5-45R5-30R5; 60R2-45R2-30R2) aufweisen, korreliert. Auch der Vergleich der Kanalkonfigurationen mit gleichbleibenden Krümmungswinkeln und absteigenden Krümmungsradien (60R8-60R5-60R2; 45R8-45R5-45R2; 30R8-30R5-30R2) zeigt ein ähnliches Verhalten. Ausnahmen bilden die Wurzelkanäle mit einem Krümmungswinkel von 30°. Bei einem Krümmungsradius vom 2 mm wiesen diese Kanäle eine homogenere Aufbereitung gegenüber den Wurzelkanälen mit einem Radius von 5 mm auf. Die Wurzelkanäle mit einem Krümmungswinkel von 45° und

einem Radius von 2- beziehungsweise 5 mm zeigten eine ähnliche Gleichmäßigkeit in der Aufbereitung, wohingegen die Untersuchungsblöcke mit der Kanalkonfiguration 45R5 ein geringeres Streumaß aufwiesen ( $M_{45R2} = 0,595 \pm 0,044$ ;  $M_{45R5} = 0,591 \pm 0,033$ ). Das gleichmäßigste Abtragverhalten ( $M = 0,682 \pm 0,076$ ) wurde bei den Untersuchungskörpern, die einen Wurzelkanal mit einer Kanalkrümmung von  $60^\circ$  und einen Krümmungsradius von 8 mm aufwiesen (60R8), erreicht. Kunststoffblöcke, deren Wurzelkanäle einen Krümmungswinkel von  $30^\circ$  und einen Krümmungsradius von 5 mm besaßen, zeigen den geringsten Mittelwert ( $M = 0,508 \pm 0,037$ ) und wiesen damit den unregelmäßigsten Abtrag an den Kanalwänden auf. Die größte Streuung vom Median sowohl in Richtung Minimum als auch in Richtung Maximum wurde bei den Wurzelkanälen mit einem Krümmungswinkel von  $60^\circ$  und einem Krümmungsradius von 8 mm ermittelt (Min = 0,529; Max = 0,841).

**Tabelle 7: Abtragverhalten des F6 SkyTaper-Systems (25/06) (Angaben in Pixel)**

Kanal-konfiguration	60R8	60R5	60R2	45R8	45R5	45R2	30R8	30R5	30R2
Anzahl der Probekörper	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Minimum	0,529	0,568	0,511	0,516	0,526	0,521	0,536	0,438	0,466
Median	0,671	0,661	0,591	0,635	0,586	0,591	0,584	0,510	0,551
Maximum	0,841	0,747	0,708	0,718	0,653	0,681	0,661	0,571	0,615
Mittelwert	0,682	0,659	0,592	0,627	0,591	0,595	0,589	0,508	0,552
Standard-abweichung	0,076	0,047	0,043	0,046	0,033	0,044	0,037	0,037	0,040

Zur Ermittlung der Signifikanz bezüglich des Abtragverhaltens zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen diente auch hier der Tukey Post-Hoc-Test. Signifikante Abweichungen wurden bei der Gegenüberstellung der Kanalkonfigurationen mit gleichbleibenden Krümmungsradien und absteigenden Krümmungswinkeln (60R8-45R8-30R8; 60R5-45R5-30R5; 60R2-45R2-30R2) bei folgenden Kanalkonfigurationen gefunden: 60R8 vs. 45R8, 60R8 vs. 30R8,

45R8 vs. 30R8, 60R5 vs. 45R5, 60R5 vs. 30R5, 45R5 vs. 30R5, 60R2 vs. 30R2, 45R2 vs. 30R2. Der Vergleich der Kanalkonfigurationen mit gleichbleibenden Krümmungswinkeln und absteigenden Krümmungsradien (60R8-60R5-60R2; 45R8-45R5-45R2; 30R8-30R5-30R2) ergab bei folgenden Kanalkonfigurationen signifikante Differenzen: 60R8 vs. 60R2, 60R5 vs. 60R2, 30R8 vs. 30R5, 30R5 vs. 30R2 (Tabelle 8).

**Tabelle 8: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen; Aufbereitungsfeile: F6 SkyTaper 25/06**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
60R8 vs. 60R5	0,023	Nein	0,5897	-0,014 - 0,060
60R8 vs. 60R2	0,090	Ja	< 0,0001	0,053 - 0,127
60R5 vs. 60R2	0,067	Ja	< 0,0001	0,030 6 0,104
45R8 vs. 45R5	0,036	Nein	0,0673	-0,001 - 0,073
45R8 vs. 45R2	0,033	Nein	0,1342	-0,004 - 0,070
45R5 vs. 45R2	-0,003	Nein	> 0,9999	-0,041 - 0,034
30R8 vs. 30R5	0,082	Ja	< 0,0001	0,044 - 0,119
30R8 vs. 30R2	0,037	Nein	0,052	-0,0002 - 0,075
30R5 vs. 30R2	-0,044	Ja	0,0075	-0,082 - (-0,007)
60R8 vs. 45R8	0,055	Ja	0,0003	0,017 - 0,092
60R8 vs. 30R8	0,093	Ja	< 0,0001	0,055 - 0,130
45R8 vs. 30R8	0,038	Ja	0,0409	0,001 - 0,076
60R5 vs. 45R5	0,068	Ja	< 0,0001	0,030 - 0,105
60R5 vs. 30R5	0,151	Ja	< 0,0001	0,114 - 0,189
45R5 vs. 30R5	0,084	Ja	< 0,0001	0,046 - 0,121
60R2 vs. 45R2	-0,003	Nein	> 0,9999	-0,040 - 0,035
60R2 vs. 30R2	0,040	Ja	0,0261	0,003 - 0,077
45R2 vs. 30R2	0,042	Ja	0,0131	0,005 - 0,080

### 3.1.2.2 Auswertung F6 SkyTaper (30/06)

Sowohl die im Diagramm 3 graphisch dargestellten Ergebnisse als auch die in der Tabelle 9 ermittelten Daten zeigen, dass die Kanalkonfigurationen mit gleichbleibenden Krümmungsradien und absteigenden Krümmungswinkeln (60R8-45R8-30R8; 60R5-45R5-30R5; 60R2-45R2-30R2) mit einer Abnahme der Homogenität des Kanalverlaufs einhergingen. Betrachtet man die Kanalformen mit gleichbleibenden Krümmungswinkeln und absteigenden Krümmungsradien (60R8-60R5-60R2; 45R8-45R5-45R2; 30R8-30R5-30R2), so lässt sich erkennen, dass auch hier in den meisten Fällen die Gleichmäßigkeit des Abtrags an der Innen- bzw. Außenkrümmung mit der Reduktion des Radius abnahm. Eine Ausnahme bildeten auch hier die Kanalkonfigurationen mit einem konstanten Krümmungswinkel von 30° und einem absteigenden Krümmungsradius (R8-R5-R2). Wurzelkanäle mit der Kanalkonfiguration 30R8 wiesen die höchste Homogenität des Kanalverlaufs in dieser Gruppe auf, gefolgt von den Kanalkonfigurationen 30R2 und 30R5, die jedoch keine signifikanten Abweichungen in der Aufbereitungsqualität zeigten ( $p = 0,1422$ ), (Tabelle 9).

**Abtragverhalten des F6 SkyTaper-Systems (30/06)**

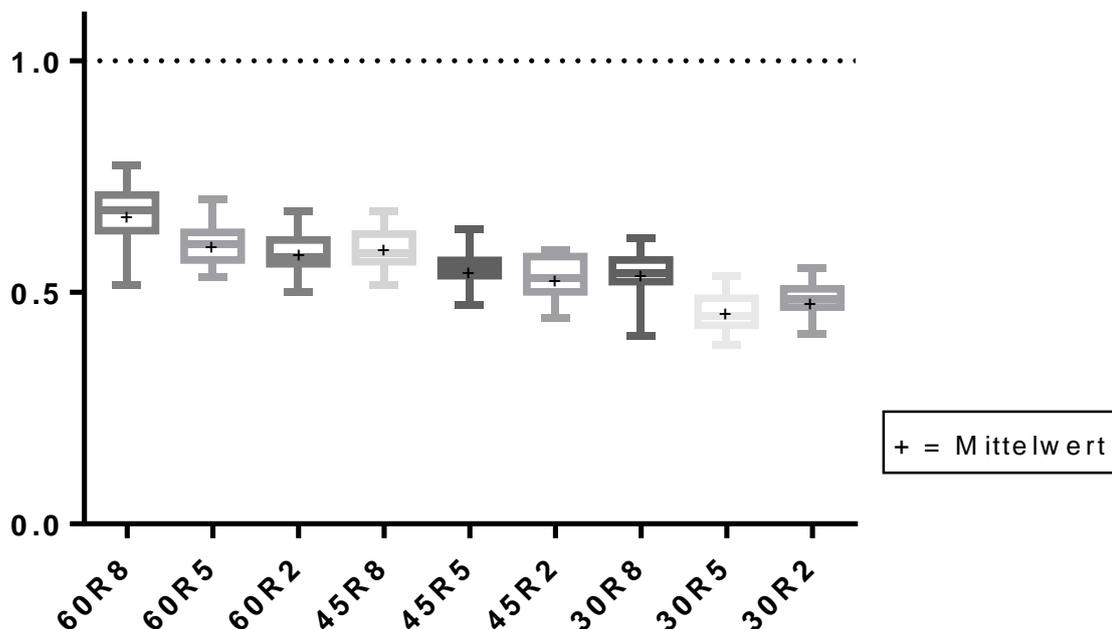


Diagramm 3: Darstellung des Abtragverhaltens des F6 SkyTaper-Systems (30/06) je Kanalkonfiguration

Die Form des Kanals konnte am besten bei der Kanalkonfiguration 60R8 erhalten werden, jedoch kam es bei dieser Gruppe zu der größten Streuung ( $M = 0,667$ ;  $SD = 0,061$ ). Die ungleichmäßigste Aufbereitung der Kanalwände wurde bei den Wurzelkanälen beobachtet, deren Wurzel eine Krümmung von  $30^\circ$  und einen Krümmungsradius von 5 mm (30R5) besaßen ( $M = 0,456 \pm 0,037$ ).

**Tabelle 9: Abtragverhalten der 30/06-Aufbereitungsfeile des F6 SkyTaper-Systems (Angaben in Pixel)**

Kanal-konfiguration	60R8	60R5	60R2	45R8	45R5	45R2	30R8	30R5	30R2
Anzahl der Probekörper	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Minimum	0,515	0,533	0,5	0,516	0,472	0,444	0,406	0,386	0,409
Median	0,678	0,604	0,576	0,585	0,554	0,531	0,540	0,448	0,486
Maximum	0,774	0,701	0,675	0,674	0,637	0,591	0,617	0,534	0,554
Mittelwert	0,667	0,604	0,586	0,593	0,555	0,532	0,541	0,456	0,486
Standard-abweichung	0,061	0,043	0,040	0,041	0,034	0,044	0,042	0,037	0,031

Bei der Überprüfung der Signifikanz in Bezug auf die Aufbereitungsqualität zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen konnten mittels des Tukey Post-Hoc-Test signifikante Unterschiede in den meisten Fällen ermittelt werden. Beim Vergleich der Kanalkonfigurationen 60R5 vs. 60R2, 45R5 vs. 45R2 und 30R5 vs. 30R2, konnten keine signifikanten Unterschiede im Abtragverhalten ermittelt werden (Tabelle 10).

**Tabelle 10: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen; Aufbereitungsfeile: F6 SkyTaper 30/06**

<b>Tukey Post-Hoc-Test</b>	<b>Mittlerer Unterschied in Pixel</b>	<b>Signifikanz <math>p &lt; 0.05</math></b>	<b>p-Wert</b>	<b>95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz</b>
<b>60R8 vs. 60R5</b>	0,064	Ja	< 0,0001	0,030 - 0,098
<b>60R8 vs. 60R2</b>	0,082	Ja	< 0,0001	0,048 - 0,116
<b>60R5 vs. 60R2</b>	0,018	Nein	0,7815	-0,016 - 0,052
<b>45R8 vs. 45R5</b>	0,038	Ja	0,0151	0,004 - 0,072
<b>45R8 vs. 45R2</b>	0,060	Ja	< 0,0001	0,026 - 0,095
<b>45R5 vs. 45R2</b>	0,022	Nein	0,5199	-0,012 - 0,056
<b>30R8 vs. 30R5</b>	0,085	Ja	< 0,0001	0,051 - 0,119
<b>30R8 vs. 30R2</b>	0,055	Ja	< 0,0001	0,021 - 0,089
<b>30R5 vs. 30R2</b>	-0,030	Nein	0,1422	-0,064 - 0,004
<b>60R8 vs. 45R8</b>	0,074	Ja	< 0,0001	0,040 - 0,109
<b>60R8 vs. 30R8</b>	0,126	Ja	< 0,0001	0,092 - 0,161
<b>45R8 vs. 30R8</b>	0,052	Ja	0,0001	0,018 - 0,086
<b>60R5 vs. 45R5</b>	0,049	Ja	0,0004	0,015 - 0,083
<b>60R5 vs. 30R5</b>	0,147	Ja	< 0,0001	0,113 - 0,181
<b>45R5 vs. 30R5</b>	0,098	Ja	< 0,0001	0,064 - 0,132
<b>60R2 vs. 45R2</b>	0,053	Ja	< 0,0001	0,019 - 0,087
<b>60R2 vs. 30R2</b>	0,10	Ja	< 0,0001	0,065 - 0,134
<b>45R2 vs. 30R2</b>	0,046	Ja	0,001	0,012 - 0,080

### **3.2 Auswertung der Feilensysteme gegeneinander, je Kanalkonfiguration**

Im Folgenden wurden die Aufbereitungsfeilen je Kanalkonfiguration miteinander verglichen und evaluiert.

Die einfaktorielle Varianzanalyse ANOVA ergab eine hoch signifikante Differenz in Bezug auf das Abtragverhalten an den Kanalwänden zwischen den drei verschiedenen Aufbereitungsfeilen ( $p < 0,0001$ ) bei allen neun Kanalkonfigurationen.

### 3.2.1 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 60R8

Die Kanalkonfiguration 60R8 wies in dieser Studie sowohl den größten Krümmungswinkel als auch den größten Krümmungsradius auf. Im folgenden Diagramm 4 ist der Abtrag der drei angewandten maschinellen Aufbereitungsfeilen an den Kanalwänden dargestellt.

Abtragverhalten der Systeme bei der Kanalkonfiguration 60R8

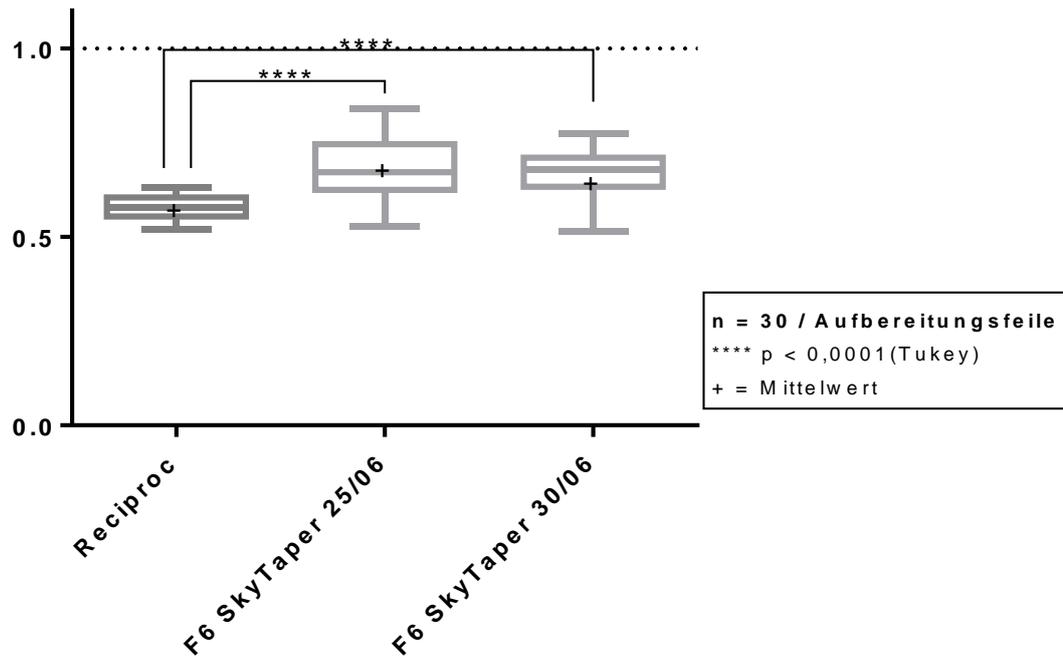


Diagramm 4: Darstellung des Abtragverhaltens der Systeme bei der Kanalkonfiguration 60R8

Bei der Betrachtung des arithmetischen Mittels in der nachstehenden Tabelle wird erkennbar, dass das Reciproc-System über den geringsten Wert ( $M = 0,581 \pm 0,031$ ) im Vergleich zu den beiden F6 SkyTaper-Systemen verfügt. Demzufolge wies das Reciproc-System bei der Kanalkonfiguration 60R8 den unregelmäßigsten Abtrag an den Kanalwänden auf. Die Mittelwerte der beiden F6 SkyTaper-Feilen unterscheiden sich kaum und demnach verhielten sich diese beiden Feilen ähnlich im Kanal ( $M_{F6\ 25/06} = 0,682 \pm 0,076$ ;  $M_{F6\ 30/06} = 0,677 \pm 0,061$ ), wobei die 25/06 Feile eine deutlich größere Streuung der Ergebnisse in Richtung Maximum zeigte ( $Max_{F6\ 25/06} = 0,841$ ;  $Max_{F6\ 30/06} = 0,774$ ). Beim Reciproc-System konnte die geringste Streuung der Ergebnisse ermittelt werden ( $SD = 0,031$ ), (Tabelle 11).

