

# **UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF**

Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Poliklinik für Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde

Klinikdirektorin: Prof. Dr. Ursula Platzer

## **Vergleichende Untersuchung zur maschinellen und manuellen Aufbereitung von artifiziellen Wurzelkanälen in der studentischen Ausbildung**

### **Dissertation**

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin  
an der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von:

Kristina Klempau

aus Lübeck

Hamburg 2016

**Angenommen von der  
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 03.05.2016**

**Veröffentlicht mit Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.**

**Prüfungsausschuss, die Vorsitzende: Prof. Dr. U. Platzer**

**Prüfungsausschuss, zweiter Gutachter: PD Dr. H. Seedorf**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 LITERATUR</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Die Wurzelkanalbehandlung</b>	<b>3</b>
2.1.1 Ziele der Wurzelkanalbehandlung	3
2.1.2 Indikationen und Kontraindikationen der Wurzelkanalbehandlung	5
2.1.3 Problematiken bei der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle	5
2.1.4 Fehler bei der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle	8
2.1.4.1 Zip-Elbow-Effekt	8
2.1.4.2 Perforation und Strip Perforation	9
2.1.4.3 Blockade des Kanals	10
2.1.4.4 Stufe	10
2.1.4.5 Unterinstrumentierung und Überinstrumentierung	11
<b>2.2 Instrumentarium für die Wurzelkanalaufbereitung</b>	<b>12</b>
2.2.1 Manuelle Aufbereitungsinstrumente	12
2.2.1.1 Reamer	14
2.2.1.2 K-Feile	14
2.2.1.3 Hedström-Feile	15
2.2.1.4 Merkmale	16
2.2.2 Maschinelle Aufbereitungsinstrumente	18
<b>2.3 Techniken der Wurzelkanalaufbereitung</b>	<b>21</b>
2.3.1 Standardisierte Technik	22
2.3.2 Step-Back Technik	23
2.3.3 Balanced-Force Technik	23
2.3.4 Crown-Down-Pressureless Technik	24
2.3.5 Besonderheiten der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung	24
<b>2.4 Nickel-Titan-Legierung</b>	<b>26</b>
2.4.1 Entwicklung	26
2.4.2 Metallurgie	27
2.4.2.1 Pseudoelastizität	27
2.4.2.2 Formgedächtnis (Memory Effekt)	28
2.4.2.3 Weiterentwicklung der Nickel-Titan-Legierung – M-Wire	28
<b>2.5 Die untersuchten Aufbereitungssysteme</b>	<b>30</b>
2.5.1 Protaper Next	30
2.5.1.1 Feilen	30
2.5.1.2 Besonderheiten	31
2.5.1.3 Anwendung	32
2.5.2 F360/F6 SkyTaper	33
2.5.2.1 Feilen	33
2.5.2.2 Besonderheiten	34
2.5.2.3 Anwendung	34
2.5.3 WaveOne	35
2.5.3.1 Feilen	35
2.5.3.2 Besonderheiten	36
2.5.3.3 Anwendung	37
<b>2.6 Zusammenfassung</b>	<b>37</b>

<b>3 ARBEITSHYPOTHESE UND ZIELSETZUNG</b>	<b>39</b>
<b>4 MATERIAL UND METHODE</b>	<b>42</b>
4.1 Versuchsdesign	42
4.2 Studienteilnehmer/-innen	43
4.3 Aufbereitungssysteme und Maschinerien	44
4.4 Versuchsmodelle	44
4.5 Vorbehandlung der Epoxidharz-Blöcke	45
4.6 Digitale Bilddokumentation der angefärbten Epoxidharz-Blöcke	47
4.7 Randomisierung	48
<b>4.8 Versuchsvorbereitungen mit den Studienteilnehmern/-teilnehmerinnen</b>	<b>49</b>
4.8.1 Einführung der Studienteilnehmer/-innen in die Theorie der manuellen und maschinellen Wurzelkanalaufbereitung	49
4.8.2 Übungsphase	49
<b>4.9 Versuchsdurchführung</b>	<b>50</b>
4.9.1 Wurzelkanalaufbereitung	50
4.9.1.1 Arbeitslänge	50
4.9.1.2 Manuelle Wurzelkanalaufbereitung	50
4.9.1.3 Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung	51
4.9.1.4 Instrumentenfrakturen	52
4.9.1.5 Aufbereitungszeiten	52
4.9.2 Wurzelkanalaufbereitung	53
4.10 Befragung der Studierenden	53
4.11 Digitale Bilddokumentation der aufbereiteten Epoxidharz-Blöcke	53
4.12 Morphologische Beurteilung der Wurzelkanalaufbereitungen	54
4.13 Überlagerung der Bilddateien am PC	55
4.14 Quantitative Untersuchungen zur Kanaltransportation und zum Materialabtrag	57
4.15 Statistische Auswertung	59
<b>5 ERGEBNISSE</b>	<b>61</b>
<b>5.1 Aufbereitungsfehler (Zip-Elbow-Effekt, Ledge, Apical Blockage)</b>	<b>61</b>
5.1.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	61
5.1.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	62
5.1.3 Aufbereitungsfehler in der Einzeldarstellung	63
5.1.3.1 Zip-Elbow-Effekt	64
5.1.3.2 Ledge	65
5.1.3.3 Apical Blockage	66

<b>5.2 Transportationen</b>	<b>67</b>
5.2.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	67
5.2.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	68
5.2.3 Transportationen in der Einzeldarstellung	69
5.2.3.1 Messpunkte	70
<b>5.3 Aufbereitungszeiten</b>	<b>74</b>
5.3.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	74
5.3.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	76
5.3.3 Aufbereitungszeiten in der Einzeldarstellung	78
<b>5.4 Instrumentenfrakturen</b>	<b>80</b>
5.4.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	80
5.4.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	81
5.4.3 Instrumentenfrakturen in der Einzeldarstellung	82
<b>5.5 Fragebogen</b>	<b>83</b>
<b>5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>86</b>
5.6.1 Aufbereitungsfehler (Zip-Elbow-Effekt, Ledge, Apical Blockage)	86
5.6.1.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	86
5.6.1.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	86
5.6.2 Transportationen	87
5.6.2.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	87
5.6.2.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	88
5.6.3 Aufbereitungszeiten	88
5.6.3.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	88
5.6.3.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	89
5.6.4 Instrumentenfrakturen	90
5.6.4.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	90
5.6.4.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	90
5.6.5 Fragebogen	91
<b>6 DISKUSSION</b>	<b>92</b>
<b>6.1 Material und Methode</b>	<b>92</b>
6.1.1 Auswahl der Studienteilnehmer/-innen	92
6.1.2 Auswahl der Aufbereitungssysteme und Maschinerien	92
6.1.3 Auswahl der Versuchsmodelle	94
6.1.4 Randomisierung	95
6.1.5 Manuelle Wurzelkanalaufbereitung	96
6.1.6 Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung	96
6.1.7 Beurteilung der Aufbereitungsfehler und der Transportationen	97
6.1.8 Beurteilung der Aufbereitungszeiten	99
6.1.9 Beurteilung der Instrumentenfrakturen	100
<b>6.2 Ergebnisse</b>	<b>101</b>
6.2.1 Aufbereitungsfehler (Zip-Elbow-Effekt, Ledge, Apical Blockage)	101
6.2.1.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	101
6.2.1.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	102
6.2.2 Transportationen	103
6.2.2.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	103
6.2.2.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	106
6.2.3 Aufbereitungszeiten	108
6.2.3.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	108
6.2.3.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	109

6.2.4 Instrumentenfrakturen	111
6.2.4.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung	111
6.2.4.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung	112
6.2.5 Fragebogen	114
<b>6.3 Schlussfolgerung</b>	<b>115</b>
<b>7 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>116</b>
<b>8 LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>119</b>
<b>9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>139</b>
<b>10 TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>141</b>
<b>11 ANHANG</b>	<b>142</b>
11.1 Materialienliste	142
11.2 Lebenslauf	144
11.3 Eidesstattliche Erklärung	144
<b>12 DANKSAGUNG</b>	<b>146</b>

## 1 Einleitung und Problemstellung

Für eine erfolgreiche Wurzelkanalaufbereitung wird der Behandler in hohem Maße gefordert. Die Krümmung der Wurzelkanäle ist ein wichtiger Aspekt der Wurzelkanalgeometrie, der die fehlerfreie Aufbereitung beeinträchtigen kann.

Die Aufbereitung mit Edelstahlfeilen galt jahrzehntelang als Standard in der Endodontie. Es zeigte sich jedoch, dass die Einhaltung des ursprünglichen Kanalverlaufs mit diesen Instrumenten - speziell für unerfahrene Behandler - eine Schwierigkeit darstellt.

Studierenden am Anfang ihres klinischen Studienabschnitts fehlt die Übung und Langzeiterfahrung im Umgang mit endodontischen Aufbereitungsinstrumenten.

Neue Materialien, Techniken und Systeme wurden entwickelt und auf den Dentalmarkt gebracht, um die Aufbereitung schwieriger Kanalkonfigurationen zu vereinfachen. Insbesondere die Einführung der Nickel-Titan-Legierung setzte einen Meilenstein in der Endodontie. Die physikalischen Eigenschaften des Nickel-Titans verleihen den Instrumenten mehr Flexibilität im Vergleich zu den konventionellen Edelstahlfeilen, wodurch Aufbereitungsfehler minimiert werden können.

Die aktuellen Trends sind Feilensysteme, die durch Antrieb, Reduktion der Feilenanzahl oder materialspezifische Modifikationen die Aufbereitung weiter verbessern und vereinfachen sollen.

Protaper Next, WaveOne und F6 SkyTaper stehen stellvertretend für die neuere Generation von Systemen:

Protaper Next (Dentsply Maillefer) ist ein 2013 eingeführtes, vollrotierendes Feilensystem, welches durch den Werkstoff M-Wire die Flexibilität bei gleich bleibender Schneidleistung verbessern soll. Zudem weist die Feile einen exzentrisch verlaufenden, rechteckigen Querschnitt sowie einen Arbeitsmodus bei reduzierter Drehmomentbelastung auf, wodurch sie dem natürlichen Kanalverlauf genauer folgen soll.

Das WaveOne Feilensystem (Dentsply Maillefer) versucht über einen veränderten Antriebsmodus Fehlerquellen zu vermeiden. Während der

Standard die Vollrotation war, wird hier ein reziprokes Bewegungsmuster angewendet, welches eine vollständige 360°-Rotation erst in mehreren Zyklen vollzieht. Die Feile arbeitet mit einem großen Drehwinkel in Schneidrichtung und mit einem kleinen Drehwinkel in die Gegenrichtung.

Das System F6 SkyTaper (Komet) verspricht eine hohe Effizienz bei geringer Transportation durch einen effizienten Doppel-S-Querschnitt der Instrumente.

Die Verwendung der maschinellen Aufbereitungsinstrumente soll darüber hinaus durch die geringere Instrumentenzahl unter anderem zu einer kürzeren Gesamtaufbereitungszeit führen.

In der folgenden in-vitro Studie erfolgen eine Gegenüberstellung und eine Beurteilung über die oben erwähnten neuentwickelten Systeme hinsichtlich ihrer Aufbereitungsqualität und ihrer Aufbereitungszeit sowie ein Vergleich, ob die maschinelle Aufbereitung der Instrumentation mit konventionellen Edelstahlfeilen überlegen ist. Insbesondere soll beurteilt werden, ob die Wurzelkanalaufbereitung mit maschinellen Systemen auch für Studierende mit wenig endodontischen Erfahrungen eine Erleichterung und eine Verbesserung der Aufbereitungsqualität darstellt.



## **2 Literatur**

### **2.1 Die Wurzelkanalbehandlung**

#### **2.1.1 Ziele der Wurzelkanalbehandlung**

Als Teilgebiet der konservierenden Zahnheilkunde befasst sich die Endodontie mit der Anatomie und Physiologie des Endodonts sowie der Ätiologie, Prävention, Pathologie, Diagnostik und Therapie seiner Erkrankungen oder Verletzungen (Weber 2010).