**Tabelle 11: Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 60R8 (Angaben in Pixel)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	30	30	30
Minimum	0,520	0,529	0,515
Median	0,578	0,671	0,678
Maximum	0,632	0,841	0,774
Mittelwert	0,581	0,682	0,667
Standardabweichung	0,031	0,076	0,061

Der Tukey Post-Hoc-Test zeigte eine signifikante Abweichung bezüglich des Abtrags an den Kanalwänden zwischen dem Reciproc- und dem F6 SkyTaper-System (25/06 und 30/06,  $p < 0,0001$ ). Ein signifikanter Unterschied zwischen den F6 SkyTaper-Feilen untereinander konnte jedoch nicht ermittelt werden ( $p = 0,667$ ), (Tabelle 12).

**Tabelle 12: Überprüfung auf Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen, Kanalkonfiguration: 60R8**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,101	Ja	< 0,0001	-0,138 - (-0,065)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	-0,087	Ja	< 0,0001	-0,123 - (-0,050)
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,015	Nein	0,6026	-0,022 - 0,051

### 3.2.2 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 60R5

Das folgende Diagramm zeigt den Vergleich des Abtragverhaltens an der inneren und äußeren Krümmung der in der Studie verwendeten Feilensysteme Reciproc und F6 SkyTaper bei den Wurzelkanälen mit einem Krümmungswinkel von  $60^\circ$  und einem Krümmungsradius von 5 mm (Diagramm 5).

### Abtragverhalten der Systeme bei der Kanalkonfiguration 60R5

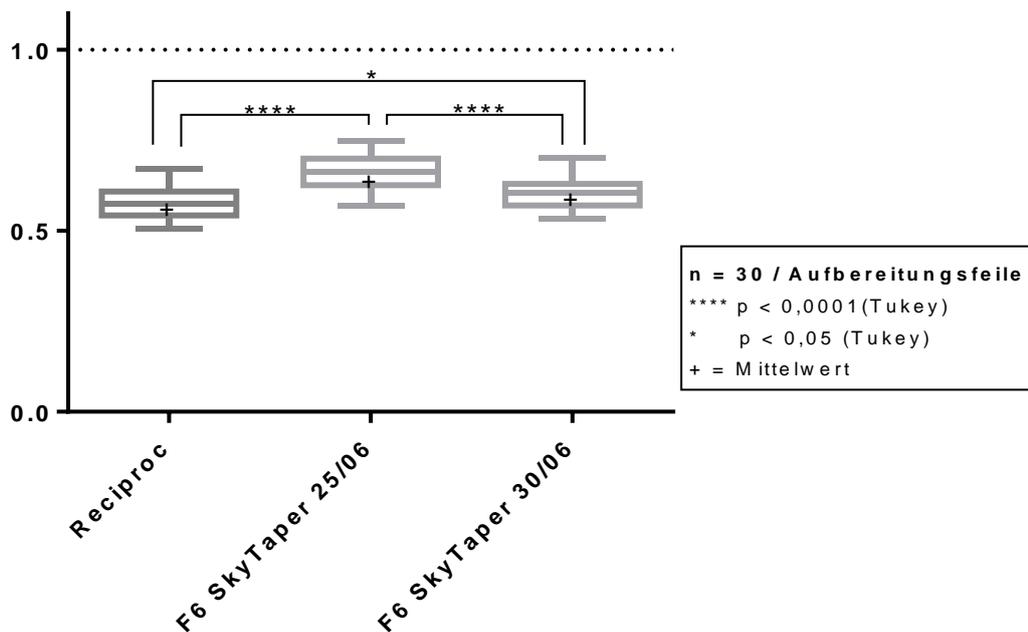


Diagramm 5: Darstellung des Abtragverhaltens der Systeme bei der Kanalkonfiguration 60R5

Die 25/06-Feile des SkyTaper-Systems wies bei den Wurzelkanälen mit einem Krümmungswinkel von  $60^\circ$  und einem Krümmungsradius von 5 mm den gleichmäßigsten Abtrag an den Kanalwänden gegenüber den anderen beiden Feilen auf ( $M_{F6\ 25/06} = 0,659 \pm 0,047$ ;  $M_{F6\ 30/06} = 0,604 \pm 0,043$ ;  $M_{Reciproc} = 0,575 \pm 0,042$ ). Die Streuung der Ergebnisse war bei allen drei Feilen ähnlich ( $SD_{Reciproc} = 0,042$ ;  $SD_{F6\ 25/06} = 0,047$ ;  $SD_{F6\ 30/06} = 0,043$ ), wobei sowohl die Reciproc-Feile als auch die 30/06-Feile eine geringere Streuung vom Median in Richtung Minimum zeigten (Diagramm 5), (Tabelle 13).

**Tabelle 13: Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 60R5 (Angaben in Pixel)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	30	30	30
Minimum	0,506	0,568	0,533
Median	0,574	0,661	0,604
Maximum	0,671	0,747	0,701
Mittelwert	0,575	0,659	0,604
Standardabweichung	0,042	0,047	0,043

Mittels des Tukey Post-Hoc-Tests konnte beim Vergleich des Abtragverhaltens des Reciproc-Systems mit dem 25/06-Aufbereitungsinstrument des F6 SkyTaper-Systems ( $p < 0,0001$ ) sowie der beiden Feilen des F6 SkyTaper-Systems untereinander ( $p = 0,0017$ ) eine hohe Signifikanz gezeigt werden. Gering signifikante Differenzen lassen sich in der vorliegenden Studie beim Vergleich des Reciproc-Systems zum F6 SkyTaper-System (30/06) finden ( $p = 0,0355$ ), (Tabelle 14).

**Tabelle 14: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 60R5**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,084	Ja	< 0,0001	-0,111 - (-0,057)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	-0,029	Ja	0,0355	-0,056 - (-0,002)
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,0554	Ja	< 0,0001	0,028 - 0,083

### 3.2.3 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 60R2

Der Vergleich des Abtragverhaltens an der inneren und äußeren Krümmung der in der Studie verwendeten Feilensysteme Reciproc und F6 SkyTaper bei den Wurzelkanälen mit einem Krümmungswinkel von  $60^\circ$  und einem Krümmungsradius von 2 mm werden im nächsten Diagramm gezeigt (Diagramm 6).

### Abtragverhalten der Systeme bei der Kanalkonfiguration 60R2

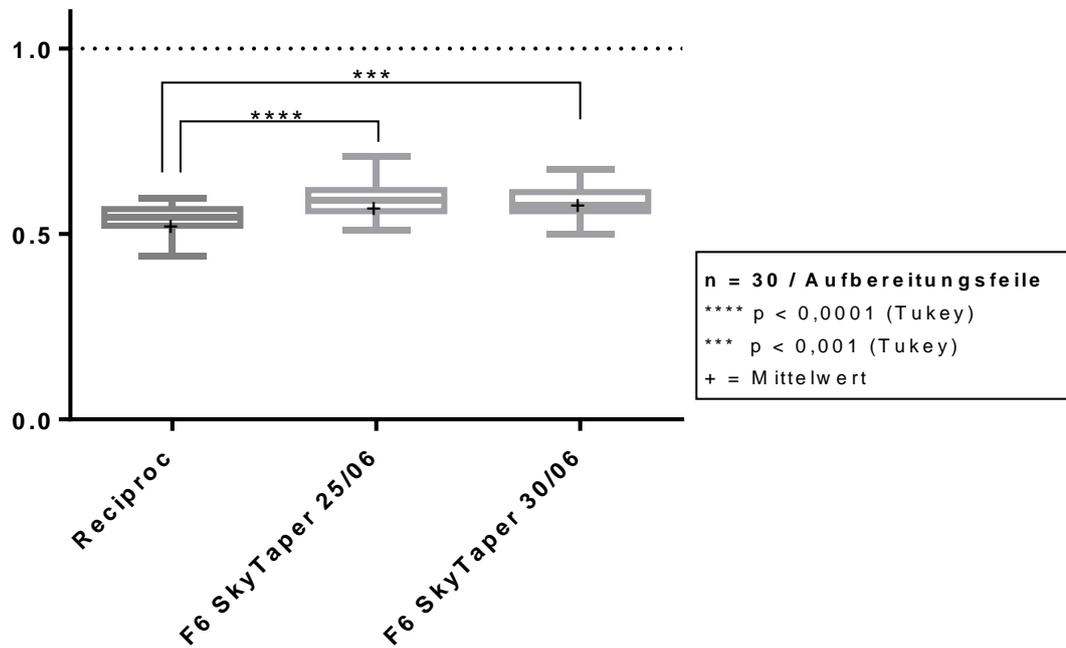


Diagramm 6: Darstellung des Abtragverhaltens der Systeme bei der Kanalkonfiguration 60R2

Bei Betrachtung der Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle 15 wird sichtbar, dass der Abtrag an der Innen- und Außenkurvatur bei der 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems im Mittel bei  $0,592 \pm 0,043$  liegt. Diese Aufbereitungsfeile wies damit den gleichmäßigsten Abtrag an der inneren und äußeren Kanalwand auf, gefolgt von der 30/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems ( $M = 0,586 \pm 0,040$ ). Das Reciproc-System zeigte bei dieser Kanalkonfiguration den unregelmäßigsten Abtrag mit der geringsten Streuung der Ergebnisse ( $M = 0,541 \pm 0,038$ ).

**Tabelle 15: Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 60R2 (Angaben in Pixel)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	30	30	30
Minimum	0,441	0,511	0,5
Median	0,546	0,591	0,576
Maximum	0,597	0,708	0,675
Mittelwert	0,541	0,592	0,586
Standardabweichung	0,038	0,043	0,040

Ein Vergleich des Reciproc-Systems mit dem F6 SkyTaper-System (25/06,30/06) mittels des Tukey Post-Hoc-Tests ergab für die Kanalkonfiguration 60R2 einen signifikanten Unterschied ( $p \leq 0,0001$ ). Der Vergleich der beiden F6 SkyTaper-Feilen untereinander zeigte keine signifikante Abweichung (Tabelle 16).

**Tabelle 16: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 60R2**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,051	Ja	< 0,0001	-0,076 - (-0,027)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	-0,045	Ja	0,0001	-0,070 - (-0,020)
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,006	Nein	0,8163	-0,018 - 0,031

### 3.2.4 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 45R8

Eine Gegenüberstellung der angewandten Aufbereitungsfeilen in Bezug auf das Abtragverhalten bei den Wurzelkanälen, die einen Krümmungswinkel von  $45^\circ$  und einen Krümmungsradius von 8 mm aufwiesen, wird im Diagramm 7 gezeigt.

### Abtragverhalten der Systeme bei der Kanalkonfiguration 45R8

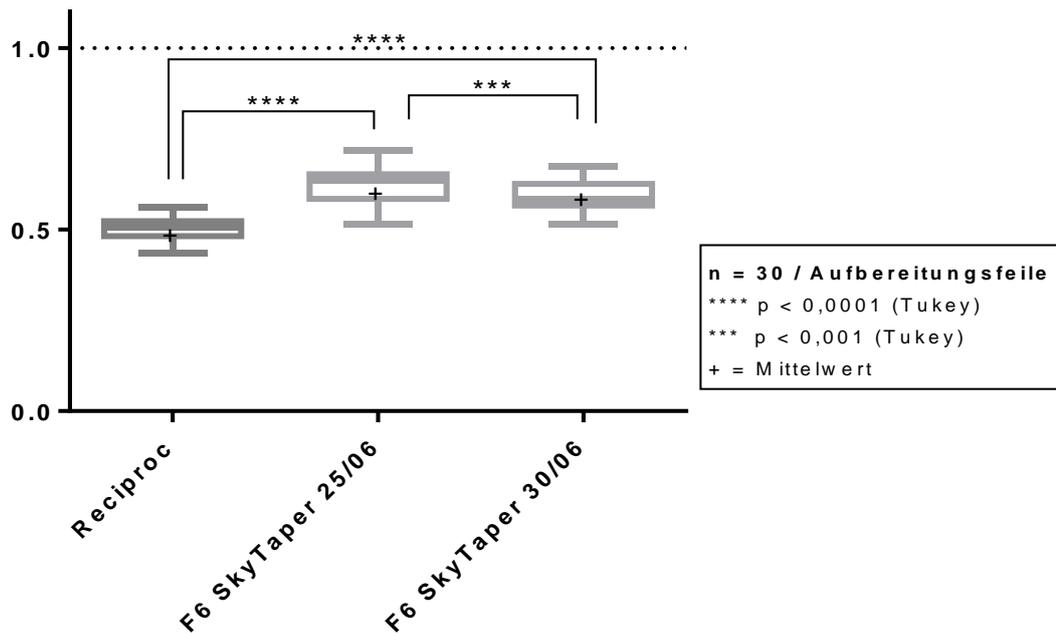


Diagramm 7: Darstellung des Abtragverhaltens der Systeme bei der Kanalkonfiguration 45R8

Die 25/06 Feile des F6 SkyTaper-Systems arbeitete am gleichmäßigsten im Kanal, gefolgt von der 30/06 Feile des gleichen Systems ( $M_{F6\ 25/06} = 0,627 \pm 0,046$ ;  $M_{F6\ 30/06} = 0,593 \pm 0,041$ ). Bei dieser Kanalkonfiguration zeigte das Reciproc-System die größte Abweichung in der Kanalaufbereitung, aber eine geringere Streuung gegenüber den Feilen des F6 SkyTaper-Systems ( $M_{Reciproc} = 0,505 \pm 0,032$ ), (Tabelle 17).

**Tabelle 17: Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 45R8 (Angaben in Pixel)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	30	30	30
Minimum	0,435	0,516	0,516
Median	0,505	0,635	0,585
Maximum	0,561	0,718	0,674
Mittelwert	0,505	0,627	0,593
Standardabweichung	0,032	0,046	0,041

Die reziproke Aufbereitung von Kanälen mit einem Krümmungswinkel von 45° und einen Krümmungsradius von 8 mm lieferte eine signifikant ungleichmäßigere Aufbereitung gegenüber dem vollrotierenden F6 SkyTaper-System (25/06 und 30/06) ( $p < 0,0001$ ). Ein signifikanter Unterschied zwischen den F6 SkyTaper-Feilen untereinander konnte ebenso gezeigt werden ( $p = 0,0035$ ), (Tabelle 18).

**Tabelle 18: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 45R8**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,123	Ja	< 0,0001	-0,148 – (-0,098)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	-0,088	Ja	< 0,0001	-0,113 - (-0,063)
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,035	Ja	0,0035	0,010 - 0,059

### 3.2.5 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 45R5

Der Vergleich beider Aufbereitungssysteme bezüglich des Abtrags an der Innen- und Außenkrümmung des Untersuchungskörpers wird im nachfolgenden Diagramm dargestellt (Diagramm 8). Die Kanalkonfiguration des Untersuchungskörpers wies einen Krümmungswinkel von 45° und einen Krümmungsradius von 5 mm auf.