Vorrangige Ziele der Endodontie sind eine Vitalerhaltung der Pulpa (falls möglich), eine Erhaltung eines funktionsfähigen Zahns mit irreparabel geschädigter Pulpa, eine Verhinderung der Erkrankung oder Schädigung von angrenzenden Strukturen sowie eine Heilung von bereits pathologischen Veränderungen des Endodonts (Hülsmann 2008).

Die Gründe für die Notwendigkeit einer Wurzelkanalbehandlung sind vielschichtig. Die häufigste Ursache für eine endodontische Behandlung ist bakteriell bedingt, aber auch traumatische oder iatrogene Ursachen können Gründe für die Einleitung einer Endodontie sein.

Schon 1965 zeigte Kakehashi (Kakehashi, Stanley et al. 1965), dass Mikroorganismen eine entscheidende Bedeutung zukommt. Er stellte keimfreie Ratten und Ratten mit einer normalen, oralen Bakterienflora gegenüber.

Bei einer zielgerichteten Eröffnung der Pulpa kam es bei Tieren mit normaler Flora zur Ausbildung von Pulpanekrosen, Granulomen oder Abszessen, während sich bei keimfreien Tieren keine Erkrankungen zeigten. Somit ist die Entfernung der Mikroorganismen von ausschlaggebender Dringlichkeit.

Weiterhin sind die gründliche Reinigung und Desinfektion der Wurzelkanäle sowie die anschließende Präparation wichtige Säulen für die Aufnahme einer dichten, wandständigen und dauerhaften Wurzelkanalfüllung (Hülsmann 2001). Dabei stellt insbesondere die absolute Reinigung von gekrümmten Wurzelkanälen den Behandler vor eine Herausforderung (Mandel, Adib-Yazdi et al. 1999).

Diverse Studien belegen, dass die Reinigungsleistung im apikalen Bereich begrenzt ist (Wu and Wesselink 1995; Hülsmann, Rummelin et al. 1997; Ahlquist, Henningson et al. 2001; Gambarini and Laszkiewicz 2002; Hülsmann, Gressmann et al. 2003; Schäfer and Schlingemann 2003; Foschi, Nucci et al. 2004; Schäfer and Vlassis 2004; Paqué, Musch et al. 2005).

Eine fehlerhafte Wurzelkanalfüllung und eine inadäquate Präparation sind zwei wichtige Gründe für einen endodontischen Misserfolg (Fava 1983).

Auch Ingle bestätigte dieses 1961 (Ingle 1961). In der Studie wurde gezeigt, dass 58,65% von 104 endodontischen Misserfolgen aufgrund fehlerhafter Wurzelkanalfüllungen entstehen.

Ein weiteres Ziel auf dem Weg zu einer erfolgreichen Endodontie ist die Präparation einer leicht trichterförmigen Erweiterung von der Wurzelspitze bis zur koronalen Zugangskavität (Schilder 1974). Außerdem soll der bearbeitete Kanal dem ursprünglichen Kanalverlauf entsprechen und die Wurzel nicht unnötig schwächen (ESE 2006).

Dem apikalen Bereich wird ein besonders hoher Einfluss auf das Behandlungsergebnis zugeschrieben. So lassen sich beste endodontische Erfolge dann erzielen, wenn das Wurzelkanalsystem mindestens bis zu 2 mm vor dem Apex aufbereitet und dicht gefüllt wird (Sjögren, Hägglund et al. 1990; Wu, Wesselink et al. 2000).

### **2.1.2 Indikationen und Kontraindikationen der Wurzelkanalbehandlung**

Die hauptsächliche Indikation für eine endodontische Behandlung stellt die irreparable Schädigung der Pulpa mit oder ohne Beteiligung der umgebenden Gewebe dar. Außerdem kann ein fragwürdiger Pulpazustand vor prothetischen Maßnahmen, die Verankerung eines Wurzelstifts sowie eine Wurzelresektion oder Hemisektion eine Devitalisierung fordern. Der erkrankte Zahn sollte einen parodontalen Halt aufweisen und nach der Endodontie restaurierbar sein.

Wurzelkanalrevisionen sind immer dann sinnvoll, wenn Zähne mangelhafte Wurzelkanalfüllungen sowie röntgenologische Befunde aufweisen. Dieses kann mit oder ohne Symptomen einhergehen (Hellwig, Klimek et al. 2009).

Kontraindiziert sind Wurzelkanalbehandlungen bei Patienten mit mangelnder Compliance, schlechtem Mundhygieniezustand oder bei Patienten, deren Allgemeinzustand keine Behandlung zulässt. Ebenfalls wird unter anderem bei Zähnen, die nicht funktionell wiederherstellbar oder restaurierbar sind, von endodontischen Maßnahmen abgeraten (Hellwig, Klimek et al. 2009).

Beispiele hierfür sind tiefe Kronen-Wurzel-Frakturen, stark fortgeschrittene Parodontitis, ausgeprägte Wurzelresorptionen oder tiefe Wurzelkaries (Guldener 1993).

### **2.1.3 Problematiken bei der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle**

Die konventionelle Wurzelkanalaufbereitung erfolgt mit herkömmlichen Wurzelkanalinstrumenten aus Edelstahl in Form von K-Feilen, Reamern und Hedström-Feilen. Besonders die Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle kann aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften des Edelstahls zu Problemen führen (Serene, Adams et al. 1995). Begradigungen mit daraus resultierender Stufenbildung oder möglicher Perforation können die Folge sein (Roig-Cayón, Brau-Aguadé et al. 1994; Namazikhah, Mokhlis et al. 2000).

Je mehr ein Wurzelkanal im apikalen Anteil gekrümmt ist, desto schwieriger wird eine fehlerfreie Aufbereitung. Aufbereitungsinstrumente aus Edelstahl haben eine gewisse Rückstellungstendenz und eine mit zunehmender ISO-Größe geringere Flexibilität, woraus im Laufe der Aufbereitung eine Begradigung des Wurzelkanals resultieren kann (Weber 2010), (Abb. 1).

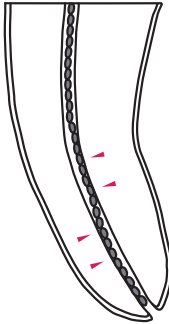


Abb. 1: Aufrichtungstendenz einer Edelstahlfeile im apikalen Bereich eines gekrümmten Wurzelkanals

Dieses wurde schon 1975 durch Weine dargelegt (Weine, Kelly et al. 1975).

Es wurde beobachtet, dass sowohl gerade als auch gebogene Instrumente den ursprünglichen Kanalverlauf nicht vollständig einhalten können und die Tendenz zu einer Aufrichtung haben.

Insbesondere im Bereich der Außenkrümmung im unteren Wurzelkanaldrittel sowie im Bereich der Innenkrümmung im mittleren Wurzelkanaldrittel wird vermehrt Substanz abgetragen (Himmel, Ahmed et al. 1995; Baumann and Roth 1999; Yun and Kim 2003; Calberson, Deroose et al. 2004; Weber 2010). Stufenbildungen, Verlagerungen des ursprünglichen Kanalverlaufs (Transportationen) oder apikale Perforationen sind mögliche Folgen.

Um derartige Aufbereitungsfehler zu verringern, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

Das geradlinige Einführen der Feilen stellt eine präventive Maßnahme dar.

Dabei sollte der Eingang vor der Aufbereitung des Kanals mit einem Gates-Glidden-Bohrer erweitert werden (Abou-Rass and Jastrab 1982; Leeb 1983; Schrader, Ackermann et al. 1999).

Ein Vorbiegen der Wurzelkanalfeilen ist eine andere Möglichkeit, um Aufbereitungsfehler zu minimieren (Harris 1976).

Weiterhin werden verschiedene Aufbereitungstechniken beschrieben, denen allen gemein ist, diese Fehler zu reduzieren (Weine, Kelly et al. 1975; Goerig, Michelich et al. 1982; Roane, Sabala et al. 1985; Saunders and Saunders 1994).

Das Material der Instrumente ist ein entscheidender Faktor. Durch die Einführung der Nickel-Titan-Feilen, kurz Ni-Ti-Feilen, sind neue Möglichkeiten eröffnet worden, auch stark gekrümmte Wurzelkanäle aufzubereiten.

Ni-Ti-Feilen weisen einen pseudoelastischen Charakter auf, der es ermöglicht, dass die Feilen stärker gebogen werden können als konventionelle Edelstahlfeilen, bevor die elastische Grenze des Nickel-Titans erreicht wird. Formabweichungen können gegenüber Edelstahlfeilen deutlich reduziert werden.

Baumann und Roth wiesen in ihrer Arbeit darauf hin (Baumann and Roth 1999), dass die Präparationen mit Ni-Ti-Feilen zu gut zentrierten, wenig begradigten und konischen Aufbereitungen führen.

Zahlreiche Studien haben die Überlegenheit der Ni-Ti-Feilen gegenüber Edelstahlfeilen ebenfalls untersucht (Esposito and Cunningham 1995; Himel, Ahmed et al. 1995; Zmener and Balbachan 1995; Kazemi, Stenman et al. 1996; Garip and Günday 2001; Gluskin, Brown et al. 2001; Schäfer 2001; Schäfer and Lohmann 2002 a).

Wie häufig Krümmungen insbesondere bei Molaren vorkommen, untersuchten Cunningham und Senia 1992 (Cunningham and Senia 1992). Sie zeigten in ihrer Arbeit, dass 100% der von ihnen untersuchten Molaren eine Krümmung aufwiesen.

Somit wird deutlich, wie häufig ein behandelnder Zahnarzt mit der vorgestellten Thematik konfrontiert wird.

## 2.1.4 Fehler bei der Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle

Aufgrund der oben dargestellten Problematik können Fehler während der oder durch die Aufbereitung gekrümmter Kanäle resultieren. Ein Überblick über mögliche Fehlerarten wird im Folgenden gegeben.

### 2.1.4.1 Zip-Elbow-Effekt

Der Zip-Elbow-Effekt entsteht durch die Aufrichtungstendenz der Instrumente in einem gekrümmten Wurzelkanal. Daraus resultiert eine Erweiterung an der Außenkurvatur im apikalen Bereich (Zip) und eine Einengung (Elbow) am Punkt der maximalen Krümmung. Dieses wird auch als Sanduhreneffekt bezeichnet (Hülsmann, Peters et al. 2005), (Abb. 2).

Weine beschrieb den Effekt bereits 1975 und schlussfolgerte daraus (Weine, Kelly et al. 1975), dass es aufgrund der Tropfenform schwierig werden kann, den Wurzelkanal im apikalen Bereich adäquat zu füllen.

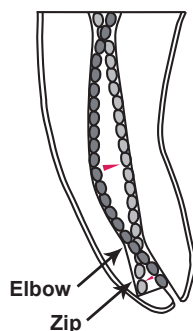


Abb. 2: Zip-Elbow-Effekt nach der Aufbereitung eines gekrümmten Wurzelkanals

### 2.1.4.2 Perforation und Strip Perforation

Perforationen im apikalen Wurzelbereich treten bei Präparationen mit starren Instrumenten auf, die eine schneidende Spitze haben und rotierend verwendet werden (Hülsmann, Peters et al. 2005), (Abb. 3).

Strip Perforationen hingegen entstehen durch Ausdünnen der lateralen Wurzelwand. Es erfolgt eine übermäßige Instrumentierung der mittleren Kanalabschnitte sowie eine Aufrichtung an der Innenkurvatur der Wurzelkanäle. Es sollte darauf geachtet werden, dass weder Instrumente mit großem Durchmesser noch rotierende Instrumente übermäßig häufig eingesetzt werden, da ihre Verwendung zur Aushöhlung der Wurzelwand führen kann (Glickman and Dumsha 1991).

Sowohl bei Perforationen des apikalen Wurzelabschnitts als auch bei Strip Perforationen kann es zur Infektion der periradikulären Gewebe und zum Überpressen von Spüllösung und Füllungsmaterial kommen. Ein adäquater Verschluss gestaltet sich schwierig. Ebenso führen beide Arten der Perforation zu einer Verschlechterung der Prognose (Hülsmann 2008).

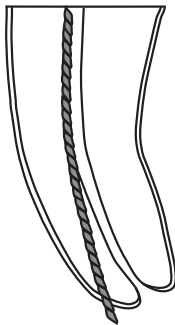


Abb. 3: apikale Perforation bei der Aufbereitung eines gekrümmten Wurzelkanals

### 2.1.4.3 Blockade des Kanals

Eine Blockade des Kanals (Apical Blockage) entsteht durch Verdichten von Dentinspänen oder nekrotischem Gewebe, Füllungsmaterial oder frakturierten Instrumenten (Glickman and Dumsha 1991), (Abb. 4). Meist geht dieses mit einem Verlust der Arbeitslänge einher. Folglich findet eine unzureichende Aufbereitung, Desinfektion und apikale Abdichtung statt (Hülsmann 2008).



Abb. 4: Darstellung einer Blockade im apikalen Bereich eines gekrümmten Wurzelkanals

### 2.1.4.4 Stufe

Eine Stufe (Ledge) entsteht durch starre Instrumente oder Fehler in der Aufbereitungstechnik im Bereich der Außenkrümmung eines gekrümmten Wurzelkanals (Abb. 5).

Die Wurzelkanalfeilen schaben durch die Aufrichtungstendenz eine Stufe in das Dentin außerhalb des zentralen Kanalverlaufs. Wenn eine Stufe geformt ist, ist es schwierig bis unmöglich, die Spitze der Feile in den ursprünglichen Kanalverlauf zurückzubringen. Die signifikantesten Variablen für die Ausbildung einer Stufe sind die Kanalkrümmung sowie die Zahn- und Kanallokalisierung (Greene and Krell 1990).



Es ist somit schwierig, die Arbeitslänge zu erreichen. Es resultiert eine inkomplette Instrumentation und Obturation des Wurzelkanals (Kapalas and Lambrianidis 2000).

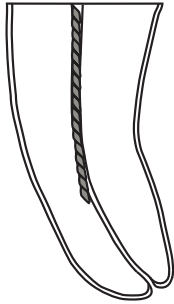


Abb. 5: Stufenbildung an der Außenkurvatur eines gekrümmten Wurzelkanals

#### 2.1.4.5 Unterinstrumentierung und Überinstrumentierung

Bei einer Unterinstrumentierung erfolgt eine unzureichende Bearbeitung des Wurzelkanals mit Zurücklassen von infiziertem Gewebe. Die unvollständige Aufbereitung führt zu einer mangelnden Reinigung und Desinfektion mit einem minderwertigen apikalen Verschluss des Wurzelkanalsystems.

Bei einer Überinstrumentierung wird das physiologische Foramen erweitert oder nach apikal verlagert und der Wurzelkanal an der Krümmung begradigt. Dabei kann es zu einer bakteriellen Besiedelung des Periapex durch Überpressen von Debris kommen (Hülsmann 2008).

Das Herauspressen von Kanalinhalt über den Apex kann zu nachfolgenden Schmerzen oder Schwellungen führen (Harrington and Natkin 1992).

Ebenso kann die Überextension der Wurzelfüllung Beschwerden verursachen und eine erschwerte Heilung implizieren (Klayman and Brilliant 1975; Torabinejad and Walton 1991). Postoperative Beschwerden können somit mechanischen, chemischen oder mikrobiologischen Ursprungs sein (Siqueira, Rôças et al. 2002).

## 2.2 Instrumentarium für die Wurzelkanalaufbereitung

### 2.2.1 Manuelle Aufbereitungsinstrumente

Für die konventionelle manuelle Wurzelkanalaufbereitung werden Instrumente aus Edelstahl eingesetzt. Die Dimension der Instrumente richtet sich nach den Vorgaben der „International Organization for Standardization“ (ISO). In der ISO-Norm 3630 sind sowohl die Maße als auch die Toleranzen der Wurzelkanalinstrumente festgelegt (Weber 2010):

- **Durchmesser  $d_1$**

Der Farbcode am Handgriff des jeweiligen Instruments gewährleistet die optische Erkennung des Durchmessers der Feile. Die dabei angegebene Größe gibt den Durchmesser  $d_1$  der Instrumentenspitze an (Abb. 6).

- **Durchmesser  $d_2$**

Als Konizität oder auch Taper bezeichnet man die Zunahme des Feilendurchmessers pro mm der Länge des Arbeitsteils. Bei Instrumenten mit ISO-Standard beträgt die Zunahme 0,02 mm pro mm (Taper 02).

Das bedeutet, dass sich bei einem Instrument mit einer Arbeitslänge  $l_1$  von 16 mm ein Enddurchmesser von  $d_2 = d_1 + 0,32$  mm ergibt (Abb. 6).

- **Arbeitsteil  $l_1$ /Gesamtlänge  $l_2$**

Das Arbeitsteil  $l_1$  der Feile hat eine standardisierte Länge von 16 mm. Die Schaftlänge hingegen ist variabel. Somit ergibt sich eine

Gesamtlänge  $l_2$  von der Spitze des Instruments bis zum Griff von 21 mm, 25 mm oder 31 mm (Abb. 6).

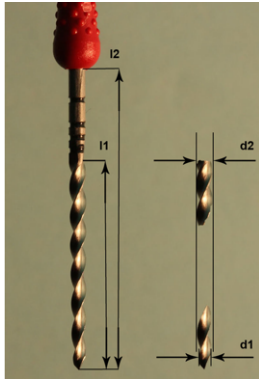


Abb. 6: Längen- und Durchmesserbeschreibung eines Reamers (ISO 110)

#### - Grundtypen der manuellen Aufbereitungsinstrumente

Es werden drei Grundtypen von endodontischen Instrumenten unterschieden: Reamer (Abb. 7), K-Feilen (Abb. 8) und Hedström-Feilen (Abb. 9). Diese unterscheiden sich in ihren Herstellungsprozessen und in ihrer Arbeitsweise. Hedström-Feilen sind die am häufigsten eingesetzten manuellen Aufbereitungsinstrumente, da sie aufgrund ihrer scharfen Schneidekanten und dem großen Spanraum eine sehr effektive Reinigungsleistung erzielen.



Abb. 7: vergrößerte Darstellung des Arbeitsteils eines Reamers (ISO 80)



Abb. 8: vergrößerte Darstellung des Arbeitsteils einer K-Feile (ISO 80)



Abb. 9: vergrößerte Darstellung des Arbeitsteils einer Hedström-Feile (ISO 80)

### 2.2.1.1 Reamer

Reamer sind endodontische Handinstrumente, die aus Stählen mit einem Dreikant- oder Vierkantprofil gedreht werden (Weber 2010).

Im Bereich des Arbeitsteils weisen Reamer eine halbe bis ganze Drehung pro Millimeter auf. Je geringer der Durchmesser des Reamers, desto größer die Anzahl vorhandener Windungen.

Der Tangentenwinkel des Instruments beträgt etwa 10-30°. Quadratische Querschnitte werden aus Stabilitätsgründen bevorzugt für kleinere Instrumente eingesetzt und dreieckige Querschnitte für größere Instrumente, um ausreichend Flexibilität zu erreichen (Hellwig, Klimek et al. 2009).

Effektiv arbeiten Reamer bei Rotationsbewegungen und ineffektiv bei Translationsbewegungen. Mit einer Viertel- bzw. Drittelkreisbewegung wird das Instrument drehend-schabend im Kanal verwendet.

Vorteile dieser Arbeitsweise sind ein runder Aufbereitungsquerschnitt sowie die vollständige Reinigung des Kanals ohne Blockaden. Die Nachteile lassen sich insbesondere in gebogenen Kanälen finden, da dort die Gefahr der Entstehung eines Zip-Elbow-Effekts besteht. Zudem kann eine schneidende Instrumentenspitze zu einer Stufe, einer Via falsa oder einer Perforation führen (Weber 2010).

### 2.2.1.2 K-Feile

K-Feilen oder Kerr-Feilen werden ebenfalls aus Stahl mit einem Dreikant- oder Vierkantprofil gewonnen. Im Gegensatz zu Reamern besitzen K-Feilen jedoch

mehr Windungen pro Längeneinheit und unterscheiden sich auch durch den Tangentenwinkel. Dieser beträgt etwa 25-40°.

K-Feilen sind sowohl bei Rotationsbewegungen als auch bei Translationsbewegungen effektiv (Hellwig, Klimek et al. 2009).

### **2.2.1.3 Hedström-Feile**

Hedström-Feilen sind endodontische Handinstrumente, die aus Rundstahl gefertigt werden. Im Gegensatz zu Reamern, bei denen die Metallmasse die Schneiden ausmacht, werden die Schneiden bei Hedström-Feilen nicht von der Metallmasse gestützt. Sie umlaufen die Feile spiralförmig. Dadurch sind Hedström-Feilen frakturgefährdeter, da ihr Metallkern von geringerer Stärke ist (Weber 2010).

Ihr Tangentenwinkel beträgt etwa 60-65°. Hedström-Feilen dürfen einzig ziehend verwendet werden (Hellwig, Klimek et al. 2009).

Somit arbeiten sie bei Translationsbewegungen effektiv und bei Rotationsbewegungen ineffektiv. Die Hedström-Feilen werden bis zu einer bestimmten Arbeitslänge in den Kanal eingeführt und schabend herausgezogen. Ein Vorteil dieser Arbeitsweise ist die intensive Reinigungswirkung.

Durch die Translationsbewegung können sowohl geradlinige als auch gebogene Kanäle aufbereitet werden. Nachteilig sind die Gefahren einer möglichen Blockade des Kanals durch Dentinspäne sowie ein potentiell unregelmäßiger Arbeitsquerschnitt (Weber 2010).

### 2.2.1.4 Merkmale

Allen eben erwähnten Instrumenten sind gewisse Merkmale gemein. Dazu zählen der Spanraum und der Kerndurchmesser, der Schneidekantenwinkel sowie der Tangentenwinkel:

#### - Spanraum und Kerndurchmesser

Die Größe des Spanraums erteilt Auskunft darüber, wie effizient infiziertes Gewebe aus dem Wurzelkanal entfernt und heraustransportiert werden kann.

Ein großer Spanraum korreliert mit einem kleinen Kerndurchmesser. Instrumente mit einem kleinen Kerndurchmesser weisen eine hohe Flexibilität auf, die mit einer erhöhten Bruchgefahr einhergeht (Abb. 10, Abb. 11).

Die höchste Bruchgefahr geht von Hedström-Feilen aus, gefolgt von Reamern oder K-Feilen mit dreieckigem Querschnitt und Reamern oder K-Feilen mit quadratischem Querschnitt (Hellwig, Klimek et al. 2009).



Abb. 10: Kern bei einer Hedström-Feile (links), Reamer oder K-Feile mit dreieckigem Querschnitt (Mitte) und Reamer oder K-Feile mit quadratischem Querschnitt (rechts)

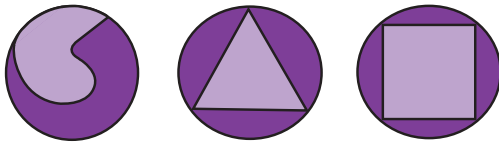


Abb. 11: Spanraum (dunkellila) bei einer Hedström-Feile (links), Reamer oder K-Feile mit dreieckigem Querschnitt (Mitte) und Reamer oder K-Feile mit quadratischem Querschnitt (rechts)

## - Tangentenwinkel

Der Tangentenwinkel wird über den Winkel der Schneiden zur Instrumentenlängsachse definiert. Dieser gibt Auskunft über den Arbeitsvektor und die Anwendungsart des Instruments im Wurzelkanal. Somit bestimmt der Tangentenwinkel, ob das Instrument eher rotierend oder linear-feilend verwendet wird. Reamer weisen den kleinsten Tangentenwinkel auf, gefolgt von K-Feilen und Hedström-Feilen (Weber 2010), (Abb. 12).