### Abtragverhalten der Systeme bei der Kanalkonfiguration 45R5

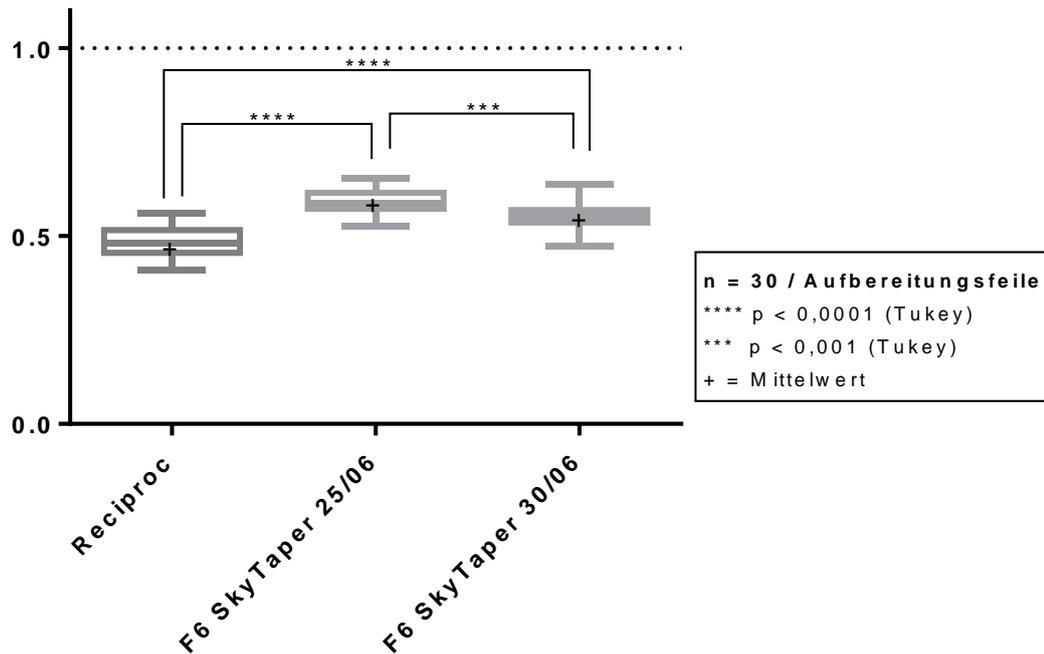


Diagramm 8: Darstellung des Abtragverhaltens der Systeme bei der Kanalkonfiguration 45R5

Das Abtragverhalten bei einer Wurzelkrümmung von 45° und einem Krümmungsradius von 5 mm lag im Durchschnitt bei der Versuchsgruppe A, dem Reciproc-System, bei  $0,482 \pm 0,041$ . Diese Gruppe wies damit den ungleichmäßigsten Abtrag entlang des Wurzelkanals auf. Die 30/06-Feile der Versuchsgruppe B bildete mit einem Mittelwert von  $0,555 \pm 0,034$  die Mitte der drei Aufbereitungsfeilen. Mittels der 25/06 Feile des F6 SkyTaper-Systems konnte die größte Homogenität in der Gleichmäßigkeit des Abtrags an den Kanalwänden gegenüber den anderen beiden Feilen erzielt werden ( $M = 0,591 \pm 0,033$ ). Beim Vergleich der Streuraten zeigte Reciproc gegenüber F6 SkyTaper (25/06 + 30/06) eine größere Streuung der Ergebnisse ( $SD_{\text{Reciproc}} = 0,041$ ;  $SD_{\text{F6 25/06}} = 0,033$ ;  $SD_{\text{F6 30/06}} = 0,034$ ), (Tabelle 19).

**Tabelle 19: Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 45R5 (Angaben in Pixel)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	30	30	30
Minimum	0,409	0,526	0,472
Median	0,480	0,586	0,554
Maximum	0,559	0,653	0,637
Mittelwert	0,482	0,591	0,555
Standardabweichung	0,041	0,033	0,034

Ein Vergleich des Reciproc-Systems mit dem F6 SkyTaper-System (25/06, 30/06) mithilfe des Tukey Post-Hoc-Tests ergab für die Kanalkonfiguration 45R5 einen hoch signifikanten Unterschied ( $p < 0,0001$ ) in Bezug auf das Abtragverhalten an der Innen- und Außenkrümmung. Die Betrachtung der beiden Feilen des F6 SkyTaper-Systems, 25/06 und 30/06, zeigte einen signifikanten Unterschied von  $p = 0,0004$  (Tabelle 20).

**Tabelle 20: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration 45R5**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,109	Ja	$< 0,0001$	-0,131 - (-0,087)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	-0,072	Ja	$< 0,0001$	-0,094 – (-0,050)
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,037	Ja	0,0004	0,0147 - 0,059

### 3.2.6 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 45R2

Das Abtragverhalten an der Innen- und Außenkrümmung der in der Studie verwendeten Feilensysteme, Reciproc und F6 SkyTaper (25/06, 30/06), bei den Wurzelkanälen mit einem Krümmungswinkel von  $45^\circ$  und einem Krümmungsradius von 2 mm wird im folgenden Diagramm gezeigt (Diagramm 9).

### Abtragverhalten der Systeme bei der Kanalkonfiguration 45R2

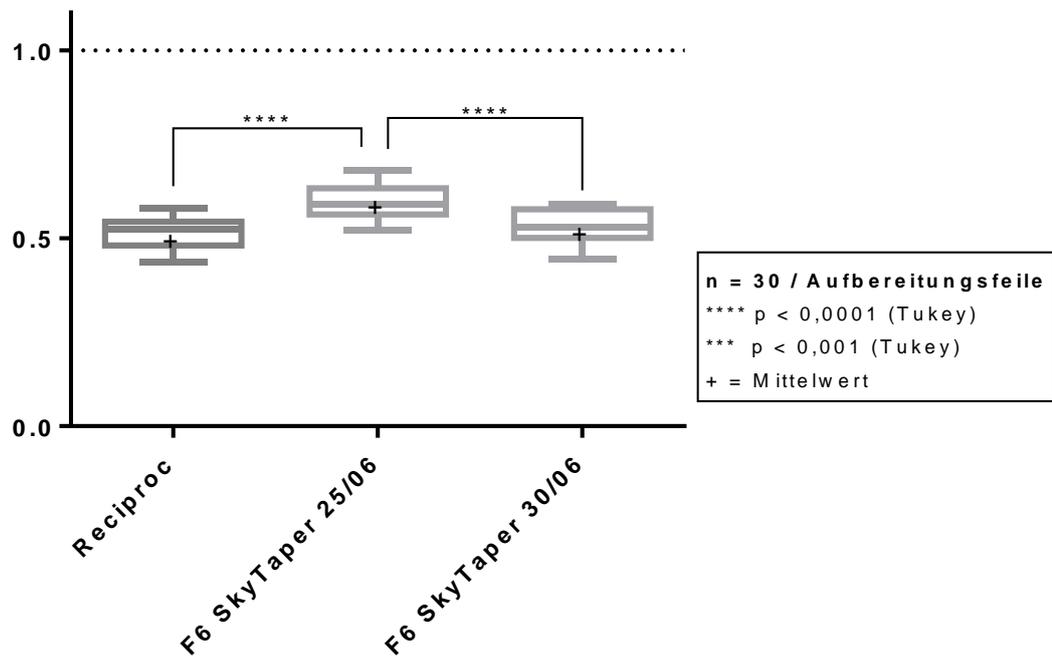


Diagramm 9: Darstellung des Abtragverhaltens der Systeme bei der Kanalkonfiguration 45R2

Die in Tabelle 21 dargestellten Ergebnisse veranschaulichen, dass der Abtrag an der Innen- und Außenkurvatur bei den Wurzelkanälen mit der Kanalkonfiguration 45R2 mittels der 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems am gleichmäßigsten war ( $M = 0,595 \pm 0,044$ ). Die 30/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems und die Reciproc-Feile wiesen ein ähnliches Abtragverhalten an den Kanalwänden auf ( $M_{F6\ 30/06} = 0,532 \pm 0,044$ ;  $M_{Reciproc} = 0,516 \pm 0,040$ ). Die Streurrate der drei Aufbereitungsfeilen war bei dieser Kanalkonfiguration annähernd gleich ( $SD_{Reciproc} = 0,040$ ;  $SD_{F6\ 25/06+F6\ 30/06} = 0,044$ ).

**Tabelle 21: Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 45R2 (Angaben in Pixel)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	30	30	30
Minimum	0,436	0,521	0,444
Median	0,525	0,591	0,531
Maximum	0,579	0,681	0,591
Mittelwert	0,516	0,595	0,532
Standardabweichung	0,040	0,044	0,044

Mittels des Tukey Post-Hoc-Tests konnte beim Vergleich des Abtragverhaltens des Reciproc-Systems mit dem 25/06-Aufbereitungsinstrument des F6 SkyTaper-Systems ( $p < 0,0001$ ) sowie der beiden Feilen des SkyTaper-Systems untereinander ( $p < 0,0001$ ) eine hohe Signifikanz gezeigt werden. Signifikante Unterschiede beim Vergleich des Reciproc-Systems zum F6 SkyTaper-System (30/06) ließen sich in der vorliegenden Studie in Bezug auf das Abtragverhalten nicht finden (Tabelle 22).

**Tabelle 22: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration 45R2**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,079	Ja	< 0,0001	-0,105 - (-0,053)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	-0,017	Nein	0,2878	-0,043 - 0,010
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,062	Ja	< 0,0001	0,036 - 0,088

### 3.2.7 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 30R8

Im folgenden Diagramm wird das Abtragverhalten der untersuchten Feilen an den Wurzelkanälen mit dem kleinsten Krümmungswinkel von 30° und dem größten Krümmungsradius von 8 mm dargestellt (Diagramm 10).

### Abtragverhalten der Systeme bei der Kanalkonfiguration 30R8

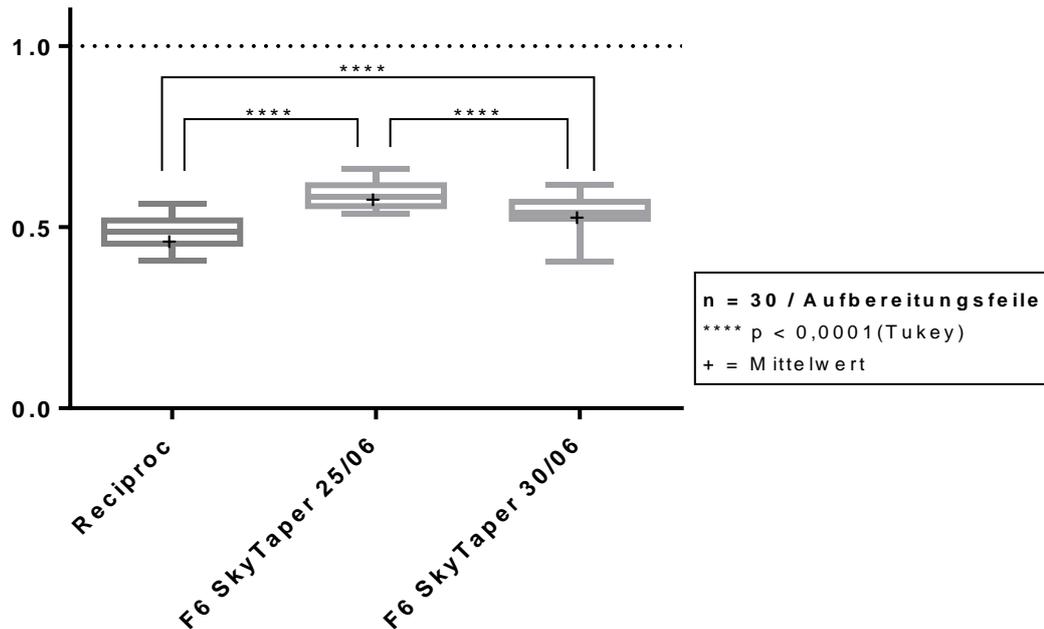


Diagramm 10: Darstellung des Abtragverhaltens der Systeme bei der Kanalkonfiguration 30R8

Bei der Betrachtung der Mittelwerte in der nachfolgenden Tabelle zeigt sich, dass die 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems mit  $0,589 \pm 0,037$  den höchsten Wert im Vergleich zu der 30/06-Feile desselben Systems und der Reciproc-Feile aufweist ( $M_{F6\ 30/06} = 0,541 \pm 0,042$ ;  $M_{Reciproc} = 0,483 \pm 0,042$ ). Demzufolge fand der zirkumferente Abtrag an den Kanalwänden mittels der 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems am gleichmäßigsten statt, gefolgt von der 30/06-Feile. Das Reciproc-System arbeitete am wenigsten zentriert im Kanal und wies damit die unregelmäßigste Aufbereitung der inneren und äußeren Kanalwände auf. Die Streuung der Ergebnisse war bei den drei Feilen recht ähnlich, jedoch mit einem Maximalwert von 0,661 ließ sich die höchste Streuung Richtung Maximum bei der Aufbereitung mit der 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems erzielen (Tabelle 23).

**Tabelle 23: Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 30R8 (Angaben in Pixel)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	30	30	30
Minimum	0,409	0,536	0,406
Median	0,487	0,584	0,540
Maximum	0,565	0,661	0,617
Mittelwert	0,483	0,589	0,541
Standardabweichung	0,042	0,037	0,042

Sowohl der Vergleich des Reciproc-Systems mit dem F6 SkyTaper-System (25/06, 30/06) als auch der Vergleich der beiden Feilen des F6 SkyTaper-Systems, 25/06 und 30/06, mittels des Tukey Post-Hoc-Tests ergab für die Kanalkonfiguration 30R8 einen hoch signifikanten Unterschied ( $p < 0,0001$ ) in Bezug auf den Abtrag an der inneren und äußeren Kanalwand (Tabelle 24).

**Tabelle 24: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 30R8**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,106	Ja	< 0,0001	-0,131 - (-0,081)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	-0,058	Ja	< 0,0001	-0,083 - (-0,033)
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,048	Ja	< 0,0001	0,023 - 0,073

### 3.2.8 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 30R5

Anschließend erfolgte der Vergleich des Abtrags der drei Feilen an den Untersuchungsblöcken, deren Wurzelkanäle einen Krümmungswinkel von 30° und einen Krümmungsradius von 5 mm aufwiesen. Im Diagramm 11 wird der Abtrag, wiederum gemessen entlang des gesamten Wurzelkanals, gezeigt.

**Abtragverhalten der Systeme bei der Kanalkonfiguration 30R5**

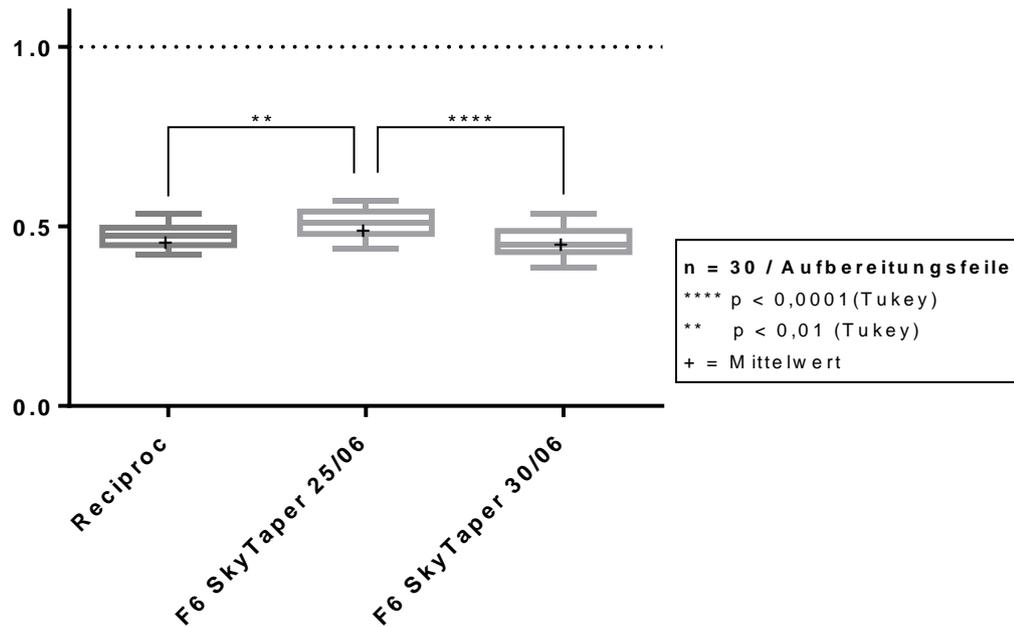


Diagramm 11: Darstellung des Abtragverhaltens der Systeme bei der Kanalkonfiguration 30R5

Mit der 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems blieb bei den Wurzelkanälen mit einem Krümmungswinkel von 30° und einem Krümmungsradius von 5 mm die Form des Kanals gegenüber den anderen beiden Feilen am besten erhalten ( $M_{F6\ 25/06} = 0,508 \pm 0,037$ ;  $M_{F6\ 30/06} = 0,456 \pm 0,037$ ;  $M_{Reciproc} = 0,474 \pm 0,031$ ). Die 30/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems und die Reciproc-Feile zeigten einen ähnlich inhomogenen Abtrag an den Kanalwänden. Alle drei Aufbereitungsfeilen wiesen eine ähnlich große Streuung der Ergebnisse auf (Tabelle 25).

**Tabelle 25: Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 30R5 (Angaben in Pixel)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	30	30	30
Minimum	0,422	0,438	0,386
Median	0,475	0,510	0,448
Maximum	0,534	0,571	0,534
Mittelwert	0,474	0,508	0,456
Standardabweichung	0,031	0,037	0,037

Der Tukey Post-Hoc-Test zeigte einen signifikanten Unterschied beim Abtragverhalten zwischen dem Reciproc und dem F6 SkyTaper-System (25/06) sowie bei den beiden Feilen des F6 SkyTaper-Systems untereinander ( $p_{\text{Reciproc vs. F6 25/06}} = 0,0011$ ;  $p_{\text{F6 25/06 vs. F6 30/06}} < 0,0001$ ). Ein signifikanter Unterschied zwischen dem Reciproc-System und der 30/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems konnte jedoch nicht gefunden werden (Tabelle 26).

**Tabelle 26: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration 30R5**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,034	Ja	0,0011	-0,055 – (-0,012)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	0,018	Nein	0,1271	-0,004 - 0,039
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,051	Ja	< 0,0001	0,030 - 0,073

### 3.2.9 Auswertung der Versuchskörper mit der Kanalkonfiguration 30R2

Der Kanal des Untersuchungskörpers mit der Kanalkonfiguration 30R2 war sowohl mit dem kleinsten Krümmungswinkel ( $30^\circ$ ) als auch mit dem kleinsten Krümmungsradius (2 mm) versehen. Der Vergleich der Aufbereitungssysteme bezüglich des Abtrags an der äußeren und inneren Kanalwand wird im nachfolgenden Diagramm dargestellt (Diagramm 12).