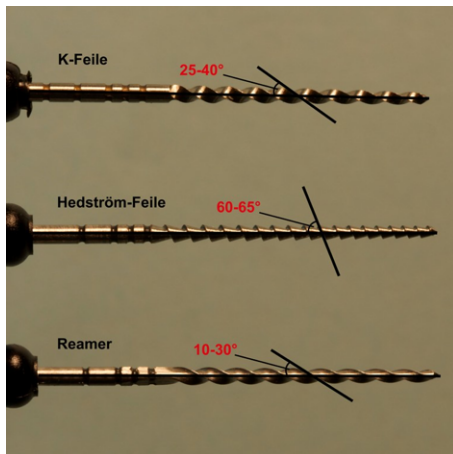


Abb. 12: Grundformen der Handinstrumente (K-Feile, Hedström-Feile und Reamer) mit der Darstellung des Tangentenwinkels

### - Schneidekantenwinkel

Der Schneidekantenwinkel ergibt sich aus den Winkeln der Werkzeugschneiden (Weber 2010). Ein kleiner Winkel führt zu einem scharfen Instrument (Platzer and Sedelmayer 1993).

Die Schneidfähigkeit einer Hedström-Feile ist am höchsten, gefolgt von Reamern und K-Feilen (Hellwig, Klimek et al. 2009).

### 2.2.2 Maschinelle Aufbereitungsinstrumente

Für die maschinelle Aufbereitung werden Wurzelkanalinstrumente aus Nickel-Titan (Ni-Ti) verwendet. Die Einführung dieser Legierung in die Endodontie ermöglichte eine deutliche Verbesserung der Aufbereitungsqualität (Garip and Günday 2001).

So zeigen viele Untersuchungen, dass die Originalkurvatur des Wurzelkanals durch Ni-Ti-Feilen gut beibehalten wird (Bishop and Dummer 1997; Bertrand, Lupi-Pégurier et al. 2001; Garip and Günday 2001; Gluskin, Brown et al. 2001; Chen and Messer 2002; Schäfer and Lohmann 2002 b; Hülsmann, Gressmann et al. 2003; Paqué, Musch et al. 2005). Des Weiteren wurde in diversen Studien eine immense Zeitersparnis durch die maschinelle Aufbereitung belegt (Himmel, Ahmed et al. 1995; Gluskin, Brown et al. 2001; Schäfer 2001; Guelzow, Stamm et al. 2005; Alves, Souza et al. 2013). Die Konizität der Ni-Ti-Instrumente ist ebenfalls vorteilhaft. Aufgrund des größeren Tapers der Instrumente kann eine konischere Aufbereitung einfacher erreicht werden als mit Instrumenten geringeren Tapers (Veltri, Mollo et al. 2005). Trotz der unbestreitbaren Vorteile ist die Frakturgefahr zu nennen (Turpin, Chagneau et al. 2000; Patiño, Biedma et al. 2005).

Man unterscheidet die zyklische Ermüdung (Fatigue) und die Torsionsfraktur (Torque):



Eine zyklische Ermüdung ist eine Biegebeanspruchung, die durch Rotation des Instruments, kombiniert mit lateraler Auslenkung, auftritt (Weber 2010).

In einer Studie von Haïkel und Kollegen (Haïkel, Serfaty et al. 1999) zeigte sich, dass dem Krümmungsradius eine entscheidende Bedeutung bei der Entstehung einer Ermüdungsfraktur zukommt.

Die Torsionsfraktur tritt auf, wenn der Reibungswiderstand abrupt erhöht wird. Es kommt dabei zur Torsionsüberlast und zum Instrumentenbruch. Um dieses zu vermeiden, können drehmomentbegrenzte Reduzierwinkelstücke oder Torquekontrollmotoren eingesetzt werden. Im Laufe der Zeit haben sich viele Feilensysteme auf dem Markt etabliert. Die Unterschiede liegen insbesondere in den vorhandenen Konizitäten und den Querschnitten der Instrumente (Weber 2010).

- **Konizität**

Gegenüber den manuellen Aufbereitungsinstrumenten verfügen die maschinellen Instrumente über variierende Konizitäten.

Das Instrument nimmt dabei nicht standardisiert, wie die ISO-genormten Edelstahlfeilen, pro Millimeter Länge um 0,02 mm im Durchmesser zu.

Erhältlich sind Ni-Ti-Instrumente mit einer Konizität von 2% bis 20%.

Auch mehrere Konizitäten können innerhalb einer Feile vorhanden sein (Hellwig, Klimek et al. 2009). Dieses wird auch als progressive Konizität bezeichnet (Abb. 13).

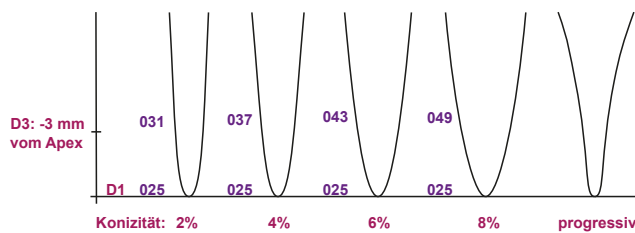


Abb. 13: Schematische Darstellung der Durchmesserzunahme unterschiedlicher Konizitäten von 2%, 4%, 6%, 8% und der progressiven Konizität von verschiedenen marktüblichen Systemen am Punkt D3 (3 mm vom Apex entfernt)

## - Instrumentenquerschnitte

Zudem gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Instrumentenquerschnitten, wobei man grundlegend aktive und passive Instrumentenquerschnitte unterscheidet. Vorteil eines aktiven Querschnitts ist ein schärferer Schneidekantenwinkel.

Im Gegensatz zu den aktiven Instrumenten besitzen passive Instrumente „radial lands“. Diese sind kufenartige Verbreiterungen und sollen eine gute Zentrierung im Kanal gewährleisten. Dabei soll es zu einem geringeren Einschraubeffekt kommen. Als nachteilig werden hierbei die stumpfen Schneidekanten angesehen (Weber 2010), (Abb. 14).

Die Reinigungsleistung ist bei aktiven Instrumenten mit scharfen Schneidekanten gegenüber passiven Instrumenten mit „radial lands“ erhöht (Jeon, Spångberg et al. 2003).

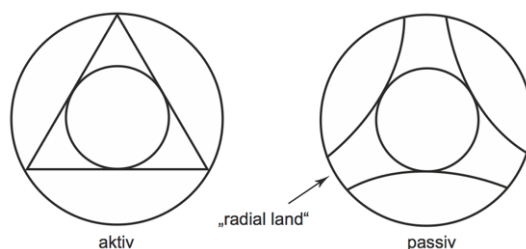


Abb. 14: aktiver (Dreieck) und passiver (U-Form) Instrumentenquerschnitt

## - **Variierende Arbeitsteillängen und nicht schneidende Instrumentenspitzen**

Weiterhin werden auch Feilen mit variierenden Arbeitsteillängen und überwiegend nicht schneidenden Instrumentenspitzen angeboten:

Zur koronalen Erweiterung des Kanaleingangs können Instrumente mit großer Konizität und stark verkürztem Arbeitsteil eingesetzt werden.

Der Grundgedanke hinter der Verkürzung des Arbeitsteils liegt darin, die größere Konizität des Instruments zu berücksichtigen, um einwirkende Kräfte zu reduzieren (Hellwig, Klimek et al. 2009).

Die Idee der nicht schneidenden Instrumentenspitze (Batt-Spitze) kann auf Roane (Roane, Sabala et al. 1985) zurückgeführt werden. Die Batt-Spitze soll dazu führen, dass die Instrumente besser im Kanal zentriert bleiben, sodass das Risiko von Kanalbegradigungen und Perforationen reduziert werden kann (Hellwig, Klimek et al. 2009).

### **2.3 Techniken der Wurzelkanalaufbereitung**

Zur Aufbereitung eines Wurzelkanalsystems gibt es verschiedene Techniken, die alle das Ziel einer dem Kanalverlauf entsprechenden gleichmäßigen konischen Aufbereitung verfolgen. In Abhängigkeit von der Richtung sind zwei Formen der Aufbereitung bekannt: die apikal-koronale und die koronal-apikale Methode.

Bei der zuerst erwähnten Methode wird der Wurzelkanal konisch in koronaler Richtung mit zunehmenden Instrumentengrößen bearbeitet, wobei vorab die Arbeitslänge festgelegt wird. Bei der koronal-apikalen Methode wird zuerst der koronale Teil des Kanals erweitert, danach die Arbeitslänge festgesetzt und anschließend erst konisch in apikaler Richtung weiter aufbereitet (Hellwig, Klimek et al. 2009):

### **Apikal-koronale Techniken:**

- Standardisierte Technik
- Step-Back Technik
- Balanced-Force Technik

### **Koronal-apikale Techniken:**

- Step-Down Technik
- Double-Flared Technik
- Crown-Down-Pressureless Technik

Nachfolgend soll ausschließlich auf die in dieser Arbeit relevanten Techniken eingegangen werden:

#### **2.3.1 Standardisierte Technik**

Die Standardisierte Technik wurde 1961 von Ingle (Ingle 1961) beschrieben. Dabei werden alle Instrumente auf die zuvor bestimmte Arbeitslänge in den Kanal eingebracht und in aufsteigender Größe eingesetzt. Die Technik wurde für die Einstift-Füllungstechnik mit einem einzelnen Zentralstift oder einem Silberstift konzipiert. Die Resultate dieser Präparationstechnik sind Aufbereitungen mit sehr geringer Konizität, die die laterale Kondensation kaum möglich machen (Hülsmann 2001).

### 2.3.2 Step-Back Technik

In vielen Universitäten gilt die Step-Back Technik als eine der Standardtechniken zur manuellen Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle.

Die Präparation erfolgt auf die zuvor bestimmte Arbeitslänge durch Erweiterung des Kanals mit aufsteigenden ISO-Größen. Anschließend wird die Arbeitslänge schrittweise um etwa 1 mm reduziert und die Instrumente im Kanal eingesetzt.

Nach jedem Step-Back wird eine Rekapitulation mit einer dünneren Feile vorgenommen, mit der überprüft werden soll, ob der Kanal gängig ist.

Im Gegensatz zur Standardisierten Technik resultieren aus der Step-Back Technik Aufbereitungen mit deutlich ausgeprägteren Konizitäten (Hülsmann 2008).

### 2.3.3 Balanced-Force Technik

Die Balanced-Force Technik wurde 1985 von Roane beschrieben (Roane, Sabala et al. 1985). Bei dieser Aufbereitungstechnik werden speziell konstruierte Feilen (Flex-R-Feilen) mit nicht schneidender Spitze (Batt-Spitze) eingesetzt.

Das Instrument wird unter leichtem Druck nach apikal bewegt. Es erfolgt eine Vierteldrehung nach rechts, um das Instrument zu positionieren und eine halbe Drehung nach links, um Dentin aus dem Kanal zu entfernen (Klimm 2011).

Durch die abwechselnden Rotationsbewegungen entsteht eine auf das Instrument ausgewogen einwirkende Kraft, die präparationsbedingte Abweichungen vermeiden soll (Hülsmann 2008).

### **2.3.4 Crown-Down-Pressureless Technik**

Die Crown-Down-Pressureless Technik ist ebenfalls eine effektive Methode, um gekrümmte Kanäle aufzubereiten und wurde von Morgan und Montgomery beurteilt (Morgan and Montgomery 1984).

Bei diesem Verfahren werden die oberen 2/3 des Wurzelkanals geradlinig erweitert. Eine Feile der ISO-Größe 35 wird mit einer Länge von ca. 16 mm in den Wurzelkanal eingebracht. Wenn es aufgrund der Wurzelkanalmorphologie nicht möglich ist, muss mit kleineren Instrumenten die entsprechende Länge erreicht werden. Anschließend wird der radikuläre Zugang mit Gates-Glidden-Bohrern der Größe 2 und 3 erweitert. Es erfolgt eine provisorische Arbeitslängenfestlegung. Diese sollte 3 mm vor dem röntgenologischen Apex enden. Anschließend wird mit Feilen abnehmender Größe ohne Druck bis zur provisorischen Arbeitslänge aufbereitet. Hierbei sollten maximal zwei Rotationsbewegungen pro Feile durchgeführt werden. Nach dieser Aufbereitung erfolgt die definitive Arbeitslängenbestimmung und die Erweiterung des apikalen Wurzeldrittels (Klimm 2011).

### **2.3.5 Besonderheiten der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung**

Für die maschinelle Aufbereitung sollten drehmomentbegrenzte Winkelstücke oder Antriebsmotoren eingesetzt werden. Dadurch wird die Rotation des Instruments im Kanal unterbrochen, sobald der Reibungswiderstand des Instruments zu hoch wird. Das von Herstellerseite angegebene Drehmoment und die Umdrehungsfrequenz sollten für ein fraktursicheres Arbeiten unbedingt eingehalten werden.

In den Anfängen der maschinellen Endodontie wurden die Instrumente überwiegend vollrotierend unter Anwendung der Crown-Down-Pressureless

Technik eingesetzt. Ein Arbeitszyklus besteht aus einer vollständigen 360°-Rotation der Feile.

Insbesondere für Anfänger ist die Crown-Down-Pressureless Technik schwieriger umzusetzen, da zu Beginn der Aufbereitung die Instrumente mit einer unterschiedlichen, nicht definierten Eindringtiefe in den Kanal eingeführt werden.

Mit der Einführung des Mtwo-Systems (VDW) 2003 wurde erstmals die Single-Length Technik auch zur maschinellen Aufbereitung verwendet (Sonntag 2005). Diese Technik geht auf die von Ingle 1961 (Ingle 1961) eingeführte Standardisierte Technik zurück. Wie bei der Standardisierten Technik wird auch bei der Single-Length Technik die Ni-Ti-Feile ohne Druck in den Wurzelkanal einbracht und der Wurzelkanal von der ersten Feile an auf der gesamten Arbeitslänge aufbereitet und erweitert.

Eine weitere Neuerung der maschinellen Aufbereitung ist das reziproke Bewegungsmuster. Die Balanced-Force Technik legte den Grundstein für diese Entwicklung. Aufbauend auf der Balanced-Force Technik setzte Yared (Yared 2008) erstmals 2008 F2 Protaper Feilen, die ursprünglich für die vollrotierende Aufbereitung konzipiert wurden, in einer reziproken Arbeitsweise ein. Dabei wurde eine vollständige 360°-Rotation erst in mehreren Zyklen vollzogen.

Bei dieser Bewegung arbeitet die Feile mit einem großen Drehwinkel in Schneidrichtung und mit einem kleinen Drehwinkel in die Gegenrichtung.

Durch dieses Bewegungsmuster sollen die verwendeten Instrumente entlastet und das Risiko für Deformationen (Varela-Patiño, Ibañez-Párraga et al. 2010) und zyklische Ermüdungen minimiert werden (Yared 2008; De-Deus, Moreira et al. 2010; Kim, Kwak et al. 2012; Kiefner, Ban et al. 2014). Weiterhin sollen die Drehmomentbelastung der Feile sowie die Anzahl der Transportationen durch die reziproke Bewegung reduziert werden, sodass die Aufbereitung aufgrund der geringeren Belastung der einzelnen Feile mit einem geringeren Instrumentensatz durchgeführt werden kann. Auf dieser Grundlage basierend entwickelten Dentsply Maillefer und VDW Feilensysteme, durch welche die Aufbereitung bereits mit einem einzigen Instrument möglich gemacht werden

soll. Aufbereitungszeiten können dadurch deutlich verringert werden, da Instrumentenwechsel entfallen.

Außerdem wird die Anwenderfreundlichkeit, Effektivität und Wirtschaftlichkeit aufgrund der Vereinfachung in den Systemen verbessert. Gerade für Anfänger, die das erste Mal mit rotierenden Instrumenten arbeiten, sind überschaubare Arbeitsabläufe vorteilhaft.

## 2.4 Nickel-Titan-Legierung

### 2.4.1 Entwicklung

Im Jahre 1960 wurde die Nickel-Titan-Legierung, kurz „Nitinol“, von William F. Buehler in einem Labor der Kriegsmarine in Silver Springs, Maryland, entwickelt.

Das Akronym „Nitinol“ setzt sich aus den chemischen Elementen des Nickel-Titans und dem Kürzel des Forschungslabors zusammen:

**Ni** Nickel **Ti** Titan **N** Naval **O** Ordance **L** Laboratory.

Umfangreiche Forschungen gaben Aufschluss über die Eigenschaften und Anwendungen des Nitinols (Andreasen and Morrow 1978). Man fand heraus, dass die Legierung bei einer kontrollierten spezifischen Wärmebehandlung ein Formgedächtnis besitzt (Buehler, Gilfrich et al. 1963).

Ab 1972 wurde dieses Material in der Zahnmedizin zunächst im Bereich der Kieferorthopädie eingesetzt (Andreasen and Morrow 1978).

1988 hielt der Werkstoff auch Einzug im Bereich der Endodontie. Walia untersuchte ebenfalls die Biege- und Torsionseigenschaften von Nickel-Titan-Instrumenten.

Die Instrumente aus Nitinol wiesen eine 2- bis 3-fach höhere Flexibilität auf als



Edelstahlfeilen (Walia, Brantley et al. 1988). Dieses führte zu stärker zentrierten Kanalaufbereitungen (Zmener and Balbachan 1995).

Bereits 1992 wurden Nickel-Titan-Instrumente in universitären Lehrprogrammen eingeführt (Serene, Adams et al. 1995).

Die Entwicklung der Nickel-Titan-Legierung und die Verwendung in der Endodontie können als ein Innovationsschub für die weiteren Generationen von Aufbereitungssystemen gesehen werden.

## **2.4.2 Metallurgie**

Die für die maschinelle Wurzelkanalbehandlung eingesetzte Nickel-Titan-Legierung wird auch als 55-Nitinol bezeichnet und besteht aus etwa 56 Gewichtsprozent Nickel und aus etwa 44 Gewichtsprozent Titan. In einigen Nickel-Titan-Legierungen wird ein geringer Prozentsatz (< 2 Gewichtsprozent) Nickel durch Kobalt ersetzt (Thompson 2000). Die zwei für die Zahnmedizin entscheidenden Merkmale dieser Legierung sind die Pseudoelastizität und das bereits erwähnte Formgedächtnis.

### **2.4.2.1 Pseudoelastizität**

Wirkt ein mechanischer Druck auf ein Nickel-Titan-Instrument, so können reversible, elastische Verformungen von etwa 8% stattfinden, ohne dass es zu irreversiblen Deformationen kommt. Ermöglicht wird dieses pseudoelastische Verhalten durch verschiedene Kristallgitterformationen. Wenn eine Belastung auf eine Nickel-Titan-Legierung einwirkt, verändert sich das austenitische Gefüge (kubisch-flächenzentriert) in ein spannungsinduziertes Martensit (kubisch-raumzentriert), (Abb. 15). Die beschriebene Umwandlung wird auch als „Martensitische Umwandlung“ bezeichnet (Baumann and Beer 2007).

Die durch eine starke Dehnung entstehende Spannung wird dabei ohne nennenswerten Belastungsanstieg erreicht (Weber 2010). Um das Instrument nicht irreversibel zu schwächen, sollte die oben erwähnte Dehnung von 8% berücksichtigt werden, da das Material bei etwa 12% Dehnung seine Bruchfestigkeitsgrenze erreicht (Thompson 2000).

#### 2.4.2.2 Formgedächtnis (Memory Effekt)

Nimmt die Belastung ab, kehrt das Material in der Entlastungsphase über elastische Rückstellung in seine Ausgangsposition zurück und es kommt nicht zu einer dauerhaften Deformation. Dieses Formgedächtnis (Memory Effekt) führt ebenfalls dazu, dass sich auch die Kristallgitterstruktur in das ursprüngliche Gefüge zurückverwandelt (Weber 2010).

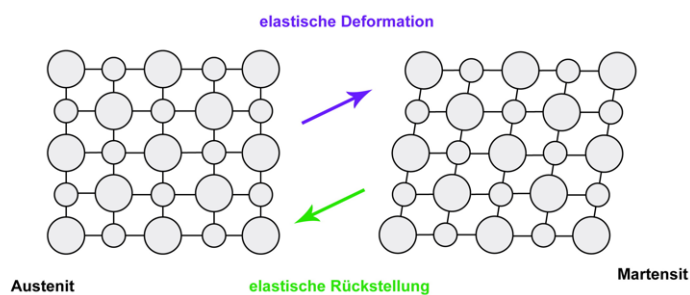


Abb. 15: Umwandlung einer Ni-Ti-Legierung von einer Austenit- in eine Martensitphase

#### 2.4.2.3 Weiterentwicklung der Nickel-Titan-Legierung – M-Wire

M-Wire ist eine neue Nickel-Titan-Legierung, die 2007 von der Firma Dentsply Tulsa Dental Specialities entwickelt wurde.

Die Legierung wird über ein innovatives Wärmebehandlungsverfahren hergestellt und besteht aus drei kristallinen Phasen (Austenit, R-Phase und Martensit), (Alapati, Brantley et al. 2009).

Im Vergleich zu Feilen aus einer konventionellen Nickel-Titan-Legierung sollen Feilen aus M-Wire eine erhöhte Flexibilität und einen erhöhten Widerstand gegenüber zyklischen Ermüdungen aufweisen (Dentsply Tulsa Dental Specialities. URL: [www.mwireniti.com/stronger.html](http://www.mwireniti.com/stronger.html)). Die erhöhte Beanspruchbarkeit und die erhöhte Verschleißfestigkeit sollen auf einer einzigartigen nano-kristallinen martensitischen Mikrostruktur basieren (Ye and Gao 2012).

Eine Studie aus dem Jahre 2008 (Johnson, Lloyd et al. 2008) stellte bei der Verwendung der ProFile 25/.04 Feilen aus M-Wire fest, dass diese Legierung einen um 390% größeren Widerstand gegenüber zyklischen Ermüdungen bietet als Instrumente aus einer konventionellen Nickel-Titan-Legierung. Bei dieser Versuchsreihe wurden Feilen mit einer einheitlichen Drehgeschwindigkeit eingesetzt.

Auf dieser Grundlage basierend untersuchten Gao und Kollegen (Gao, Shotton et al. 2010) in einem Kanalmodell, inwieweit verschiedene Drehgeschwindigkeiten einerseits und die unterschiedlichen Nickel-Titan-Legierungen andererseits Einfluss auf die zyklische Ermüdungsresistenz haben. Es zeigte sich, dass unterschiedliche Drehgeschwindigkeiten keinen erhöhten Einfluss auf die Anzahl der Ermüdungsbrüche haben, sondern vielmehr das Material aus dem die Feilen gefertigt wurden. ProFile Vortex Feilen aus M-Wire wiesen eine um 150% erhöhte Lebensdauer gegenüber ProFile Vortex Feilen aus einer konventionellen Nickel-Titan-Legierung auf. Weitere Untersuchungen attestieren die verbesserten mechanischen Eigenschaften der M-Wire Legierung ebenfalls (Al-Hadlaq, Aljarbou et al. 2010; Pereira, Peixoto et al. 2012).

Neben vielen positiven Studien kann eine aus dem Jahre 2008 stammende Studie (Gambarini, Grande et al. 2008) die Überlegenheit der Feilen aus M-Wire nicht bestätigen. In dieser Untersuchung wurden GTX Feilen aus M-Wire (GTX; Dentsply Tulsa-Dental Specialities, Tulsa, OK) und TF-Feilen (TF; SybronEndo, Orange, CA) mit K3-Feilen (K3; SybronEndo) aus konventionellem Nickel-Titan in artifizialen Wurzelkanälen verglichen. Einzig die TF-Feilen erzielten bessere Resultate im Vergleich zu den K3-Feilen.

Aufgrund der unterschiedlichen Datenlage bleiben weitere Untersuchungen abzuwarten.

## 2.5 Die untersuchten Aufbereitungssysteme

Nachfolgend soll auf die drei in dieser Studie verwendeten Systeme Protaper Next, F6 SkyTaper und WaveOne eingegangen werden.