### Abtragverhalten der Systeme bei der Kanalkonfiguration 30R2

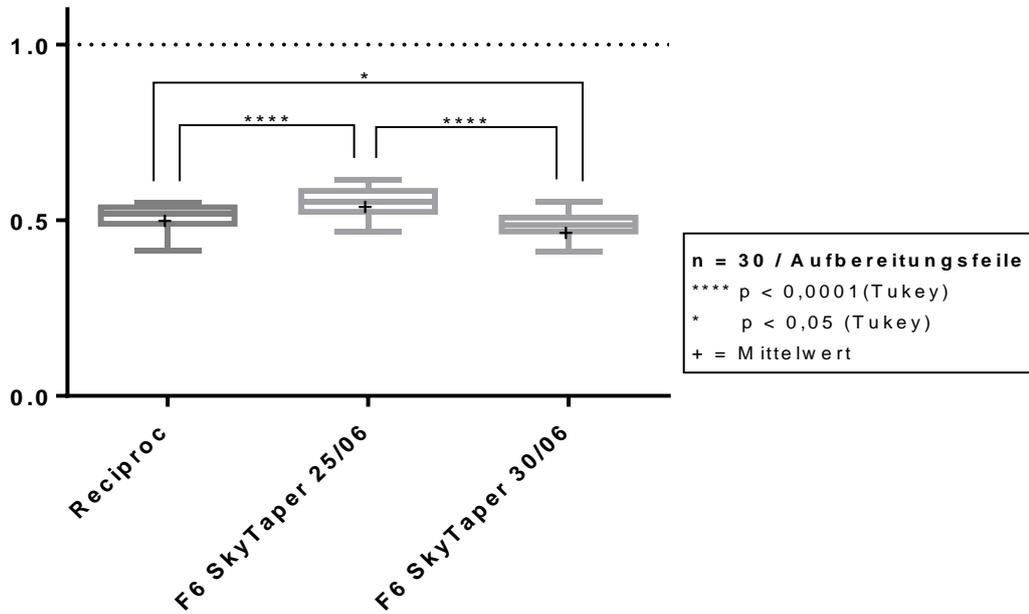


Diagramm 12: Darstellung des Abtragverhaltens der Systeme bei der Kanalkonfiguration 30R2

Bei der Analyse der Mittelwerte in der nachfolgenden Tabelle 27 zeigt sich, dass die 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems mit  $0,552 \pm 0,036$  den höchsten Wert im Vergleich zu der Reciproc-Feile und der 30/06-Feile des gleichen Systems aufweist ( $M_{\text{Reciproc}} = 0,509 \pm 0,036$ ;  $M_{\text{F6 30/06}} = 0,486 \pm 0,031$ ). Demzufolge erfolgte die Aufbereitung mittels der 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems am homogensten, gefolgt von der Reciproc-Feile. Die 30/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems konnte die gleichmäßige Form des Kanalverlaufs am schlechtesten erhalten. Bei der Aufbereitung mit der 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems wurde sowohl die größte Streubreite der Ergebnisse insgesamt als auch die höchste Streuung Richtung Maximum nachgewiesen ( $SD = 0,040$ ;  $Max = 0,615$ ).

**Tabelle 27: Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 30R2 (Angaben in Pixel)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	30	30	30
Minimum	0,412	0,466	0,409
Median	0,519	0,551	0,486
Maximum	0,549	0,615	0,554
Mittelwert	0,509	0,552	0,486
Standardabweichung	0,036	0,040	0,031

Ein Vergleich des Reciproc-Systems mit dem F6 SkyTaper-System (25/06) sowie der Vergleich der 25/06- und der 30/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems mittels des Tukey Post-Hoc-Tests ergab für die Kanalkonfiguration 30R2 einen hoch signifikanten Unterschied bezüglich der Regelmäßigkeit der Aufbereitung der Kanalwände ( $p < 0,0001$ ). Beim Vergleich der Reciproc-Feile mit der 30/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems konnte ebenfalls ein signifikanter Unterschied ( $p = 0,0401$ ) in Bezug auf den Abtrag an der Innen- und Außenkurvatur festgestellt werden (Tabelle 28).

**Tabelle 28: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 30R2**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,043	Ja	< 0,0001	-0,065 - (-0,021)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	0,023	Ja	0,0401	0,0008 - 0,045
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,066	Ja	< 0,0001	0,044 - 0,088

### 3.3 Auswertung der Feilensysteme gegeneinander, über alle Untersuchungsblöcke

In der nächsten Auswertungsreihe wurden die in der Studie verwendeten Aufbereitungsfeilen in Bezug auf ihre Abtragqualität erneut miteinander verglichen. Hierbei erfolgte die Evaluation aller 270 Untersuchungsblöcke je Feilensystem ohne Berücksichtigung der einzelnen Kanalformen.

Mit der einfaktoriellen Varianzanalyse (One-Way ANOVA) konnten hochsignifikante Abweichungen zwischen den Feilen ermittelt werden ( $p < 0,0001$ ).

Abtragverhalten der Systeme gegeneinander über alle Blöcke

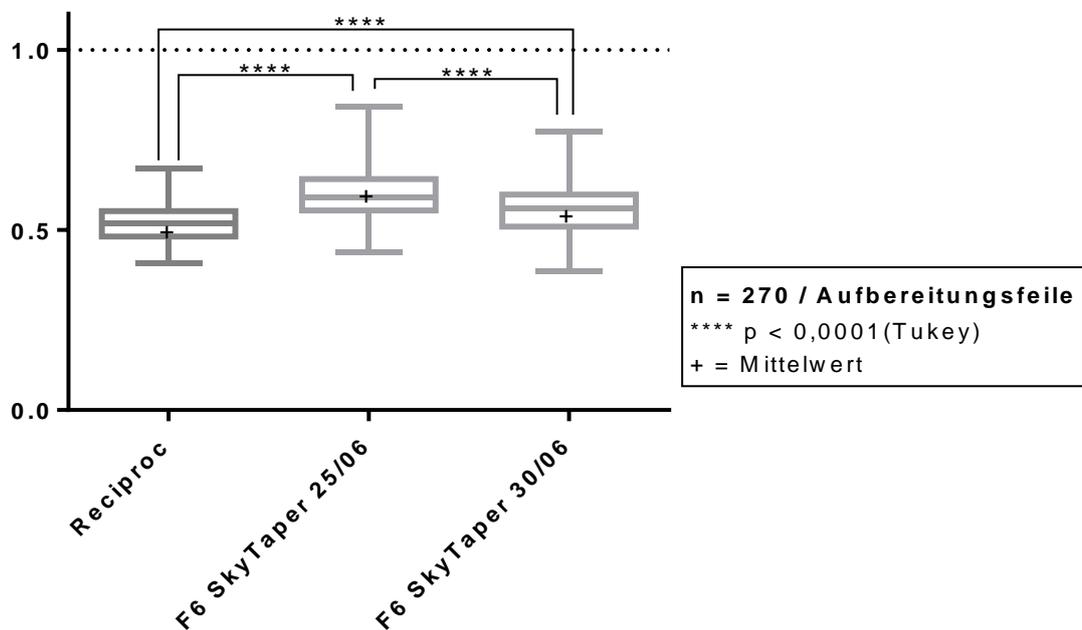


Diagramm 13: Darstellung des Abtragverhaltens der drei Aufbereitungsfeilen über alle Untersuchungsblöcke (n = 270 je Feile)

Die Betrachtung des Diagramm 13 und der Ergebnisse in der nachstehenden Tabelle zeigen, dass die Aufbereitung mit der 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems am gleichmäßigsten gegenüber den anderen beiden Feilen erfolgte ( $M_{F6\ 25/06} = 0,599 \pm 0,067$ ;  $M_{F6\ 30/06} = 0,558 \pm 0,073$ ;  $M_{Reciproc} = 0,518 \pm 0,052$ ). Das Reciproc-System arbeitete im Kanal am ungleichmäßigsten, wies jedoch die geringste Streuung der Werte auf ( $SD = 0,052$ ), (Tabelle 29).

**Tabelle 29: Abtragverhalten der drei verwendeten Feilen über alle Untersuchungsblöcke (n = 270 je Feile)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06
Anzahl der Probekörper	270	270	270
Minimum	0,409	0,438	0,386
Median	0,520	0,592	0,559
Maximum	0,671	0,841	0,774
Mittelwert	0,518	0,599	0,558
Standardabweichung	0,052	0,067	0,073

Sowohl der Vergleich des Reciproc-Systems mit dem F6 SkyTaper-System (25/06, 30/06) als auch der Vergleich der beiden Feilen des F6 SkyTaper-Systems, 25/06 und 30/06, mittels des Tukey Post-Hoc-Tests, ergab einen hochsignifikanten Unterschied ( $p < 0,0001$ ) in Bezug auf den Abtrag an der Innen- und Außenkurvatur (Tabelle 30).

**Tabelle 30: Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den drei verwendeten Feilen über alle Untersuchungsblöcke (n = 270 je Feile)**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Pixel	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06	-0,081	Ja	< 0,0001	-0,094 - (-0,068)
Reciproc vs. F6 SkyTaper 30/06	-0,039	Ja	< 0,0001	-0,053 - (-0,026)
F6 SkyTaper 25/06 vs. F6 SkyTaper 30/06	0,042	Ja	< 0,0001	0,029 - 0,055

### 3.4 Aufbereitungszeit

In der letzten Auswertungsreihe wurde zum einen die Aufbereitungszeit der unterschiedlichen Feilen gegeneinander verglichen und zum anderen erfolgte die Auswertung der Aufbereitungszeit für die verschiedenen Kanalkonfigurationen je Aufbereitungssystem. Die Aufbereitungszeit beinhaltete sowohl die Zeit der

eigentlichen maschinellen Aufbereitung als auch das zwischenzeitliche Spülen und das Rekapitulieren des Wurzelkanals. Die manuelle Herstellung des Gleitpfades floss nicht in die Aufbereitungszeit mit ein.

### 3.4.1 Vergleich der Aufbereitungszeiten der beiden Aufbereitungssysteme

Im Diagramm 14 wird die Aufbereitungszeit der beiden Feilensysteme miteinander verglichen und die Streubreiten dargestellt.

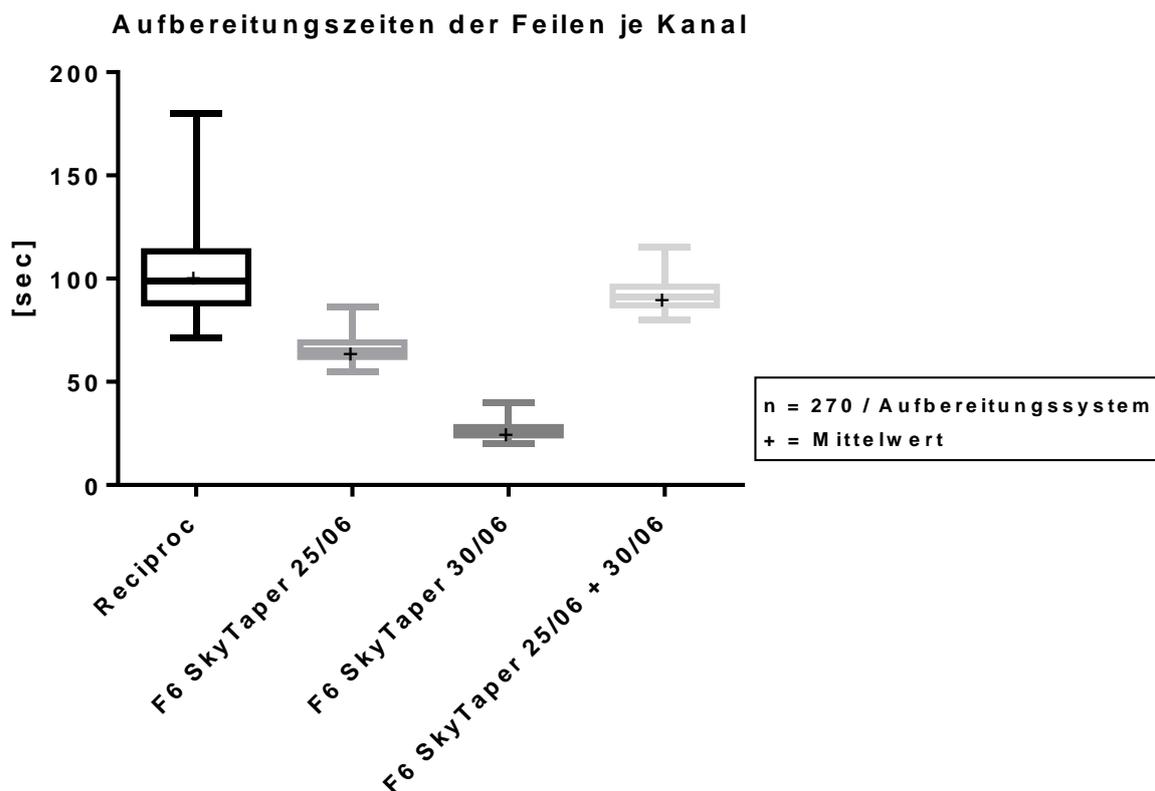


Diagramm 14: Darstellung der Aufbereitungszeiten (in Sek.) der verschiedenen Feilensysteme je Kanal

Mithilfe der einfaktoriellen ANOVA-Varianzanalyse konnte ein statistisch signifikanter Unterschied ( $p < 0,0001$ ) in der Aufbereitungszeit der beiden Aufbereitungssysteme, Reciproc und F6 SkyTaper, ermittelt werden.

Die berechnete mittlere Aufbereitungszeit bis zum Erreichen der vollen Aufbereitungslänge ergab beim Reciproc-System 103 Sekunden, während die Aufbereitung mit der F6 SkyTaper Feile 25/06 durchschnittlich in 66 Sekunden erfolgte. Das Fortführen der Aufbereitung mit der F6 SkyTaper-Feile 30/06 betrug im

Mittel 26 Sekunden. Dies ergab eine durchschnittliche Aufbereitungszeit mittels des F6 SkyTaper-Systems (25/06 + 30/06) von insgesamt 92 Sekunden, 11 Sekunden weniger als mit dem Reciproc-System. Beim Vergleich der Streurate bezüglich der Aufbereitungszeit zeigte Reciproc gegenüber F6 SkyTaper (25/06 + 30/06) die deutlich größere Streuung der Ergebnisse (SD = 21 Sekunden), (Tabelle 31).

**Tabelle 31: Gesamte Aufbereitungszeit je Aufbereitungssystem (Angaben in Sek.)**

Statistik	Reciproc	F6 SkyTaper 25/06	F6 SkyTaper 30/06	F6 SkyTaper 25/06+30/06
Anzahl der Probekörper	270	270	270	270
Minimum	71,00	55,00	20,00	80,00
Median	99,00	65,00	26,00	91,00
Maximum	180,0	86,00	40,00	115,0
Mittelwert	103,0	65,80	26,33	92,12
Standardabweichung	20,7	5,83	3,67	6,64

Der Tukey Post-Hoc-Test ergab einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,0001$ ) bei der Aufbereitungszeit zwischen dem Reciproc und dem F6 SkyTaper-System (25/06 + 30/06), (Tabelle 32).

**Tabelle 32: Überprüfung der Signifikanz der gesamten Aufbereitungszeit zwischen dem Reciproc- und dem F6 SkyTaper-System (25/06 + 30/06)**

Tukey Post-Hoc-Test	Mittlerer Unterschied in Sekunden	Signifikanz $p < 0.05$	p-Wert	95% Konfidenzintervall für die mittlere Differenz
Reciproc vs. F6 SkyTaper 25/06 + 30/06	10,89	Ja	< 0,0001	8,367 - 13,41

### 3.4.2 Aufbereitungszeiten Reciproc

Das nachstehende Diagramm zeigt den Vergleich der Aufbereitungszeiten des Reciproc-Systems je Kanalkonfiguration (Diagramm. 15).

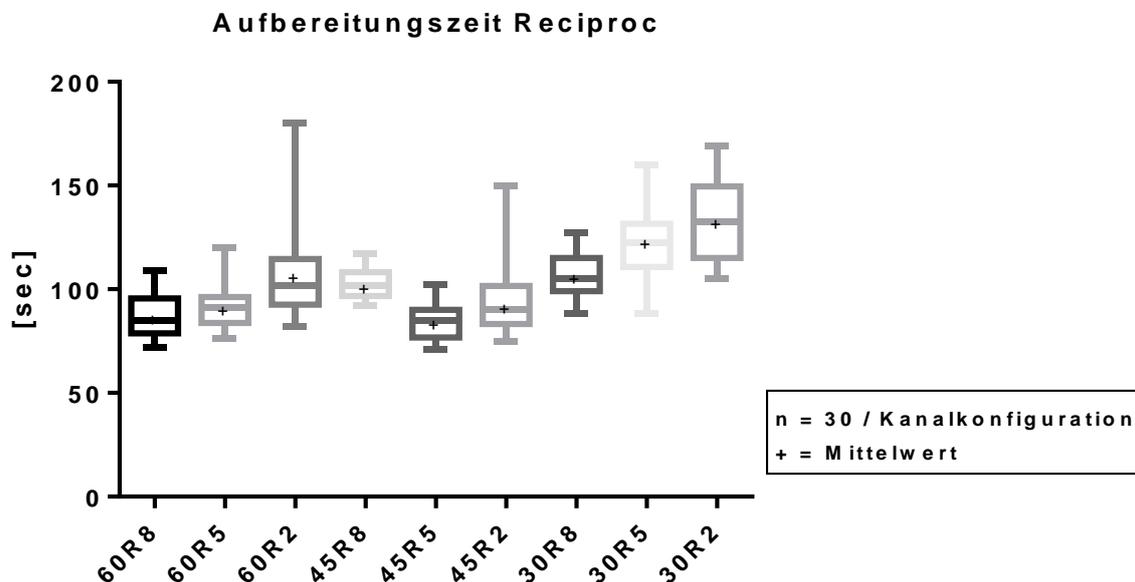


Diagramm. 15: Darstellung der Aufbereitungszeiten des Reciproc-Systems (25/08) je Kanalkonfiguration (in Sek.)