### 2.5.1 Protaper Next

#### 2.5.1.1 Feilen

Protaper Next ist ein 2013 eingeführtes System für die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung, welches aus zwei Aufbereitungsfeilen und drei Ergänzungsfeilen besteht.

Die Aufbereitungsfeilen X1 und X2 haben eine Größe von 017 und 025 mit einer Konizität von 4% (017) und 6% (025). X3-X5 stellen Ergänzungsfeilen der Größen 030, 040 und 050 mit einer Konizität von 7% (030) und 6% (040, 050) dar, die für die Formgebung größerer Kanalanatomien vorgesehen sind (Abb. 16, Abb. 17). Alle Feilen sind in drei unterschiedlichen Arbeitslängen (21 mm, 25 mm und 31 mm) verfügbar (Dentsply Maillefer Produktbroschüre (Protaper Next)).



Abb. 16: Darstellung der Protaper Next Feile der Größe 050 (6%)

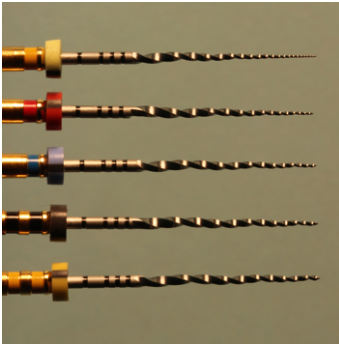


Abb. 17: Darstellung der Protaper Next Feilen der Größen 017 (4%), 025 (6%), 030 (7%), 040 (6%), 050 (6%)

### 2.5.1.2 Besonderheiten

Neuartig bei der Generation Protaper Next sind ein exzentrisch rechteckiger Querschnitt, variierende Konizitäten innerhalb des Instruments und die M-Wire Technologie (Ruddle, Machtou et al. 2013).

Der exzentrisch rechteckige Querschnitt verursacht eine Wellen- oder Schlangenbewegung, wodurch die Feile dem Kanalverlauf noch genauer folgen soll (Abb. 18). Dabei soll es zu einer geringeren Drehmomentbelastung kommen, da nur zwei Kanten stets an der Kanalwand anliegen. Weiterhin bietet der Querschnitt mehr Platz, sodass der Abtransport der Dentinspäne erleichtert werden soll (Dentsply Maillefer Produktbroschüre (Protaper Next)). Dieses wurde bereits in einer aktuellen Studie von Koçak aus dem Jahre 2015 (Koçak, Çiçek et al. 2015) bestätigt.

Es wurde gezeigt, dass die Verwendung der Protaper Next Feilen im Vergleich zu Protaper Universal Feilen im apikalen Bereich zu einer geringeren Debrisextrusion führte.

Die variierenden Konizitäten innerhalb des Instruments sollen zu mehr Flexibilität und zu einer größeren Schonung des Wurzelkambiums während der Aufbereitung führen (Ruddle, Machtou et al. 2013). Neben den variierenden Konizitäten soll auch die M-Wire Technologie die Flexibilität der Feile (Dentsply Maillefer Produktbroschüre (Protaper Next)) sowie die Resistenz gegenüber

zyklischen Ermüdungen erhöhen (Johnson, Lloyd et al. 2008; Gao, Shotton et al. 2010; Pereira, Peixoto et al. 2012).

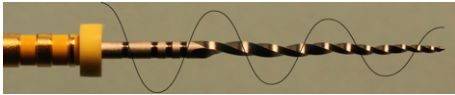


Abb. 18: Darstellung der Wellen- oder Schlangenbewegung einer Protaper Next Feile der Größe 050 entlang des Schneidbereichs

### 2.5.1.3 Anwendung

Die Benutzung der Protaper Next Feilen erfolgt in einem dafür vorgesehenen drehmomentgesteuerten Endomotor unter kontinuierlicher Rotation.

Die Instrumente werden mit einer Umdrehungsfrequenz von 300/min und einem Drehmoment von 2,0 Ncm betrieben. Vor der Aufbereitung der Wurzelkanäle sollte zunächst ein reproduzierbarer Gleitpfad sichergestellt werden. Der Kanal kann mit feinen Handfeilen der ISO Größe 010 oder mit speziell maschinell betriebenen Gleitpfadfeilen erweitert werden. Diese „Pathfiles“ werden in den Größen 013 und 016 mit einer Konizität von 2% angeboten (Dentsply Maillefer Produktbroschüre (Protaper Next)). Die Aufbereitung der Wurzelkanäle erfolgt nach der Single-Length Technik in sogenannter „Picking Motion“, d.h. in tupfender Arbeitsweise. Es wird so lange mit der ausgewählten Feile gearbeitet, bis die Arbeitslänge erreicht ist.

Je nach Länge, Weite und Krümmung des Kanals wird die Aufbereitung bis zur gewünschten Aufbereitungsgröße fortgeführt (Ruddle, Machtou et al. 2013). Nach Abschluss der Wurzelkanalaufbereitung werden die Feilen verworfen, um die Gefahr von Feilenbrüchen zu verringern, Kreuzkontaminationen auszuschließen und eine optimale Schneidleistung zu gewährleisten (Dentsply Maillefer Produktbroschüre (Protaper Next)).

## 2.5.2 F360/F6 SkyTaper

### 2.5.2.1 Feilen

F360 ist ein Feilensystem der Firma Komet für die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung, welches aus zwei Aufbereitungsfeilen sowie zwei Ergänzungsfeilen besteht.

Die Aufbereitungsfeilen haben eine Größe von 025 und 035, die Ergänzungsfeilen von 045 und 055 mit einer Konizität von 4%.

Die Ergänzungsfeilen sind wie bei der Verwendung des Protaper Next Systems für die Formgebung größerer Kanalanatomien vorgesehen. Alle Feilen sind in drei unterschiedlichen Arbeitslängen (21 mm, 25 mm und 31 mm) verfügbar (Komet Dental Produktbroschüre (F360)).

Die in dieser Studie verwendeten F6 SkyTaper Feilen, kurz F6 Feilen, stellen ein Ergänzungssystem zu den F360 Feilen dar. Die Konizität dieser Feilen wurde an die Konizität vieler auf dem Markt befindlichen Systeme angepasst, sodass neben einer Konizität von 4% (F360) auch Feilen mit einer Konizität von 6% (F6) angeboten werden können. Die daraus resultierenden konischeren Kanalaufbereitungen ermöglichen alle Variationen der Obturationsmethode. Das System besteht aus drei Aufbereitungsfeilen sowie zwei Ergänzungsfeilen. Die Aufbereitungsfeilen haben eine Größe von 020, 025 und 030 (Abb. 19, Abb. 20), die Ergänzungsfeilen von 035 und 040 und sind ebenfalls in drei verschiedenen Arbeitslängen (21 mm, 25 mm und 31 mm) erhältlich (Komet Dental Produktbroschüre (F6 SkyTaper)).



Abb. 19: Darstellung der F6 Feile der Größe 030 (6%)

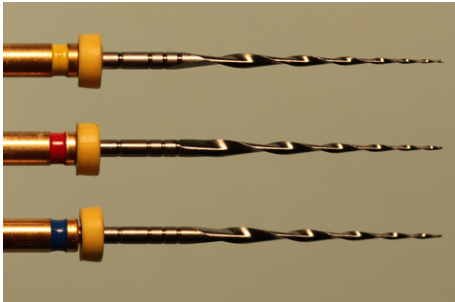


Abb. 20: Darstellung der F6 Feilen der Größen 020 (6%), 025 (6%) und 030 (6%)

### 2.5.2.2 Besonderheiten

Die Feilensysteme weisen einen Doppel-S-Querschnitt mit zwei aktiven Schneidekanten auf. Ein großer Spanraum und ein kleiner Schneidekantenwinkel sorgen für eine hohe Effizienz der Feilen, sodass die Aufbereitungszeit reduziert werden kann. Dieses wurde bereits von Bürklein und Kollegen (Bürklein, Benten et al. 2013) mit den auf dem Markt vorhandenen F360 Feilen untersucht, die einen vergleichbaren Querschnitt aufweisen. Dabei reduzierte sich die Aufbereitungszeit bei der Verwendung der Feilen um 30% im Vergleich zu den anderen in der Studie verwendeten Feilen. Weiterhin sorgt der kleine Instrumentenkern für eine hohe Flexibilität der Instrumente. Auch diese Instrumente sind für den Einmalgebrauch vorgesehen (Komet Dental Produktbroschüre (F6 SkyTaper)).

### 2.5.2.3 Anwendung

Die Benutzung erfolgt in einem drehmomentgesteuerten Endomotor unter Vollrotation bei einer Umdrehungsfrequenz von 300/min. Für die F6 Feilen der Größen 020-030 wird ein Drehmoment von 2,2 Ncm, für die Ergänzungsfeilen der Größen 035-040 ein Drehmoment von 2,8 Ncm empfohlen (Komet Dental Produktbroschüre (F6 SkyTaper)).



Vor der Aufbereitung sollte der Kanaleingangsbereich mit einem Opener (OP10L19) bearbeitet werden. Dieses Instrument hat eine Konizität von 10% und erweitert den Zugangsbereich der Wurzelkanäle zur Erleichterung der Aufbereitung. Der Gleitpfad kann anschließend mit K-Feilen der ISO-Größe 015 oder mit speziell maschinell betriebenen Gleitpfadfeilen hergestellt werden.

Die von Komet angebotenen „PathGlider“ werden in den Größen 015 und 020 mit einer Konizität von 3% angeboten.

In Abhängigkeit der zuvor verwendeten Feilengröße zur Verifizierung des Gleitpfads wird die passende F6 Feile so ausgewählt, dass eine ISO-Feilen-Größe übersprungen wird. Je nach Wurzelkanalanatomie erfolgt somit die Auswahl der entsprechenden Feile (Komet Dental Produktbroschüre (F6 SkyTaper)). Die meisten Kanäle sind bereits mit ein bis zwei Feilen adäquat aufbereitet. Die Wurzelkanalaufbereitung wird ebenfalls nach der Single-Length Technik durchgeführt.

### **2.5.3 WaveOne**

#### **2.5.3.1 Feilen**

Das WaveOne System ist ein aus M-Wire gefertigtes Feilensystem, welches in reziprok rotierender Arbeitsweise eingesetzt wird und 2011 auf dem Dentalmarkt etabliert wurde. Es besteht aus insgesamt drei Aufbereitungsfeilen, erhältlich in den Größen 021 („small“), 025 („primary“) und 040 („large“) mit Konizitäten von 6% (021) und 8% (025, 040). Alle Feilen sind in drei unterschiedlichen Arbeitslängen (21 mm, 25 mm und 31 mm) verfügbar (Dentsply Maillefer Produktbroschüre (WaveOne)), (Abb. 21, Abb. 22).

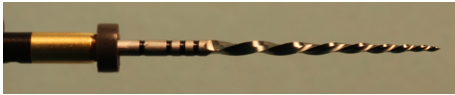


Abb. 21: Darstellung der WaveOne Feile der Größe 040 (8%)

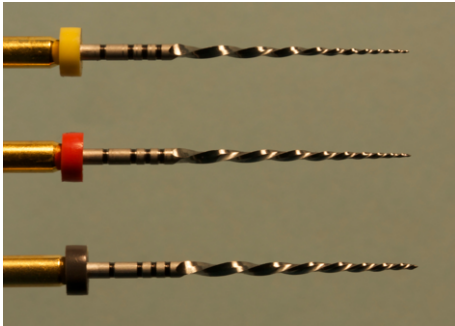


Abb. 22: Darstellung der WaveOne Feilen der Größen 021 (6%), 025 (8%) und 040 (8%)

### 2.5.3.2 Besonderheiten

Das System soll die komplette Aufbereitung eines Wurzelkanals in den meisten Fällen mit nur einem Instrument möglich machen. Dieses führt zu einer um bis zu 40% verringerten Aufbereitungszeit. Wie bei den anderen vorgestellten Systemen sind auch die WaveOne Feilen für den Einmalgebrauch vorgesehen (Dentsply Maillefer Produktbroschüre (WaveOne)).

Das Ein-Feilen-System birgt weiterhin den Vorteil der Wirtschaftlichkeit durch Kostenminimierung (Yared 2008; Gambarini, Testarelli et al. 2013). Je nach Wurzelkanalmorphologie kann somit eine der drei zur Verfügung stehenden Feilen gezielt eingesetzt werden.

Die Studie von Berutti und Kollegen zeigte jedoch (Berutti, Paolino et al. 2012), dass der Gebrauch von „Pathfiles“ vor der Aufbereitung mit der WaveOne „primary“-Feile (025/08) weniger Abweichungen in der Kanalkurvatur verursachte. Demzufolge verbessert ein großer Kanaleingang die Leistung des Instruments.

### 2.5.3.3 Anwendung

Das WaveOne Feilensystem sollte nur in Endomotoren mit entsprechender Voreinstellung verwendet werden.

Vor der Aufbereitung der Wurzelkanäle muss zunächst mit einer K-Feile der ISO-Größe 010 ein reproduzierbarer Gleitpfad sichergestellt werden. Anschließend erfolgt die Wahl der geeigneten WaveOne Feile. Die meisten Kanäle können mit der WaveOne „primary“-Feile aufbereitet werden. Stößt man jedoch bereits mit einer K-Feile der ISO-Größe 010 auf starken Widerstand, sollte die Aufbereitung mit der WaveOne „small“-Feile (021/06) erfolgen. Wenn sich ein Instrument der ISO-Größe 020 leicht einführen lässt, sollte die Aufbereitung mit der WaveOne „large“-Feile (040/08) durchgeführt werden.

Die Wurzelkanalaufbereitung erfolgt ebenfalls nach der Single-Length Technik (Jadent: wave one von Dentsply. URL: <http://www.dentsplywaveone.de/de/applikation.html>).

## 2.6 Zusammenfassung

Bakterielle, traumatische oder iatrogene Faktoren können die Ursache einer irreversiblen Schädigung der Pulpa und des sie umgebenden Gewebes sein.

Das vorrangige Ziel einer Wurzelkanalbehandlung ist es, entzündetes Gewebe zu entfernen, den Kanal zu säubern und dem Kanalverlauf entsprechend aufzubereiten. Insbesondere die Aufbereitung von gekrümmten Kanälen mit Edelstahlfeilen stellt den Behandler vor eine Herausforderung, da die mangelnde Flexibilität der Feilen häufig zu Kanaltransportationen führt.

Diese Problematik konnte durch die Einführung der Nickel-Titan-Feilen in der Endodontie verringert werden. Zahlreiche Studien belegen die verbesserte Aufbereitungsqualität und Zeitersparnis gegenüber herkömmlichen Edelstahlfeilen. Die Weiterentwicklung der Nickel-Titan-Legierung sowie die

Entwicklung neuer Systeme zielen darauf ab, die Effektivität und Wirtschaftlichkeit zu steigern.

Protaper Next, F6 und WaveOne stehen stellvertretend für die neue Generation von Aufbereitungssystemen.

Alle Systeme arbeiten mit einem reduzierten Feilensatz, sodass häufige Instrumentenwechsel entfallen. Zudem kann bei der Wurzelkanalaufbereitung das anfänglich programmierte Drehmoment und die Umdrehungsfrequenz während der Behandlung mit den Feilen eines Systems beibehalten werden. Änderungen der Einstellungen und eine damit verbundene Unterbrechung der Behandlung sind nicht mehr notwendig. Protaper Next und F6 sind vollrotierende Systeme, wohingegen WaveOne im reziproken Bewegungsmuster arbeitet. Die reziproke Arbeitsweise und die von der Firma Dentsply Tulsa Dental Specialities eingeführte M-Wire Technologie sollen zu leistungsfähigeren und flexibleren Feilen führen, die unter anderem das Auftreten von Transportationen verringern sollen. Weiterhin soll die Drehmomentbelastung der Feile durch das Bewegungsmuster reduziert werden, sodass die Aufbereitung aufgrund der geringeren Belastung der einzelnen Feile mit einem geringeren Instrumentensatz durchgeführt werden kann.

In der vorliegenden Arbeit werden deshalb die vollrotierenden Systeme und das reziproke System untereinander und im Vergleich zur manuellen Aufbereitung hinsichtlich ihrer Aufbereitungsqualität und ihrer Aufbereitungszeit beurteilt.

### 3 Arbeitshypothese und Zielsetzung

Erstes Ziel der vorliegenden in-vitro Untersuchung war es, den Unterschied der neuartigen maschinellen Systeme Protaper Next, F6 und WaveOne gegenüber der manuellen Aufbereitungstechnik nachzuweisen. Ein weiteres Ziel war es zu zeigen, dass unterschiedliche Antriebsmodi zu qualitativen Unterschieden bei unerfahrenen Behandlern führen. Dazu wurden die vollrotierenden Systeme und das reziprok arbeitende System miteinander verglichen.

Zum Nachweis der eben genannten Arbeits- bzw. Alternativhypothesen wurden mögliche Unterschiede anhand der auftretenden Fehler, der Kanaltransportationen, der benötigten Aufbereitungszeiten und der Instrumentenfrakturen aufgezeigt.

Der experimentelle Teil umfasste eine Gruppe aus insgesamt 30 Studierenden, die jeweils zwölf in Epoxidharz eingelassene künstliche, gekrümmte Wurzelkanäle mit den oben erwähnten Systemen bearbeiteten. Die Blöcke wurden vor und nach der Durchführung fotografiert, untersucht und anhand der nachfolgenden Nullhypothesen ausgewertet. Darüber hinaus wurde am Ende der Versuchsdurchführung ein Fragebogen ausgeteilt. Die Studierenden sollten die Einfachheit und Sicherheit der neuartigen maschinellen Aufbereitungssysteme beurteilen. Somit konnte eine Gegenüberstellung erfolgen, inwieweit sich die subjektiven Wahrnehmungen der Studierenden mit den tatsächlichen Ergebnissen dieser Studie deckten.

Aus statistischen Gründen wurden folgende Nullhypothesen untersucht:

#### 1. Aufbereitungsfehler

1.1 Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen

Erfahrungen zu einer gleichen Anzahl an Aufbereitungsfehlern im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.

- 1.2 Trotz der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich keine Unterschiede in der Anzahl der Aufbereitungsfehler zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.

## **2. Transportationen**

- 2.1 Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer gleichen Anzahl an Transportationen im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.

- 2.2 Trotz der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich keine Unterschiede in der Anzahl der Transportationen zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.

## **3. Aufbereitungszeiten**

- 3.1 Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer gleichen Aufbereitungszeit im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.

- 3.2 Trotz der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich keine Unterschiede in der Aufbereitungszeit zwischen den vollrotierenden

Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.

#### **4. Instrumentenfrakturen**

- 4.1 Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer gleichen Anzahl an Instrumentenfrakturen im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.
  
- 4.2 Trotz der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich keine Unterschiede in der Anzahl der Instrumentenfrakturen zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.

#### **5. Analyse des Fragebogens**

## 4 Material und Methode

### 4.1 Versuchsdesign

Für die Versuchsreihe wurden zunächst 360 künstliche Wurzelkanäle fotografisch erfasst. 30 von insgesamt 56 Studierenden eines ersten klinischen Semesters (6. Semester) nahmen an der Versuchsreihe im Sinne eines Convenience Samples teil. Die Studierenden bekamen vor der Versuchsdurchführung eine auf die Thematik der Studie abgestimmte theoretische und praktische Einführung in die manuelle und maschinelle Wurzelkanalaufbereitung. Die zum Semester gehörige Endodontievorlesung sowie der praktische Arbeitsteil wurden bereits während des Semesters gelehrt. Nach einer randomisierten Zuordnung bereitete jeder Proband zwölf Epoxidharz-Blöcke mit vier verschiedenen Systemen auf. Es wurden jeweils drei Kanäle pro System bearbeitet: maschinell mit dem Protaper Next System, dem F6 System und dem WaveOne System sowie manuell mit Hedström-Edelstahlfeilen.

Die Studierenden notierten die Aufbereitungszeiten pro Block tabellarisch in Sekunden. Frakturen wurden protokolliert und aus der Berechnung der Zeiten ausgenommen.

Nach der Versuchsdurchführung wurden die Kanäle erneut fotografiert und mit den Anfangsbildern unter Zuhilfenahme von Adobe Photoshop CS 5 überlagert. Abschließend wurden die Aufnahmen auf mögliche Aufbereitungsfehler und Transportationen untersucht, Instrumentenfrakturen vermerkt und die daraus resultierenden Ergebnisse statistisch untersucht (Tab. 1).

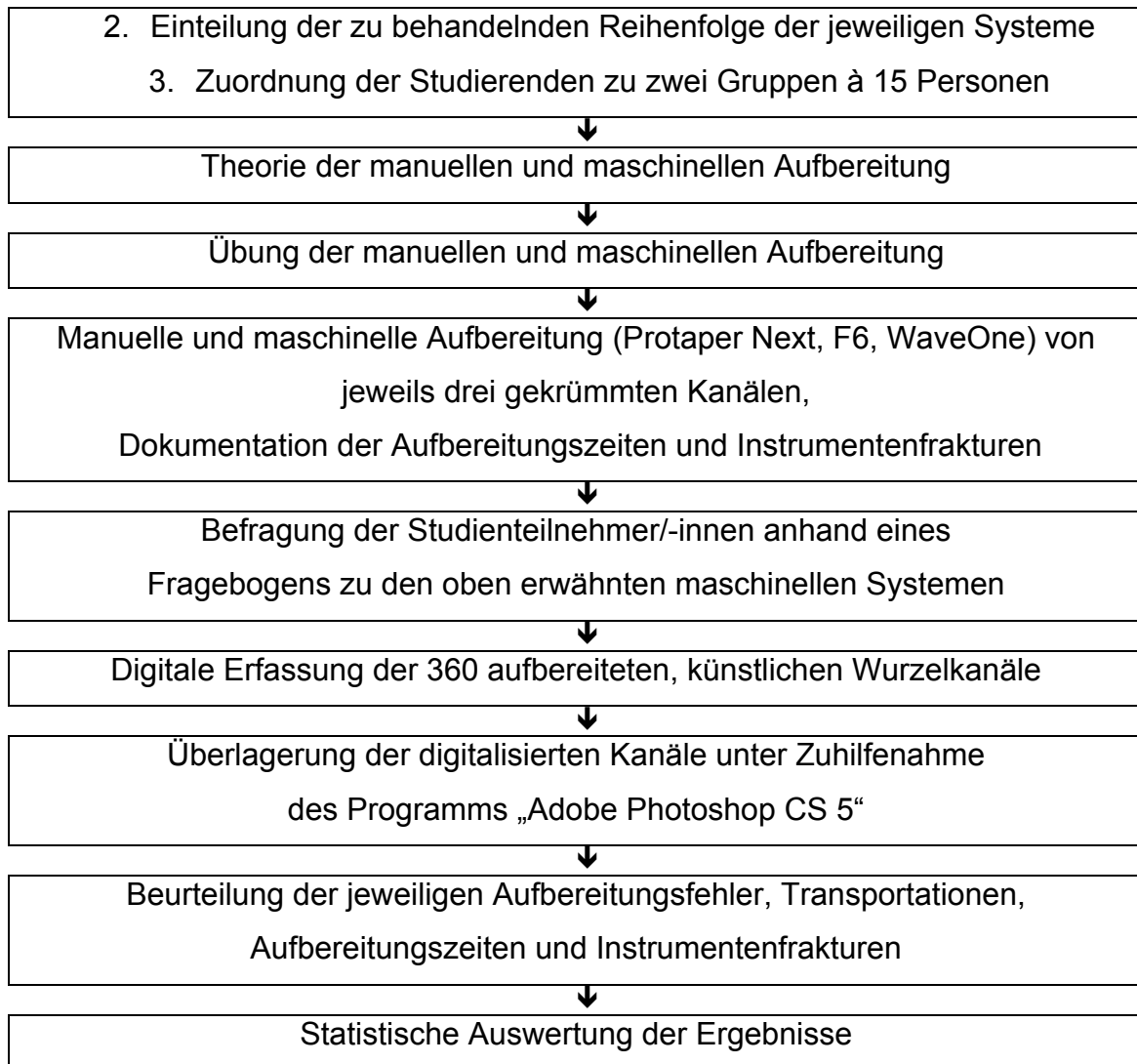
Digitale Erfassung und Kennzeichnung von 360 künstlichen Wurzelkanälen



Randomisierung:

1. Einteilung der Kanäle in vier Gruppen (s.o.)





Tab. 1: Versuchsdesign

## 4.2 Studienteilnehmer/-innen

Die Aufbereitung der künstlichen, gekrümmten Wurzelkanäle wurde von Studierenden der Zahnmedizin eines ersten klinischen Semesters des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf im Rahmen des Phantomkurses durchgeführt.