Ein signifikanter Unterschied zwischen den unterschiedlichen Kanalkonfigurationen bezüglich der Aufbereitungszeit konnte mittels der einfaktoriellen Varianzanalyse (One-Way ANOVA) ermittelt werden ( $p > 0,0001$ ).

Sowohl die graphische Darstellung als auch die Ergebnisse der nachstehenden Tabelle 33 legen dar, dass die Aufbereitung mit Reciproc bei den Untersuchungsblöcken mit der Kanalkonfiguration 45R5 im Durchschnitt mit  $84 \pm 8$  Sekunden am schnellsten durchgeführt wurde, dicht gefolgt mit  $86 \pm 9$  Sekunden von den Probekörpern, die mit der Kanalkonfiguration 60R8 ausgestattet waren. Am längsten hingegen dauerte die Aufbereitung der Untersuchungsblöcke mit der Kanalkonfiguration 30R2. Bei dieser Gruppe lag die durchschnittliche Aufbereitungszeit bei 133 Sekunden. Die größte Streuung wurde in der Gruppe mit der Kanalkonfiguration 60R2 erreicht (SD = 21 Sekunden). Die geringste Streubreite zeigte die Gruppe der Untersuchungsblöcke, die einen Krümmungswinkel von  $45^\circ$  und einen Krümmungsradius von 8 mm aufwiesen (SD = 6 Sekunden).

**Tabelle 33: Aufbereitungszeit Reciproc (25/08) je Kanalkonfiguration (Angaben in Sek.)**

Kanal-konfiguration	60R8	60R5	60R2	45R8	45R5	45R2	30R8	30R5	30R2
Anzahl der Probekörper	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Minimum	72,0	76,0	82,0	92,0	71,0	75,0	88,0	88,0	105
Median	85,0	91,0	102	102	85,0	90,0	105	123	133
Maximum	109	120	180	117	102	150	127	160	169
Mittelwert	86,2	91,1	107	102	83,9	93,2	107	124	133
Standard-abweichung	9,21	8,99	20,8	6,49	7,62	15,5	9,85	15,8	18,5

### 3.4.3 Aufbereitungszeiten F6 SkyTaper (25/06 + 30/06)

Der Vergleich der Aufbereitungszeiten des F6 SkyTaper-Systems (25/06 + 30/06) bezüglich der neun verschiedenen Kanalanatomien wird im nachfolgenden Diagramm dargestellt (Diagramm 16).

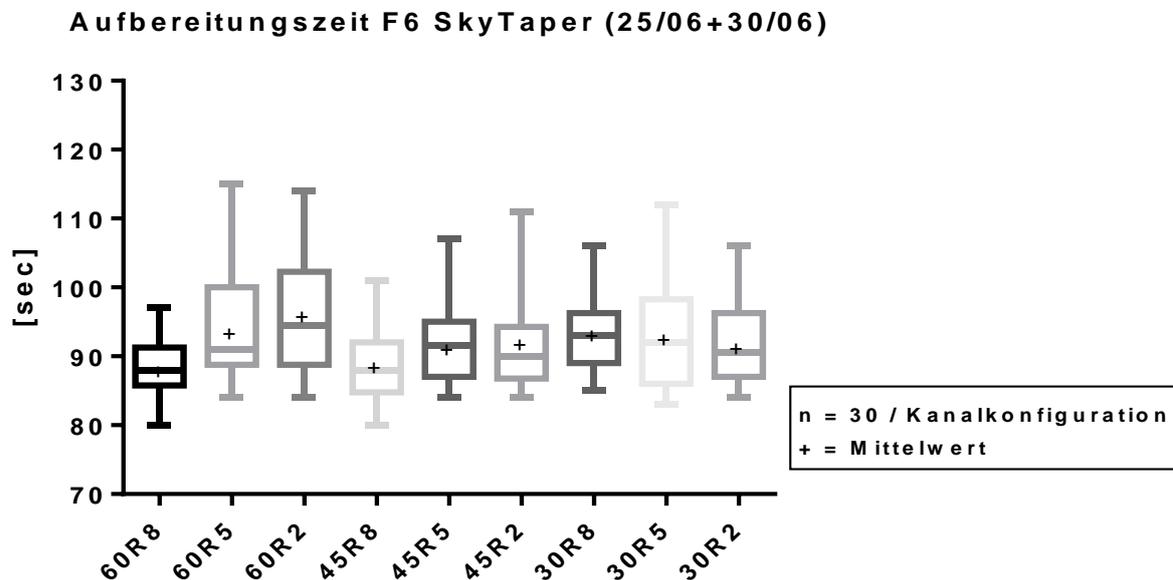


Diagramm 16: Darstellung der Aufbereitungszeiten des F6 SkyTaper-Systems (25/06 + 30/06) je Kanalkonfiguration (in Sek.)

Mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse ANOVA konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen in der Aufbereitungszeit gezeigt werden ( $p < 0,0001$ ).

Bei der Analyse der Mittelwerte in der nachfolgenden Tabelle 34 zeigt sich, dass die Aufbereitungszeiten recht ähnliche Werte aufweisen. Das höchste Ergebnis, damit die im Durchschnitt längste Aufbereitungszeit, weist die Gruppe mit der Kanalkonfiguration 60R2 auf, gefolgt von der Einheit mit der Kanalkonfiguration 60R5 ( $M_{60R2} = 96 \pm 4$  Sekunden;  $M_{60R5} = 94 \pm 8$  Sekunden). Die durchschnittlich schnellste Aufbereitungszeit wiesen die Untersuchungskörper auf, deren Wurzelkanäle in einem Winkel von  $60^\circ$  und einem Radius von 8 mm gekrümmt waren, gefolgt von den Kanälen mit einer Kanalkonfiguration 45R8 ( $M_{60R8} = 88 \pm 4$  Sekunden,  $M_{45R8} = 89 \pm 5$  Sekunden). Zudem wiesen die Kanäle mit der Kanalkonfiguration 60R8 die geringste Streuung der Ergebnisse auf ( $SD = 4$  Sekunden). Die Kanäle mit der Kanalkonfiguration 60R2 zeigten hingegen die höchste Streubreite bezüglich der Aufbereitungszeit, dicht gefolgt von den Kanalkonfigurationen 60R5 und 30R5 ( $SD = \text{ca. } 8$  Sekunden).

**Tabelle 34: Aufbereitungszeit F6 SkyTaper-System (25/06 + 30/06) je Kanalkonfiguration (Angaben in Sek.)**

Statistik	60R8	60R5	60R2	45R8	45R5	45R2	30R8	30R5	30R2
Anzahl der Probekörper	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Minimum	80,0	84,0	84,0	80,0	84,0	84,0	85,0	83,0	84,0
Median	88,0	91,0	94,5	88,0	91,5	90,0	93,0	92,0	90,5
Maximum	97,0	115	114	101	107	111	106	112	106
Mittelwert	88,4	94,2	95,8	88,8	91,6	92,0	93,5	92,9	91,9
Standardabweichung	4,15	7,62	8,09	4,99	4,95	7,09	5,92	7,61	5,35

### 3.5 Nebenauswertung (Stufenbildung, Frakturen)

Bei keinem der Systeme kam es zur Feilenfraktur beziehungsweise dauerhaften Deformationen während der Aufbereitung. Eine Veränderung der Kanal Anatomie durch Stufenbildung, in Verbindung mit anschließendem Verlust der Arbeitslänge,

konnte bei drei Untersuchungsblöcken der Reciproc-Gruppe und bei einem Kunststoffblock der 30/06-Feile der F6 SkyTaper-Gruppe festgestellt werden (Abbildung 22, Abbildung 23). Die Stufenbildung fand in diesen vier Fällen bei den Untersuchungsblöcken, die einen Krümmungswinkel von 60° und einen Krümmungsradius von 2 mm aufwiesen, statt (Diagramm 17).

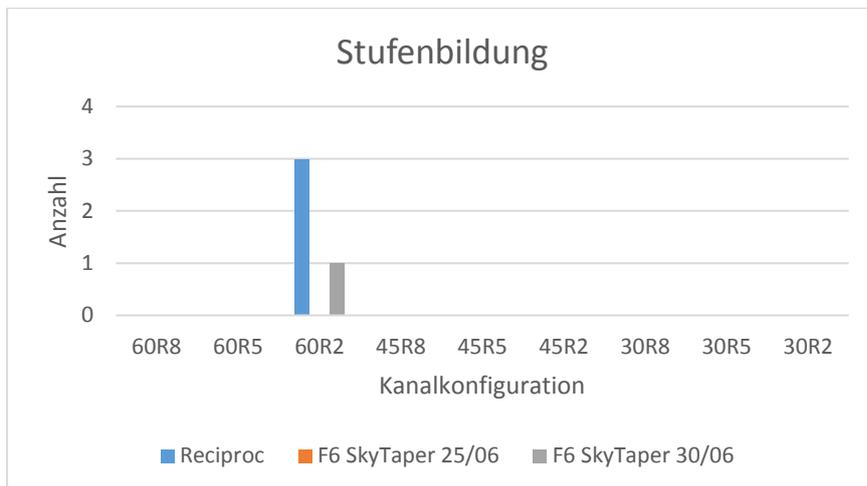


Diagramm 17: Anzahl der Stufenbildung der verschiedenen Systeme je Kanalkonfiguration



Abbildung 22: Stufenbildung Reciproc-Gruppe (25/08), Kanalkonfiguration: 60R2



Abbildung 23: Stufenbildung F6 SkyTaper-Gruppe (30/06), Kanalkonfiguration: 60R2

## 4 Diskussion

Die Endodontie ist ein Teilbereich der konservierenden Zahnheilkunde, der sich schwerpunktmäßig mit Erkrankungen des Pulpa-Dentin-Komplexes und des periapikalen Gewebes beschäftigt. Erste Hinweise auf die Behandlung von Pulpaerkrankungen finden sich bereits vor mehr als 4000 Jahren (HÜLSMANN 1996). Die Endodontie weist somit eine lange Beständigkeit in der Geschichte der Zahnmedizin auf und befindet sich im fortlaufenden Wandel, der durch die Entwicklung neuer Instrumente, Materialien, Techniken und durch den Gewinn neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse ständig verbessert wird. Den Grundstein zur Aufbereitung von stark gekrümmten Wurzelkanälen legte 1988 Walia et al. durch die Einführung von hochflexiblen und zugleich widerstandsfähigen Nickel-Titan-Instrumenten (WALIA et al. 1988). Aktuell gibt es eine erhebliche Anzahl unterschiedlichster maschineller Nickel-Titan-Feilensysteme von verschiedenen Herstellern, die sich in ihrer Feilengeometrie, dem Material und der Art der empfohlenen Aufbereitungstechnik voneinander unterscheiden (THOMPSON 2000). Diese enorm große Auswahl an verschiedenen Aufbereitungssystemen macht es notwendig, vergleichende Studien durchzuführen, um einen Überblick über die Eigenschaften der Systeme zu erhalten. Die vorliegende Studie hat zum Ziel, das Arbeitsverhalten zwei maschineller Nickel-Titan-Systeme an speziell entwickelten 3D-gedruckten Kunststoffblöcken mit unterschiedlichen Kanalanatomien zu vergleichen. Mit Hilfe der normierten Kunststoffblöcke soll ein Forschungsansatz für ein zukünftiges Standard-Test-Verfahren für Nickel-Titan-Feilensysteme aufgezeigt werden.

Anhand eines in vielen Studien zuvor etablierten Studienmodells (FRANCO et al. 2011; ALTUNBAS et al. 2015; MAIA FILHO et al. 2015) konnten die zwei aktuell auf den Markt verfügbaren maschinellen Aufbereitungssysteme, Reciproc und F6 SkyTaper, im Hinblick auf ihr Abtragverhalten untersucht werden. Das Herstellungsverfahren der Untersuchungskörper unterschied sich von den bisher veröffentlichten Studien. Während die Kunststoffblöcke zuvor mit Hilfe konventioneller Fertigungsmethoden hergestellt wurden, erfolgte die Produktion der in dieser Studie verwendeten Blöcke mittels eines 3D-Druck-Verfahrens, das eine Herstellung der Untersuchungsblöcke mit einer Genauigkeit von 100 µm zuließ. Im Gegensatz zu früheren Arbeiten wurden in dieser Studie zudem Wurzelkanäle mit extrem starken Krümmungen untersucht, um

die Eigenschaften der Aufbereitungssysteme zu erforschen. Darüber hinaus wurde ein neu erarbeitetes, softwaregestütztes Messverfahren eingesetzt, um die Problematik der subjektiven Messmethoden zu überwinden.

## **4.1 Diskussion von Material und Methode**

### **4.1.1 Auswahl der Untersuchungskörper**

Trotz zahlreicher Veröffentlichungen, die sich mithilfe verschiedener in-vitro-Verfahren mit der Zentrierbarkeit verschiedener Wurzelkanalaufbereitungsinstrumente befassen, gibt es bisher kein Standardverfahren, um das Abtragverhalten verschiedener Wurzelkanalinstrumente reproduzierbar zu vergleichen (HÜLSMANN et al. 2003). Als in-vitro Untersuchungskörper können sowohl simulierte Wurzelkanäle in transparenten Kunststoffblöcken als auch extrahierte menschliche Zähne verwendet werden (HÜLSMANN et al. 2003; MAIA FILHO et al. 2015; GERGI et al. 2015; SABER et al. 2015; BÜRKLEIN et al. 2016; WEI et al. 2017). Beide Systeme bieten ihre Vor- und Nachteile. Extrahierte Zähne weisen starke Unterschiede in ihrer Wurzelkanalmorphologie und Dentinhärte auf, die den Vergleich der Aufbereitungsergebnisse erschweren (HÜLSMANN et al. 2003; GUELZOW et al. 2005). Eine eindeutige Aussage über die ermittelten Abweichungen, welche durch die Aufbereitungssysteme selbst oder auf die Untersuchungskörper zurückzuführen sind, ist nicht möglich (TEPEL et al. 1993). Aufgrund der natürlichen Dentineigenschaften befürworten dennoch einige Autoren die Nutzung extrahierter, humaner Zähne (PETERS 2004). Andere Verfasser hingegen favorisieren simulierte Wurzelkanäle in transparenten Kunststoffblöcken (PETERS 2004; SCHÄFER et al. 2006a). Die bereits seit 1975 von WEINE et al. verwendeten, künstlich hergestellten Wurzelkanäle haben den Vorteil, dass ihre Kanalgeometrie sowie ihr Krümmungsradius, ihr Durchmesser und ihre Abriebeigenschaften standardisiert sind, und so die Voraussetzungen für eine vergleichende Studie bieten (WEINE et al. 1975; PERTROT et al. 1995; HÜLSMANN et al. 2003). Dennoch haben konventionell hergestellte simulierte Wurzelkanalmodelle produktionsbedingte Abweichungen, so dass auch diese Untersuchungsblöcke nicht exakt identisch sind und keine Standardisierung aufweisen (DUMMER et al. 1991). Um diese Abweichungen zu überwinden, erfolgte die Herstellung der Kunststoffblöcke im Rahmen dieser Studie mittels eines 3D-Druckprozesses. Die Genauigkeit des 3D-Druck-Verfahrens zeigte in der vorliegenden Studie reproduzierbare Ergebnisse.

#### **4.1.2 Auswahl der Kanalkonfigurationen**

Bereits in der Studie von Nagy et al. konnte gezeigt werden, dass die Form der Kanalkonfiguration einen bedeutenden Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Wurzelkanalaufbereitung hat (NAGY et al. 1997). Während der Einsatz simulierter Wurzelkanäle in transparenten Kunststoffblöcken eine weit verbreitete Methode ist (PETERS 2004; SCHÄFER et al. 2006a; FRANCO et al. 2011; MAIA FILHO et al. 2016; WEI et al. 2017), die als hoch reproduzierbar angesehen wird, gibt es nicht immer ausreichend detaillierte Angaben über die Kanalkonfigurationen. In einer Vielzahl von Veröffentlichungen wird nur die Form (J-/L- oder S-förmig) beziehungsweise der Krümmungswinkel erwähnt (NAZARIMOGHADAM et al. 2014; MAIA FILHO et al. 2015; WU et al. 2015; TROIANO et al. 2016). In wenigen Veröffentlichungen hingegen werden auch Angaben zum Krümmungsradius gemacht (SCHÄFER et al. 2006a; FRANCO et al. 2011; WEI et al. 2017). Die in dieser Untersuchung verwendeten Kanalkonfigurationen sollen Variationen natürlich vorkommender humaner Wurzelkanalanatomien wiedergeben. Angesichts der in früheren Studien zum Ausdruck gebrachten Erkenntnisse, die ergaben, dass nicht nur der Krümmungswinkel für den Schwierigkeitsgrad einer Wurzelkanalaufbereitung verantwortlich ist, sondern ebenso der Krümmungsradius (ROANE et al. 1985; PRUETT et al. 1997; SCHÄFER et al. 2002a) wurde dieser in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls berücksichtigt. Basierend auf den Ergebnissen der Studie von Schäfer et al., der Kanalkrümmungen mit Winkeln bis zu 75° und Radien von 2 mm beschrieb, erfolgte die Auswahl der in dieser Untersuchung verwendeten Kanalanatomien (SCHÄFER et al. 2002a). Da es sich zum Teil um extrem starke Krümmungen handelt, können so gegebenenfalls Grenzbereiche von Aufbereitungsinstrumente aufgezeigt werden.

#### **4.1.3 Fotodokumentation und Bildauswertung**

Eine bewährte Methode zur Vermessung des Materialabtrages der simulierten Wurzelkanäle in transparenten Kunststoffblöcken stellt die digitale Bildüberlagerung dar (TEPEL et al. 1993; BAUMANN und ROTH 1999; SONNTAG et al. 2003; SCHÄFER et al. 2006a; STEFFEN et al. 2006; BERUTTI et al. 2012). Dazu werden vor und nach der Aufbereitung der Wurzelkanäle digitale Bilder von den Untersuchungskörpern angefertigt. Um eine notwendige Deckungsgleichheit der Wurzelkanäle zu erreichen, müssen die Kunststoffblöcke in eine dafür vorgesehene Fixiervorrichtung reproduzierbar positioniert werden (DUMMER et al. 1989; BRISEÑO und

SONNABEND 1991; CALBERSON et al. 2004). Des Weiteren sollte die Betrachtungsebene parallel zur Krümmungsebene der Wurzelkanäle liegen, um optische Verzerrungen zu vermeiden (BRISEÑO und SONNABEND 1991; SCHÄFER und LOHMANN 2002b). Die einmalige Fokussierung der digitalen Kamera gewährleistet eine exakte Überlagerung der Untersuchungskörper. Mittels der übereinander gelagerten, digitalen Bilder kann an bestimmten Messpunkten der Materialabtrag an den inneren und äußeren Kanalwänden bestimmt werden (PERTROT et al. 1995; BAUMANN und ROTH 1999; SONNTAG et al. 2003; SCHÄFER et al. 2006a; GOLDBERG et al. 2012). Anhand der gewonnenen Ergebnisse kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob Abweichungen vom ursprünglichen Kanalverlauf (Transportation) bestehen. Die Schwierigkeit dabei stellt jedoch die Genauigkeit der durchgeführten Messungen dar, da die Messpunkte in der Regel per Hand des Prüfers bestimmt werden und daher anfällig für Subjektivität sind. Um diese subjektive Messmethode zu überwinden, wurde ein neu entwickeltes softwaregestütztes Messverfahren eingesetzt.

Da in dieser Untersuchung eine zweidimensionale Beurteilung der präparierten Wurzelkanäle durchgeführt wurde, empfiehlt es sich zudem weitere Untersuchungen, die eine dreidimensionale Analyse der präparierten Kanäle ermöglichen, vorzunehmen. Hierzu kann das Mikro-Computertomographie-Verfahren verwendet werden, womit das Einscannen von Kanal anatomien extrahierter Zähne sowie Kunststoffmodellen ermöglicht wird. Mithilfe des 3D-Printing-Verfahrens können die eingescannten Kanalkonfigurationen in Kunststoffblöcke überführt und vervielfältigt werden. Mit dem Mikro-Computertomographie-Verfahren ist es möglich, komplexe Kanalverläufe mit einer außergewöhnlich hohen Detailauflösung darzustellen und den Materialabtrag an den Kanalwänden nach der Präparation in allen Dimensionen zu berechnen und räumlich optisch zu veranschaulichen (BERGMANS et al. 2001; PETERS et al. 2003; WEI et al. 2017). Erhebliche Nachteile dieses Verfahrens ergeben sich aus den hohen Kosten und der langen Scandauer.

## **4.2 Diskussion der Ergebnisse**

Ein wichtiges Ziel während der Aufbereitung von Wurzelkanälen ist der Erhalt der ursprünglichen Kanalkrümmung. Dies kann zu einer Erleichterung des Spülvorgangs, Einbringen von Medikamenten sowie das Abfüllen des Wurzelkanals führen (NAZARI

MOGHADAM et al. 2014). Die zahlreich auf dem dentalen Markt angebotenen maschinellen Nickel-Titan-Aufbereitungssysteme sollen die Wurzelkanalpräparationen vereinfachen und Aufbereitungsfehler verringern. Jedoch lassen sich diese nicht ganz vermeiden (YOSHIMINE et al. 2005; SCHÄFER et al. 2006a). Aufgrund der vorhandenen Rückstellendenz der Nickel-Titan-Instrumente können Abweichungen vom ursprünglichen Kanalverlauf entstehen, (CALBERSON et al. 2004; VAUDT et al. 2009) die folglich bei stark gekrümmten Kanälen ausgeprägter ausfallen können als bei relativ geraden Kanälen (BRYANT et al. 1999). In der vorliegenden Untersuchung konnte anhand des ermittelten Materialabtrags von der inneren und äußeren Krümmung die Zentrierfähigkeit der beiden verwendeten Aufbereitungssysteme ermittelt werden. Bei einem gleichmäßigen Abtrag sollte sich die entfernte Materialmenge an beiden Wänden statistisch ( $p \leq 0,05$ ) nicht voneinander unterscheiden. In dieser Studie war es möglich, die Zentrierfähigkeit von einem vollrotierenden und einem reziprok arbeitenden Wurzelkanalaufbereitungssystem in einer Vielzahl unterschiedlicher Wurzelkanalkonfigurationen zu vergleichen. Selbst Wurzelkanalkonfigurationen mit anspruchsvollen Anatomien konnten getestet werden. Die bisher in der Literatur aufgezeigten Untersuchungen zum Abtragverhalten (Zentrierfähigkeit) des Reciproc- und des F6 SkyTaper-Systems beschränken sich auf eine bestimmte Kanalkonfiguration beziehungsweise auf eine Gruppe von bestimmten Kanalformen (BÜRKLEIN et al. 2012; YOO und CHO 2012; BÜRKLEIN et al. 2013; CAPAR et al. 2014; ALTUNBAS et al. 2015; BANE et al. 2015; MAIA FILHO et al. 2015; SABER et al. 2015; BÜRKLEIN et al. 2016; NAVÓS et al. 2016; WEI et al. 2017). Aufgrund der unterschiedlichen Kanalkonfigurationen sowie der abweichenden computergestützten Messmethode war ein Vergleich der Ergebnisse mit den bereits publizierten Ergebnissen nicht möglich.

Hinsichtlich der Zentrierbarkeit war die 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems der 30/06-Feile desselben Systems und der des Reciproc-Systems überlegen. Die Anwendung der 30/06-Aufbereitungsfeile des F6 SkyTaper-Systems führte in den meisten Kanalformen zu einem gleichmäßigeren Abtrag an den Kanalwänden als mit dem Reciproc-System. Die Unterschiede in den Präparationsformen zwischen den verschiedenen Systemen kann im ungleichen Taper begründet liegen. Ein zunehmender Taper geht mit einer geringeren Flexibilität des Instruments einher, und

führt daher häufiger zu Kanalabweichungen während der Wurzelkanalaufbereitung (BRYANT et al. 1999). Das Reciproc-System, welches in den ersten 3 mm ab der Instrumentenspitze eine Konizität von 8 % aufweist, die sich im weiteren Verlauf zum Schaft hin regressiv verhält, zeigte gegenüber dem F6 SkyTaper-System, das über eine kontinuierliche Konizität von 6 % verfügt, bei fast allen Kanalkonfigurationen den ungleichmäßigsten Abtrag an den Wurzelkanalwänden. Wie erwartet führte auch eine ansteigende Feilengröße, aufgrund der abnehmenden Flexibilität, zu einer Zunahme von Begradigungen (BRYANT et al. 1999). Diese Zunahme der Kanalabweichungen war in der vorliegenden Untersuchung bei der Anwendung des F6 SkyTaper-Systems deutlich zu erkennen. Im Allgemeinen waren die untersuchten Aufbereitungsinstrumente besser in Kanalkonfigurationen mit größeren Krümmungswinkeln und höheren Radien zentriert. Die Kanalkonfiguration 60R8 zeigte bei allen drei Feilen den gleichmäßigsten Abtrag an den Kanalwänden, wohingegen die Asymmetrie bei der Kanalkonfiguration 30R5 am größten war. Wie zuvor auch Nagy et al. konnten wir in der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass die Form der Kanalkonfiguration einen erheblichen Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Wurzelkanalaufbereitung hatte (NAGY et al. 1997). Zudem ist darauf aufmerksam zu machen, dass bei den verwendeten Aufbereitungsinstrumenten die Kanalkonfigurationen mit dem kleinsten Krümmungswinkel (30°) den ungleichmäßigsten Abtrag an den Kanalwänden zeigten. Eine Erklärung für diese Ergebnisse könnte in der Lokalisation der Krümmung begründet liegen. Bei den Untersuchungsmodellen mit einem Winkel von 30° begann die Krümmung bereits im oberen Wurzelkanaldrittel, wohingegen sich bei den Untersuchungsblöcken mit einem Krümmungswinkel von 45° oder 60° die Krümmung im mittleren beziehungsweise im unteren Wurzelkanaldrittel befand. In bereits zuvor durchgeführten Untersuchungen konnte diesbezüglich ein ähnliches Abtragverhalten beobachtet werden (BRYANT et al. 1999; CALBERSON et al. 2002; CALBERSON et al. 2004). Innerhalb dieser Arbeit blieb bei beiden Aufbereitungssystemen eine Instrumentenfraktur aus. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die zyklische Ermüdungs- und Torsionsfestigkeit der beiden angewandten Systeme (KIM et al. 2012; KAVAL et al. 2016). Das Auftreten von Stufen konnte bei der abruptesten Krümmung (60R2) aufgezeigt werden. Während bei der 25/06-Feile des SkyTaper-Systems Stufenbildungen ausblieben, kam es bei der Aufbereitung mit dem Reciproc-System (25/08) zu drei und mit dem

F6 SkyTaper-System (30/06) zu einer Stufenbildung. Die Präparation von Stufen ist einer der schwerwiegendsten Aufbereitungsfehler, da sie zu einem Längenverlust und somit zu einem nicht präparierten Anteil des Wurzelkanals führt. Folglich ist mit einem deutlich schlechteren Behandlungserfolg des Zahnes zu rechnen (DAMMASCHKE et al. 2003; STOLL et al. 2005). Da es nur bei dieser im apikalen Drittel lokalisierten abrupt gekrümmten Kanalkonfiguration zu Stufenbildungen kam, scheint die Aufbereitung dieser Kanalforn die größte Herausforderung für Wurzelkanalinstrumente zu sein.

In dieser Studie verlief die maschinelle Aufbereitung unter Verwendung des Reciproc-Systems deutlich langsamer (103 Sek.) als mit dem F6 SkyTaper-System (92 Sek.). Die gemessene durchschnittliche Aufbereitungszeit des Reciproc-Systems war weitaus länger als die bei ähnlichen Untersuchungen in der Literatur angegebenen Werte. Mehrere Autoren berichten von einer durchschnittlichen Aufbereitungszeit von 73 - 81 Sekunden (BÜRKLEIN et al. 2012; BÜRKLEIN et al. 2013; SABER et al. 2015; COELHO et al. 2016). Eine Ursache für den in der vorliegenden Studie deutlich erhöhten Zeitaufwand der Präparation ist das Vorliegen verschiedenartiger Kanalkonfigurationen mit zum Teil extrem stark gekrümmten Kanälen. Tendenziell wiesen in dieser Untersuchung Kanalkonfigurationen mit abrupten Krümmungen (60R2, 45R2, 30R2 und 30R5) die längsten Aufbereitungszeiten (107 - 133 Sek.) sowie die größten Streuungen (15,5 - 20,8 Sek.) auf. Für die maschinelle Aufbereitung mit dem F6 SkyTaper-System (25/06 + 30/06) hingegen wurde im Mittel eine Präparationszeit von 92 Sekunden benötigt. Während bei dem Reciproc-System hauptsächlich bei abrupten Krümmungen ein erhöhter Zeitaufwand der Präparation erkennbar war, lagen bei dem F6 SkyTaper-System bei allen Kanalkonfigurationen ähnliche Aufbereitungswerte mit deutlich geringeren Streubreiten (4,2 - 8,1 Sek.) vor. In der zurzeit einzig publizierten Studie zum Abtragverhalten des F6 SkyTaper-Systems (30/06) wurde eine deutlich langsamere durchschnittliche Aufbereitungszeit von 103,4 Sekunden erfasst (BÜRKLEIN et al. 2016). Die Aufbereitungszeiten der verwendeten Feilensysteme sollten aus klinischer Sicht jedoch nicht im Vordergrund stehen, da eine ausreichende chemische Desinfektion des infizierten Wurzelkanalsystems unerlässlich ist (HAAPASALO et al. 2010).

Eine eher untergeordnete Rolle für die Unterschiede in der Aufbereitungszeit hat die Anzahl der verwendeten Instrumente. Die Aufbereitung mit dem Reciproc-System

erfolgte je Kunststoffblock mit einer Feile, wohingegen das vollrotierende System F6 SkyTaper zwei Feilen für die vollständige Aufbereitung benötigte.

### **4.3 Schlussfolgerung (und Ausblick)**

Das 3D-Druck-Verfahren eröffnet die Möglichkeit normierte Untersuchungskörper mit unterschiedlichen, frei konstruierten Kanalanatomien zu schaffen. Das Aufzeigen von Grenzbereichen im Einsatz der Wurzelkanalinstrumente kann dadurch ermöglicht werden. Mithilfe der 3D-gedruckten Wurzelkanalmodelle sowie des computergestützten Messverfahrens war es möglich, etwaige Fehlerquellen im Versuchsaufbau und in der Versuchsauswertung zu eliminieren. Unter Verwendung 3D-gedruckter Untersuchungskörper konnten Abweichungen innerhalb einer Kanalkonfiguration, wie sie bei den herkömmlichen Kunststoffblöcken nachgewiesen wurden, vermieden werden. Durch den Gebrauch des neu entwickelten softwaregestützten Messverfahrens zur Bestimmung des Abtragverhaltens der Feilensysteme konnte die subjektive Messmethode umgangen werden. Eine Methode zukünftiger Untersuchungen sollte der Einsatz von robotergestützten Wurzelkanalaufbereitungen sein, um den Einfluss der Erfahrung des Behandlers auf die Wurzelkanalpräparation zu beheben.

Die F6 SkyTaper 25/06-Feile zeigte im Allgemeinen bei allen Kanalkonfigurationen einen gleichmäßigeren Abtrag gegenüber der 30/06-Feile desselben Systems und des Reciproc-Systems. Tendenziell wiesen Kanalkonfigurationen mit großen Krümmungswinkeln und großen Krümmungsradien, zudem im apikalen Drittel lokalisierte Krümmungen, die geringsten Abweichungen von der ursprünglichen Kanalform auf. Kanalkonfigurationen, deren Krümmungen im oberen Wurzelkanaldrittel lokalisiert waren und zudem einen kleinen Krümmungswinkel ( $30^\circ$ ) sowie kleine Krümmungsradien (2 mm, 5 mm) aufwiesen, zeigten die größten Abweichungen vom ursprünglichen Kanalverlauf. Die Ausbildung von Stufen war bei der im apikalen Wurzelkanaldrittel lokalisierten Krümmung mit großem Winkel ( $60^\circ$ ) und abruptem Krümmungsradius (2 mm) erhöht.

Beide Aufbereitungssysteme zeichneten sich durch eine hohe Arbeitssicherheit aus und sind daher für Anwender mit geringer klinischer Erfahrung geeignet. Jedoch sollte die Anwendung von weit apikal gelegenen abrupten Krümmungen (60R2) aufgrund der erhöhten Gefahr von Stufenbildungen mit Vorsicht erfolgen. Bei weit koronal

gelegenen Krümmungen zeigten beide Feilensysteme den ungleichmäßigsten Abtrag an den Kanalwänden und scheinen aufgrund ihres hohen Tapers bei solchen Kanalkonfigurationen eher weniger indiziert zu sein.

Da es sich in dieser Studie um eine zweidimensionale Auswertung von präparierten Wurzelkanälen handelt, sollten diese zukünftig, mittels eines Mikro-Computertomographie-Verfahrens, dreidimensional dargestellt und untersucht werden.

## 5 Zusammenfassung

Von größter Bedeutung für eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung sind die gründliche Reinigung sowie die formgetreue Aufbereitung des Wurzelkanalsystems. In den Jahren seit der Entwicklung der maschinellen Aufbereitung wurden viele verschiedene Feilensysteme produziert, die die Aufbereitung erleichtern und vor allem schneller zum Ziel führen sollen. Die ständige Weiter- und Neuentwicklung machen standardisierte Untersuchungsmethoden zum Vergleich der Instrumente notwendig. Ziel dieser in-vitro Studie war es, das Arbeitsverhalten (Einhaltung des ursprünglichen Kanalverlaufs und ein zirkumferent gleichmäßiger Abtrag) von zwei verschiedenen Nickel-Titan-Feilensystemen (Reciproc, F6 SkyTaper) miteinander zu vergleichen. Des Weiteren sollte mithilfe der normierten Kunststoffblöcke sowie einer neu entwickelten computergestützten Messmethode ein Forschungsansatz für ein zukünftiges Standard-Test-Verfahren für Aufbereitungssysteme aufgezeigt werden. Für die Untersuchung wurden insgesamt 540 artifizielle Wurzelkanäle mit neun verschiedenen Kanalkonfigurationen aufbereitet. Aus den möglichen Kombinationen von drei verschiedenen Krümmungswinkeln ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $60^\circ$ ) und drei unterschiedlichen Krümmungsradien (2 mm, 5 mm und 8 mm) wurden unter Verwendung eines 3D-Printing-Verfahrens Kunststoffblöcke mit neun verschiedenen Kanalkonfigurationen gedruckt. Gemäß den Herstellerangaben beider Feilensysteme wurde die maschinelle Wurzelkanalpräparation durchgeführt. Die maschinelle Aufbereitung sowie das zwischenzeitliche Spülen und Rekapitulieren des Wurzelkanals wurde zeitlich erfasst. Zur Anfertigung von Überlagerungsbildern wurden die artifiziellen Wurzelkanäle jeweils vor und nach ihrer Aufbereitung fotografiert und digitalisiert. Anhand dieser Bilddateien und einer selbst entwickelten Computersoftware konnte der Abtrag an der inneren und äußeren Kanalwand bestimmt werden. Die statistische Analyse erfolgte mit dem Statistikprogramm GraphPad Prism 6.0. Als Testverfahren dienten die einfaktorielle Varianzanalyse ANOVA sowie der Tukey Post-Hoc-Test.

Die 25/06-Feile des F6 SkyTaper-Systems wies bei allen Kanalkonfigurationen im Vergleich zu der 30/06-Feile desselben Systems sowie dem Reciproc-System die besten Ergebnisse in Bezug auf die zentrierte Aufbereitung und die Gleichmäßigkeit des Materialabtrags auf. Kanalformen mit gleichbleibenden Krümmungsradien und abnehmenden Krümmungswinkeln sowie absteigender Lokalisation der Krümmung im

Wurzelkanal gingen mit einer nachlassenden Homogenität im Kanalverlauf einher. Die verwendeten Aufbereitungsinstrumente zeigten die geringsten Abweichungen von der ursprünglichen Kanalform bei der Kanalkonfiguration mit dem größten Krümmungswinkel und dem größten Radius (60R8) sowie einer im apikalen Wurzelkanaldrittel lokalisierten Krümmung. Kanalkonfigurationen mit einem kleinen Krümmungswinkel (30°) sowie kleinen Krümmungsradien (2 mm, 5 mm) und einer im oberen Wurzelkanaldrittel lokalisierten Krümmung führten zu den größten Abweichungen vom ursprünglichen Kanalverlauf. Anhand dieser Ergebnisse war erkennbar, dass die Lage der Krümmung sowie der Krümmungsradius einen weitaus größeren Einfluss auf das Abtragverhalten von Wurzelkanalinstrumenten zu haben scheinen, als der Winkel einer Krümmung selbst. Bei apikal gelegenen, abrupten Krümmungen (60R2) kam es sowohl bei dem Reciproc-System als auch bei dem F6 SkyTaper-System (30/06) zur Stufenbildung. Die Aufbereitung dieser Kanalform scheint die größte Herausforderung für Wurzelkanalinstrumente zu sein. Beide Aufbereitungssysteme (Reciproc, F6 SkyTaper) zeichneten sich aufgrund fehlender Frakturen oder Deformationen durch eine hohe Arbeitssicherheit aus. Mit einer Präparationszeit von 92 Sekunden erfolgte die maschinelle Aufbereitung mit dem Feilensystem F6 SkyTaper signifikant schneller gegenüber dem Aufbereitungssystem Reciproc (103 Sekunden). Dieser Zeitvorteil sollte aus klinischer Sicht jedoch nicht im Vordergrund stehen, da eine ausreichend lange Desinfektion zwingend erforderlich ist. Da die 3D-gedruckten Kunststoffblöcke den natürlichen Dentineigenschaften humaner Zähne zwar sehr nahe kommen, aber nicht identisch sind, ist die Übertragung der Ergebnisse auf die klinische Situation mit Vorsicht zu betrachten.

Die in der Studie verwendeten 3D-gefertigten Untersuchungsmodelle sowie das neu entwickelte computergestützte Messverfahren schaffen optimale Vergleichs- und Auswertungsbedingungen, um das Abtragverhalten von Aufbereitungssystemen zu bestimmen.

## 6 Literaturverzeichnis

ALAPATI, S. B., BRANTLEY, W. A., SVEC, T. A., POWERS, J. M., MITCHELL, J. C. (2003): Scanning electron microscope observations of new and used nickel-titanium rotary files. *J Endod*, 29, 667-669

ALKHAYER, M. A. (2006): Aktueller Stand der chemo-mechanischen Wurzelkanalaufbereitung in den zahnärztlichen Praxen Bayerns. Zahnmed. Diss. München.

ALTUNBAS, D., KUTUK, B., KUSTARCI, A. (2015): Shaping ability of reciprocating single-file and full-sequence rotary instrumentation systems in simulated curved canals. *Eur J Dent*, 9, 346-351

ANDREASEN, G. F., MORROW, R. E. (1978): Laboratory and clinical analyses of nitinol wire. *Am J Orthod*, 73, 142-151

BANE, K., FAYE, B., SARR, M., NIANG, S. O., NDIAYE, D., MACHTOU, P. (2015): Root canal shaping by single-file systems and rotary instruments: a laboratory study. *Iran Endod J*, 10, 135-139

BAUMANN, M. A., ROTH, A. (1999): Effect of experience on quality of canal preparation with rotary nickel-titanium files. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 88, 714-718

BERGMANS, L., VAN CLEYNENBREUGEL, J., WEVERS, M., LAMBRECHTS, P. (2001): A methodology for quantitative evaluation of root canal instrumentation using microcomputed tomography. *Int Endod J*, 34, 390-398

BERUTTI, E., CHIANDUSSI, G., PAOLINO, D. S., SCOTTI, N., CANTATORE, G., CASTELLUCCI, A., PASQUALINI, D. (2012): Canal shaping with WaveOne Primary reciprocating files and ProTaper system: a comparative study. *J Endod*, 38, 505-509

BINDER, R. (1958): Die maschinelle Aufbereitung des Wurzelkanals. *Zahnärztl. Welt/Reform*, 59, 407-411

BRISEÑO, B. M., SONNABEND, E. (1991): The influence of different root canal instruments on root canal preparation: an in vitro study. *Int Endod J*, 24, 15-23

BRYANT, S. T., DUMMER, P. M., PITONI, C., BOURBA, M., MOGHAL, S. (1999): Shaping ability of .04 and .06 taper ProFile rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. *Int Endod J*, 32, 155-164

BÜRKLEIN, S., BENTEN, S., SCHÄFER, E. (2013): Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J*, 46, 590-597

- BÜRKLEIN, S., HINSCHITZA, K., DAMMASCHKE, T., SCHÄFER, E. (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. *Int Endod J*, 45, 449-461
- BÜRKLEIN, S., JÄGER, P. G., SCHÄFER, E. (2016): Apical transportation and canal straightening with different continuously tapered rotary file systems in severely curved root canals: F6 SkyTaper and OneShape vs Mtwo. *Int Endod J*,
- CALBERSON, F. L., DEROOSE, C. A., HOMMEZ, G. M., DE MOOR, R. J. (2004): Shaping ability of ProTaper nickel-titanium files in simulated resin root canals. *Int Endod J*, 37, 613-623
- CALBERSON, F. L., DEROOSE, C. A., HOMMEZ, G. M., RAES, H., DE MOOR, R. J. (2002): Shaping ability of GTTM Rotary Files in simulated resin root canals. *Int Endod J*, 35, 607-614
- CAPAR, I. D., ERTAS, H., OK, E., ARSLAN, H., ERTAS, E. T. (2014): Comparative study of different novel nickel-titanium rotary systems for root canal preparation in severely curved root canals. *J Endod*, 40, 852-856
- CARROTTE, P. (2004): Endodontics: part 4. Morphology of the root canal system. *Br Dent J*, 197, 379-383
- COELHO, M. S., FONTANA, C. E., KATO, A. S., DE MARTIN, A. S., DA SILVEIRA BUENO, C. E. (2016): Effects of glide path on the centering ability and preparation time of two reciprocating instruments. *Iran Endod J*, 11, 33-37
- COLTÈNE PRODUKTBROSCHÜRE (2013): HyFlex Broschüre.
- CUNNINGHAM, C. J., SENIA, E. S. (1992): A three-dimensional study of canal curvatures in the mesial roots of mandibular molars. *J Endod*, 18, 294-300
- DAMMASCHKE, T., STEVEN, D., KAUP, M., OTT, K. H. (2003): Long-term survival of root-canal-treated teeth: a retrospective study over 10 years. *J Endod*, 29, 638-643
- DAMMASCHKE, T., WITT, M., OTT, K., SCHÄFER, E. (2004): Scanning electron microscopic investigation of incidence, location, and size of accessory foramina in primary and permanent molars. *Quintessence Int*, 35, 699-705
- DE DEUS, Q. D. (1975): Frequency, location, and direction of the lateral, secondary, and accessory canals. *J Endod*, 1, 361-366
- DUMMER, P. M., ALODEH, M. H., AL-OMARI, M. A. (1991): A method for the construction of simulated root canals in clear resin blocks. *Int Endod J*, 24, 63-66
- DUMMER, P. M., ALODEH, M. H., DOLLER, R. (1989): Shaping of simulated root canals in resin blocks using files activated by a sonic handpiece. *Int Endod J*, 22, 211-215

- DUMMER, P. M., MCGINN, J. H., REES, D. G. (1984): The position and topography of the apical canal constriction and apical foramen. *Int Endod J*, 17, 192-198
- ESPOSITO, P. T., CUNNINGHAM, C. J. (1995): A comparison of canal preparation with nickel-titanium and stainless steel instruments. *J Endod*, 21, 173-176
- EUROPÄISCHE GESELLSCHAFT FÜR ENDODONTOLOGIE (2004): Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung. *Endodontie*, 13/3, 271-284
- FRANCO, V., FABIANI, C., TASCHIERI, S., MALENTACCA, A., BORTOLIN, M., DEL FABBRO, M. (2011): Investigation on the shaping ability of nickel-titanium files when used with a reciprocating motion. *J Endod*, 37, 1398-1401
- GERGI, R., OSTA, N., BOURBOUZE, G., ZGHEIB, C., ARBAB-CHIRANI, R., NAAMAN, A. (2015): Effects of three nickel titanium instrument systems on root canal geometry assessed by micro-computed tomography. *Int Endod J*, 48, 162-170
- GOLDBERG, M., DAHAN, S., MACHTOU, P. (2012): Centering ability and influence of experience when using WaveOne single-file technique in simulated canals. *Int J Dent*, 206321
- GUELZOW, A., STAMM, O., MARTUS, P., KIELBASSA, A. M. (2005): Comparative study of six rotary nickel-titanium systems and hand instrumentation for root canal preparation. *Int Endod J*, 38, 743-752
- HAAPASALO, M., SHEN, Y., QIAN, W., GAO, Y. (2010): Irrigation in endodontics. *Dental clinics of North America*, 54, 291-312
- HELLWIG, E., KLIMEK, J., ATTIN, T. (2009): Einführung in die Zahnerhaltung. Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie. Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln
- HÜLSMANN, M. (1996): Zur Geschichte der Wurzelkanalaufbereitung. *Endodontie*, 5, 96
- HÜLSMANN, M. (2008): Checklisten der Zahnmedizin - Endodontie. Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart-New York
- HÜLSMANN, M., GRESSMANN, G., SCHÄFERS, F. (2003): A comparative study of root canal preparation using FlexMaster and HERO 642 rotary Ni-Ti instruments. *Int Endod J*, 36, 358-366
- HÜLSMANN, M., SCHÄFER, E., BARGHOLZ, C., BARTHEL, C. (2007): Probleme in der Endodontie. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin
- KARTAL, N., CIMILLI, H. K. (1997): The degrees and configurations of mesial canal curvatures of mandibular first molars. *J Endod*, 23, 358-362
- KAVAL, M. E., CAPAR, I. D., ERTAS, H., SEN, B. H. (2016): Comparative evaluation of cyclic fatigue resistance of four different nickel-titanium rotary files with different cross-sectional designs and alloy properties. *Clin Oral Investig*,

- KIEFNER, P. (2012): Moderne Endodontie – Ein Überblick. *Endodontie Journal*, 1, 14-19
- KIM, H. C., KWAK, S. W., CHEUNG, G. S., KO, D. H., CHUNG, S. M., LEE, W. (2012): Cyclic fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne. *J Endod*, 38, 541-544
- LEE, J. H., PARK, J. B., ANDREASEN, G. F., LAKES, R. S. (1988): Thermomechanical study of Ni-Ti alloys. *J Biomed Mater Res*, 22, 573-588
- MAIA FILHO, E. M., DOS REIS SANTOS, R. M., LIMA, D. M., DA SILVA PEREIRA, S. M., SOARES, J. A., DE JESUS TAVAREZ, R. R., FERREIRA, M. C., CARVALHO, C. N., BANDECA, M. C., TONETTO, M. R., BORGES, A. H., DE CASTRO RIZZI, C. (2016): Shaping ability of ProTaper Next, WaveOne, and Reciproc in simulated root canals. *J Contemp Dent Pract*, 17, 902-906
- MAIA FILHO, E. M., RIZZI CDE, C., COELHO, M. B., SANTOS, S. F., COSTA, L. M., CARVALHO, C. N., TAVAREZ, R. R., SOARES, J. A. (2015): Shaping ability of Reciproc, UnicOne, and Protaper Universal in simulated root canals. *Scientific World J*, 690854
- MUND, A., SCHEIBE, L., THIEME, R., HORBERT, R., SALM, K., JÄKEL, M., KÖHL, A., RAMACHER, B., BECKERS, C. (2015): *KZBV Jahrbuch 2015 Statistische Basisdaten zur vertragszahnärztlichen Versorgung*. Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung, Köln
- NAGY, C. D., BARTHA, K., BERNATH, M., VERDES, E., SZABO, J. (1997): The effect of root canal morphology on canal shape following instrumentation using different techniques. *Int Endod J*, 30, 133-140
- NAVÓS, B. V., HOPPE, C. B., MESTIERI, L. B., BÖTTCHER, D. E., SÓ, M. V., GRECCA, F. S. (2016): Centering and transportation: in vitro evaluation of continuous and reciprocating systems in curved root canals. *J Conserv Dent*, 19, 478-481
- NAZARI MOGHADAM, K., SHAHAB, S., ROSTAMI, G. (2014): Canal transportation and centering ability of twisted file and reciproc: a cone-beam computed tomography assessment. *Iran Endod J*, 9, 174-179
- NAZARIMOGHADAM, K., DARYAEIAN, M., RAMAZANI, N. (2014): An in vitro comparison of root canal transportation by reciproc file with and without glide path. *J Dent (Tehran)*, 11, 554-559
- PAQUÉ, F., MUSCH, U., HÜLSMANN, M. (2005): Comparison of root canal preparation using RaCe and ProTaper rotary Ni-Ti instruments. *Int Endod J*, 38, 8-16
- PARK, S. K., KIM, Y. J., SHON, W. J., YOU, S. Y., MOON, Y. M., KIM, H. C., LEE, W. (2013): Clinical efficiency and reusability of the reciprocating nickel-titanium instruments according to the root canal anatomy. *Scanning*,

- PEREIRA, E. S., GOMES, R. O., LEROY, A. M., SINGH, R., PETERS, O. A., BAHIA, M. G., BUONO, V. T. (2013): Mechanical behavior of M-Wire and conventional NiTi wire used to manufacture rotary endodontic instruments. *Dent Mater*, 29, 318-324
- PERTROT, W. J., CAMPS, J., DAMIANI, M. G. (1995): Transportation of curved canals prepared with canal master U, canal master U niti, and stainless steel K-type files. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 79, 504-509
- PETERS, O. A. (2004): Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod*, 30, 559-567
- PETERS, O. A., PETERS, C. I., SCHÖNENBERGER, K., BARBAKOW, F. (2003): ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT. *Int Endod J*, 36, 86-92
- PETTIETTE, M. T., METZGER, Z., PHILLIPS, C., TROPE, M. (1999): Endodontic complications of root canal therapy performed by dental students with stainless-steel K-files and nickel-titanium hand files. *J Endod*, 25, 230-234
- PINEDA, F., KUTTLER, Y. (1972): Mesiodistal and buccolingual roentgenographic investigation of 7,275 root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 33, 101-110
- PONGIONE, G., POMPA, G., MILANA, V., DI CARLO, S., GIAN SIRACUSA, A., NICOLINI, E., DE ANGELIS, F. (2012): Flexibility and resistance to cyclic fatigue of endodontic instruments made with different nickel-titanium alloys: a comparative test. *Ann Stomatol (Roma)*, 3, 119-122
- PRUETT, J. P., CLEMENT, D. J., CARNES, D. L., JR. (1997): Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod*, 23, 77-85
- RAPISARDA, E., TRIPI, T. R., BONACCORSO, A. (2000): [Thermoelastic analysis of nickel-titanium endodontic files]. *Minerva Stomatol*, 49, 93-99
- ROANE, J. B., SABALA, C. L., DUNCANSON, M. G., JR. (1985): The "balanced force" concept for instrumentation of curved canals. *J Endod*, 11, 203-211
- SABER, S. E., NAGY, M. M., 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. *Int Endod J*, 48, 109-114
- SCHÄFER, E. (1997): Root canal instruments for manual use: a review. *Endod Dent Traumatol*, 13, 51-64
- SCHÄFER, E., DIEZ, C., HOPPE, W., TEPEL, J. (2002a): Roentgenographic investigation of frequency and degree of canal curvatures in human permanent teeth. *J Endod*, 28, 211-216
- SCHÄFER, E., ERLER, M., DAMMASCHKE, T. (2006a): Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J*, 39, 196-202

- SCHÄFER, E., ERLER, M., DAMMASCHKE, T. (2006b): Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J*, 39, 203-212
- SCHÄFER, E., LOHMANN, D. (2002b): Efficiency of rotary nickel-titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J*, 35, 505-513
- SCHNEIDER, S. W. (1971): A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 32, 271-275
- SONNTAG, D., GUNTERMANN, A., KIM, S. K., STACHNISS, V. (2003): Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students. *Int Endod J*, 36, 246-255
- SONNTAG, D., OTT, M., KOOK, K., STACHNISS, V. (2007): Root canal preparation with the NiTi systems K3, Mtwo and ProTaper. *Aust Endod J*, 33, 73-81
- STAVILECI, M., HOXHA, V., GÖRDUYSUS, Ö., TATAR, I., LAPERRE, K., HOSTENS, J., KÜÇÜKKAYA, S., BERISHA, M. (2013): Effects of preparation techniques on root canal shaping assessed by micro-computed tomography. *Med Sci Monit Basic Res*, 19, 163-168
- STEFFEN, H., LÖW, A., ROSIN, M., WELK, A. (2006): Comparison of K hand files and ProFiles 0.06/0.04 in simulated curved root canals prepared by students. *Quintessence Int*, 37, 811-817
- STELLUNGNAHME DES DGZ BEIRATS (2005): Good clinical practice: Die Wurzelkanalbehandlung. *Dtsch Zahnärztl Z.* 60 (8).
- STELLUNGNAHME DGZ/DGZMK (2005): Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung. *Dtsch Zahnärztl Z.* 60 (8): 421-424.
- STOLL, R., BETKE, K., STACHNISS, V. (2005): The influence of different factors on the survival of root canal fillings: a 10-year retrospective study. *J Endod*, 31, 783-790
- TEPEL, J., SCHÄFER, E., HOPPE, W. (1993): Kunststoffe als Modellmaterialien in der Endodontie. *Dtsch Zahnärztl Z*, 48, 736-738
- THOMPSON, S. A. (2000): An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *Int Endod J*, 33, 297-310
- TROIANO, G., DIOGUARDI, M., COCCO, A., GIANNATEMPO, G., LAINO, L., CIAVARELLA, D., BERUTTI, E., LO MUZIO, L. (2016): Influence of operator's experience on the shaping ability of Protaper Universal and WaveOne Systems: A comparative study on simulated root canals. *Open Dent J*, 10, 546-552

- TRUCKENMÜLLER, M. (2015): Endodontischer Status und geschätzter endodontischer Behandlungsbedarf bei Patienten einer süddeutschen Zahnarztpraxis. Zahnmed. Diss. Tübingen.
- VANDE VOORDE, H. E., BJORND AHL, A. M. (1969): Estimating endodontic "working length" with paralleling radiographs. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 27, 106-110
- VAUDT, J., BITTER, K., NEUMANN, K., KIELBASSA, A. M. (2009): Ex vivo study on root canal instrumentation of two rotary nickel-titanium systems in comparison to stainless steel hand instruments. *Int Endod J*, 42, 22-33
- WALIA, H. M., BRANTLEY, W. A., GERSTEIN, H. (1988): An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod*, 14, 346-351
- WEBER, T. (2010): MEMORIX Zahnmedizin. Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart
- WEI, Z., CUI, Z., YAN, P., JIANG, H. (2017): A comparison of the shaping ability of three nickel-titanium rotary instruments: A micro-computed tomography study via a contrast radiopaque technique in vitro. *BMC Oral Health*, 17, 39
- WEINE, F. S., KELLY, R. F., BRAY, K. E. (1976): Effect of preparation with endodontic handpieces on original canal shape. *J Endod*, 2, 298-303
- WEINE, F. S., KELLY, R. F., LIO, P. J. (1975): The effect of preparation procedures on original canal shape and on apical foramen shape. *J Endod*, 1, 255-262
- WU, H., PENG, C., BAI, Y., HU, X., WANG, L., LI, C. (2015): Shaping ability of ProTaper Universal, WaveOne and ProTaper Next in simulated L-shaped and S-shaped root canals. *BMC Oral Health*, 15, 27
- YE, J., GAO, Y. (2012): Metallurgical characterization of M-Wire nickel-titanium shape memory alloy used for endodontic rotary instruments during low-cycle fatigue. *J Endod*, 38, 105-107
- YOO, Y. S., CHO, Y. B. (2012): A comparison of the shaping ability of reciprocating NiTi instruments in simulated curved canals. *Restor Dent Endod*, 37, 220-227
- YOSHIMINE, Y., ONO, M., AKAMINE, A. (2005): The shaping effects of three nickel-titanium rotary instruments in simulated S-shaped canals. *J Endod*, 31, 373-375
- ZINELIS, S., ELIADES, T., ELIADES, G. (2010): A metallurgical characterization of ten endodontic Ni-Ti instruments: assessing the clinical relevance of shape memory and superelastic properties of Ni-Ti endodontic instruments. *Int Endod J*, 43, 125-134
- ZMENER, O., BALBACHAN, L. (1995): Effectiveness of nickel-titanium files for preparing curved root canals. *Endod Dent Traumatol*, 11, 121-123

# 7 Anhang

## 7.1 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
ISO	International Organisation for Standardization (internationale Normierungsorganisation)
M	Mittelwert
Max	Maximum
Min	Minimum
ml	Milliliter
mm	Millimeter
m%	Massenprozent
SD	Standardabweichung
Sek.	Sekunden
U/min	Umdrehungen pro Minute
vs.	versus
z.B.	zum Beispiel
VDW	Vereinigte Dentalwerke

## 7.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Maschinelle Aufbereitungssysteme mit flexiblem Bewegungsablauf	9
Tab. 2	Einsatz der entsprechenden F6 SkyTaper-Feile in Abhängigkeit von der zuvor sondierten Feilengröße	20
Tab. 3	Zeigt die Seriennummern beider Gruppierungen der Blöcke mit dem dazugehörigen Krümmungswinkel/-radius	23
Tab. 4	Ausschnitt Excel-Tabelle; Spalte A = Abtrag Außenkrümmung, Spalte B = Abtrag Innenkrümmung; Spalte C = Ergebnisse der MIN/MAX-Standardfunktion	34
Tab. 5	Abtragverhalten Reciproc-System (Angaben in Pixel)	38

Tab. 6	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen; Aufbereitungsfeile: Reciproproc	39
Tab. 7	Abtragverhalten des F6 SkyTaper-Systems (25/06) (Angaben in Pixel)	41
Tab. 8	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen; Aufbereitungsfeile: F6 SkyTaper 25/06	42
Tab. 9	Abtragverhalten der 30/06-Aufbereitungsfeile des F6 SkyTaper-Systems (Angaben in Pixel)	44
Tab. 10	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den verschiedenen Kanalkonfigurationen; Aufbereitungsfeile: F6 SkyTaper 30/06	45
Tab. 11	Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 60R8 (Angaben in Pixel)	47
Tab. 12	Überprüfung auf Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen, Kanalkonfiguration: 60R8	47
Tab. 13	Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 60R5 (Angaben in Pixel)	49
Tab. 14	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 60R5	49
Tab. 15	Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 60R2 (Angaben in Pixel)	51
Tab. 16	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 60R2	51
Tab. 17	Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 45R8 (Angaben in Pixel)	53
Tab. 18	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 45R8	53
Tab. 19	Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 45R5 (Angaben in Pixel)	55
Tab. 20	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration 45R5	55
Tab. 21	Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 45R2 (Angaben in Pixel)	57
Tab. 22	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration 45R2	57
Tab. 23	Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 30R8 (Angaben in Pixel)	59
Tab. 24	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 30R8	59

Tab. 25	Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 30R5 (Angaben in Pixel)	60
Tab. 26	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration 30R5	61
Tab. 27	Abtragverhalten der Aufbereitungssysteme bei der Kanalkonfiguration 30R2 (Angaben in Pixel)	63
Tab. 28	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den Versuchsgruppen; Kanalkonfiguration: 30R2	63
Tab. 29	Abtragverhalten der drei verwendeten Feilen über alle Untersuchungsblöcke (n = 270 je Feile)	65
Tab. 30	Überprüfung der Signifikanz des Abtragverhaltens zwischen den drei verwendeten Feilen über alle Untersuchungsblöcke (n = 270 je Feile)	65
Tab. 31	Gesamte Aufbereitungszeit je Aufbereitungssystem (Angaben in Sek.)	67
Tab. 32	Überprüfung der Signifikanz der gesamten Aufbereitungszeit zwischen dem Reciproc- und dem F6 SkyTaper - System (25/06 + 30/06)	67
Tab. 33	Aufbereitungszeit Reciproc (25/08) je Kanalkonfiguration (Angaben in Sek.)	69
Tab. 34	Aufbereitungszeit F6 SkyTaper-System (25/06 + 30/06) je Kanalkonfiguration (Angaben in Sek.)	70

### 7.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Schematische Darstellung zur Bestimmung des Krümmungswinkels nach Schneider (1971)	3
Abb. 2	Schematische Darstellung der Bedeutung des Krümmungsradius nach Pruett et al. (1997). Die Kanalgeometrie der beiden Wurzelkanäle unterscheidet sich nur im Krümmungsradius ( $r_1 = 5 \text{ mm}$ , $r_2 = 2 \text{ mm}$ ), während der Krümmungswinkel bei beiden Wurzelkanälen gleich ist ( $\alpha_1$ und $\alpha_2 = 60^\circ$ ).	4
Abb. 3	Aufbereitungsfehler bei der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle: a) korrekte Präparation, b) Zip (1) und Elbow (2), c) apikale Perforation, d) laterale Perforation, e) Stufe (Hülsmann M., Checklisten der Zahnmedizin Endodontie, 2008)	6
Abb. 4	Maße bei ISO-Instrumenten. D1 = Durchmesser des Kegels des Arbeitsteils, dieser wird als ISO-Stärke in 1/100 mm angegeben. D2 = Durchmesser am Ende des Arbeitsteils. $D2 = D1 + 0,32 \text{ mm}$ , bei einer Konizität von 2%. (Hülsmann M., Checklisten der Zahnmedizin Endodontie, 2008)	7

Abb. 5	Darstellung der auftretenden Abweichungen innerhalb einer Kanalkonfiguration bei der Fertigung der Kunststoffblöcke mittels herkömmlicher Herstellungsverfahren	13
Abb. 6	Darstellung der Reciproc-Feilen 25/08, 40/06, 50/05 (von oben nach unten)	16
Abb. 7	Quelle: Broschüre Reciproc (2013), VDW; REM-Aufnahmen von Dr. David Sonntag, Universität Düsseldorf a) nicht schneidende Instrumentenspitze b) S-förmiger Querschnitt	17
Abb. 8	Darstellung der F6 SkyTaper-Feilen 20/06, 25/06, 30/06, 35/06, 40/06 (von oben nach unten)	18
Abb. 9	Quelle: Broschüre F6 SkyTaper (2015), Komet; Feilenquerschnitt	19
Abb. 10	Darstellung der neun verschiedenen Kanalkonfigurationen	21
Abb. 11	Fixierungsvorrichtung mit Untersuchungsblock	22
Abb. 12	Versuchsaufbau mit Kameraeinstellungen	24
Abb. 13	C-Pilot-Feile (ISO 010) zur Überprüfung der Gängigkeit des Kanals	25
Abb. 14	K-Handfeile (ISO 015) zur Herstellung des Gleitpfads	25
Abb. 15	Verwendete Aufbereitungsfeilen und Darstellung der erzielten Aufbereitungsdurchmesser nach 1, 2, 3 und 16 mm hinter der Feilenspitze	26
Abb. 16	VDW.SILVER® RECIPROC® - Endomotor mit VDW 6:1 Endo-Winkelstück	27
Abb. 17	Wurzelkanal vor der Aufbereitung	31
Abb. 18	Aufbereiteter Wurzelkanal	31
Abb. 19	Überlagerte Wurzelkanäle bei reduzierter Deckkraft	31
Abb. 20	Überlagerte Wurzelkanäle mit eingezeichneten Linien	31
Abb. 21	a) Computergestützte Auswertung der überlagerten Wurzelkanäle b) Vergrößerte Darstellung mit eingezeichneter Tangente (grün), sowie der Senkrechten durch den Messpunkt c) Darstellung der zu berechnenden Strecken; blaue Linie – Abtrag Innenkrümmung; lila Linie – Abtrag Außenkrümmung	33
Abb. 22	Stufenbildung Reciproc-Gruppe (25/08), Kanalkonfiguration: 60R2	71
Abb. 23	Stufenbildung F6 SkyTaper-Gruppe (30/06), Kanalkonfiguration: 60R2	71

## 8 Danksagung

Mein Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dörfer für die Erlaubnis zur Nutzung der Räumlichkeiten sowie der Materialien der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie.

Für die Überlassung des interessanten Themas sowie die Korrekturen dieser Promotionsarbeit möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Doktormutter Frau Prof. Birte Größner-Schreiber bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinem lieben Kollegen, Herrn Dr. David Christofzik, für sein fachlich äußerst kompetentes Engagement und seine intensive Betreuung.

Zudem möchte ich an dieser Stelle die Gelegenheit nutzen, mich bei meiner Freundin, Annika Witthöft, zu bedanken, die mir mit ihrer heiteren/frohgestimmten Art während der gesamten Zeit zur Seite gestanden hat und mich bei den Korrekturen geduldig unterstützte. Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Suki für die stundenlangen Spaziergänge, die immer wieder für den notwendigen Abstand, Erholung und Entspannung sorgten.

Nicht zuletzt danke ich ganz herzlich meinen Eltern, Gabriele und Martin Schröter, sowie meiner Oma, Erika Herzig, dass sie es mir ermöglicht haben, meinen Weg zu gehen und mich bis hierher immer mit viel Liebe und Vertrauen unterstützt haben.

## 9 Lebenslauf

### Persönliche Daten:

**Name:** Doreen Schröter  
**Geburtsdatum:** 27. Januar 1982  
**Geburtsort:** Templin (Brandenburg)

### Schulbildung:

**1988-1994** Grundschule (Templin)  
**1994-1998** Städtische Realschule („Johan Wolfgang von Goethe“, Templin)  
**2003-2006** Abitur (Victor-Klemperer-Kolleg, Berlin)

### Weiterer Bildungsweg:

**1998-2001** Berufsausbildung zur Zahnmedizinischen Fachangestellten (ZMF)  
(Zahnarztpraxis Wolfgang Behrendt, Berlin)  
**2001-2002** Tätigkeit als ZMF in der Zahnarztpraxis Behrendt (Berlin)  
**2002-2003** Tätigkeit als ZMF in der Zahnarztpraxis Schönberg und Stolze  
(Berlin)  
**2006-2008** Vorklinisches Studium der Zahnheilkunde an der Christian -  
Albrechts - Universität zu Kiel  
**2008-2011** Klinisches Studium der Zahnheilkunde an der Christian -  
Albrechts - Universität zu Kiel  
**2011** Staatsexamen im Fach Zahnheilkunde  
**2012-2018** Tätigkeit als Assistenz Zahnärztin in der Klinik für  
Zahnerhaltungskunde und Parodontologie Kiel (Prof. Dr. Dörfer)  
**Seit 05/2018** Tätigkeit als Assistenz Zahnärztin in der Zahnarztpraxis Harrs  
(Damp)

### Promotion:

**Seit 08/2014** In der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie der  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**Publikation:**

**2018**

Christofzik D., Bartols A., Faheem M.K., Schroeter D., Groessner-Schreiber B., Doerfer C.E.

**Shaping ability of four root canal instrumentation systems in simulated 3D-printed root canal models.**

PLoS One. 2018 Aug 1;13(8)