Die Studierenden wurden, wie im Versuchsdesign beschrieben, in Gruppe A und Gruppe B mit je 15 Teilnehmern eingeteilt.

Der Versuchsteil fand an zwei aufeinanderfolgenden Tagen in den Räumlichkeiten des Rothe-Geussenhainer-Hauses (N 45) statt.

Die Studierenden besaßen zum Zeitpunkt der Versuchsreihen alle die gleichen theoretischen Grundkenntnisse über die konventionelle manuelle und maschinelle Wurzelkanalaufbereitung sowie praktische Erfahrungen aus dem Phantomkurs.

### **4.3 Aufbereitungssysteme und Maschinerien**

Für die Bearbeitung der künstlichen Wurzelkanäle wurden vier Aufbereitungssysteme bereitgestellt. Die maschinell vollrotierenden Systeme Protaper Next (Dentsply Maillefer) und F6 (Komet), das reziprok arbeitende System WaveOne (Dentsply Maillefer) sowie Hedström-Edelstahlfeilen (VDW) zur manuellen Aufbereitung.

Die F6 Feilen wurden mit dem Endopilot der Firma Schlumbohm GmbH & Co. KG betrieben, die Protaper Next und die WaveOne Feilen mit dem X-Smart Plus Motor der Firma Dentsply Maillefer. Um die empfohlenen Umdrehungsfrequenzen und Drehmomente einzuhalten, wurden die voreingestellten Programme der Motoren verwendet.

### **4.4 Versuchsmodelle**

Die Versuchsreihe wurde an 360 künstlichen, gekrümmten Wurzelkanälen aus Epoxidharz (Komet) durchgeführt. In diese transparenten Blöcke war ein 19 mm langer gekrümmter Kanal eingelassen (Abb. 23). Die 19 mm teilten sich in 10 mm für den geraden koronalen Anteil und in 9 mm für den gekrümmten apikalen Anteil auf.

Die jeweiligen Kanäle verfügten über einen Krümmungsradius nach Pruett (Pruett, Clement et al. 1997) von 5,5 mm. Des Weiteren wiesen sie einen 40° Winkel auf, der mit der Messmethode nach Schneider (Schneider 1971) ermittelt wurde.

Der Bereich des Kanaleingangs war 5 mm tief und zeigte eine konische Form, die das Einbringen der Instrumente in den Probekörper erleichterte.

Der Konus wies einen Durchmesser von 4 mm auf und stellte zudem den oberen Abschluss des Prüfkörpers dar. Auf der Stirnseite des Blocks ging das Foramen apicale in eine 5 mm x 2,5 mm matte kreisrunde Vertiefung über.

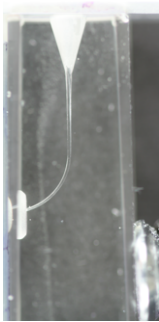


Abb. 23: Epoxidharz-Block, lateral

#### 4.5 Vorbehandlung der Epoxidharz-Blöcke

Die Blöcke wurden vor der Versuchsreihe vorbereitet, indem diese fortlaufend von 1 bis 360 durchnummeriert wurden (Abb. 24). Die fortlaufenden Nummern wurden mit einem Handstück und einem darin eingespannten Rosenbohrer ( $\varnothing$  0,4 mm) am rechten unteren Bereich hineingefräst. Der Wurzelkanal zeigte bei allen Probekörpern nach links, sodass eine seitengleiche Reproduzierbarkeit möglich war. Zu den Nummerierungen erfolgten zwei Kreuze als Markierungen am Kanaleingangsbereich.

Um sicherzustellen, dass die Kanäle durchgängig waren, wurde jeder der 360 Kanäle mit einer K-Feile (ISO 10) vorab bis zum Apex überprüft.

Die Kanäle wurden mit einer wässrigen Toluidinblau-Lösung eingefärbt, damit eine bessere Darstellung bei der digitalen Bearbeitung gewährleistet werden konnte (Abb. 25).

Um eine gleichmäßige Färbung der Blöcke zu erreichen, wurde eine 2 ml Spritze in Kombination mit einer stumpfen Kanüle ( $\varnothing$  0,4 mm) verwendet.

Nach der Färbung und Digitalisierung wurden alle Probekörper mit Wasser gereinigt, sodass ihr ursprünglicher Zustand wiederhergestellt war.

Damit die Aufbereitung der Studierenden nicht durch eine visuelle Kontrolle beeinflussbar war, wurden die Probekörper mit Klebeband abgeklebt.

- Schwarzes Klebeband → manuelle Aufbereitung (Hedström-Feilen)
- Weißes Klebeband → Protaper Next
- Rotes Klebeband → F6 SkyTaper
- Blaues Klebeband → WaveOne

Um eine Reinigung des Kanals zu ermöglichen, wurde im Bereich der apikalen Öffnung des Blocks ein Durchlass im Klebeband eingebracht.

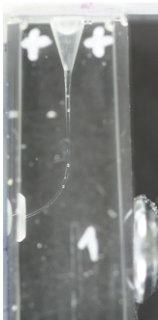


Abb. 24: Epoxidharz-Block mit eingravierter Zahl und Justierungskreuzen

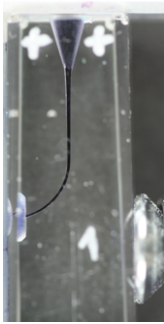


Abb. 25: Epoxidharz-Block, angefärbt mit Toluidinblau-Lösung

#### 4.6 Digitale Bilddokumentation der angefärbten Epoxidharz-Blöcke

Für die Vergleichbarkeit der Blöcke vor und nach der Aufbereitung erfolgte eine Bilddokumentation unter Zuhilfenahme einer Canon EOS 350 D Spiegelreflexkamera mit Makro-Objektiv und eines Reprständers (Firma Kaiser). Der Ständer ermöglichte einen konstanten Abstand zwischen dem Block und der Kamera.

Zur Erstellung der Bilder wurde der Makromodus der Kamera gewählt sowie manuelle Einstellungen an der Kamera selbst vorgenommen.

Als Bildhintergrund wurde Millimeterpapier für die spätere Auswertung verwendet. Die Ausleuchtung der Wurzelkanäle wurde durch zwei an dem Reprständer integrierte Fotolampen (Firma Kaiser eVision) realisiert. Diese wurden bei maximaler Ausleuchtung auf Stufe 8 verwendet (Abb. 26).

Die Epoxidharz-Blöcke wurden in einer speziellen Vorrichtung fixiert, welche die exakte Reproduzierbarkeit gewährleistete (Abb. 27). Die Bildspeicherung erfolgte über eine 8 GB große SD-Card. Mittels eines Übertragungskabels wurden die Bilder anschließend auf ein Mac Book Pro 13“ übertragen.

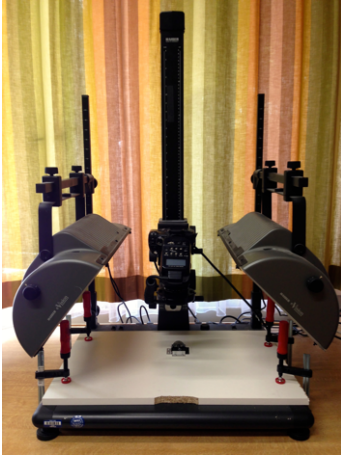


Abb. 26: Reproständer mit befestigter Spiegelreflexkamera und Fixierungsvorrichtung

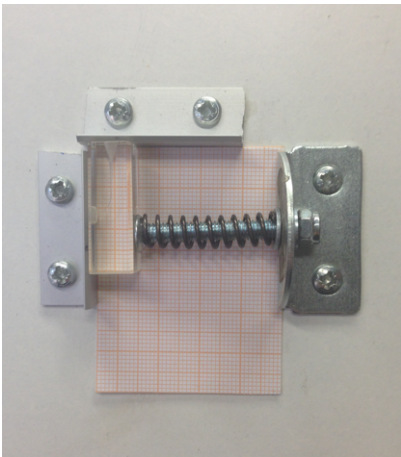


Abb. 27: Fixierungsvorrichtung mit Millimeterpapier

#### 4.7 Randomisierung

Unter Zuhilfenahme eines internetbasierten Zufallsgenerators ([www.random.org](http://www.random.org)) wurden die 360 nummerierten Blöcke auf die 30 Studierenden verteilt.

Die Probekörper wurden dadurch in vier gleich große Zahlenkolonnen gebracht. Für die einzelnen Systeme entstand somit eine Kolonne aus 90 Zahlen. Von diesen vier Kolonnen wurden je drei Zahlen in der jeweiligen Abfolge mit einer Nummer von 1 bis 3 am Blockboden gekennzeichnet. Aufgrund dessen konnte

eine entsprechende Einordnung in 30 Gruppen zu je vier mal drei Blöcken erfolgen.

Des Weiteren konnte dadurch jeder aufbereitete Wurzelkanal einem Studierenden zugeordnet werden und auf das von ihm verwendete Aufbereitungssystem geschlossen werden. Außerdem wurde auch die zu behandelnde Reihenfolge der jeweiligen Systeme sowie die Zuordnung der Studierenden zu zwei Gruppen à 15 Personen randomisiert.

## **4.8 Versuchsvorbereitungen mit den Studienteilnehmern/-teilnehmerinnen**

### **4.8.1 Einführung der Studienteilnehmer/-innen in die Theorie der manuellen und maschinellen Wurzelkanalaufbereitung**

Bevor die Studierenden die praktischen Versuche durchführten, bekamen sie eine Einführung in die Theorie der manuellen und maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. Dabei wurde besonders auf die anzuwendenden Instrumente, ihre Charakteristika und die Endomotoren eingegangen.

Anschließend erfolgte eine Diskussionsrunde, in der die Studierenden Zeit hatten, mögliche Fragen zu stellen und Unklarheiten zu beseitigen.

### **4.8.2 Übungsphase**

Vor dem eigentlichen Versuch fand eine 30-minütige Übungsphase statt, bei der die gewonnenen Erkenntnisse praktisch umgesetzt wurden.

Jeder Studierende erhielt vier Epoxidharz-Blöcke, die mit den gleichen Systemen, wie in den anschließenden Versuchsreihen, aufbereitet wurden. Während dieser Zeit konnten die Studierenden die jeweiligen Systeme unter Sicht verwenden und sich mit der jeweiligen Handhabung vertraut machen.

## **4.9 Versuchsdurchführung**

### **4.9.1 Wurzelkanalaufbereitung**

Nach Abschluss der Übungsphase wurden die Probekörper und die verwendeten Feilen verworfen.

An jeden Studierenden wurden neue Instrumentensätze und die nach dem in Punkt 4.7 dargestellten Zuteilungsmodus ausgewählten Blöcke verteilt. Folglich erhielt jeder Teilnehmer zwölf aufzubereitende, gekrümmte Wurzelkanäle, je drei für die manuelle Aufbereitung und je drei pro System für die maschinelle Aufbereitung mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne. Insgesamt wurden 360 Blöcke aufbereitet. War ein Kanal vollständig aufbereitet, so legte der Studierende eine 5-minütige Pause ein, um einer möglichen Ermüdung vorzubeugen.

#### **4.9.1.1 Arbeitslänge**

Damit eine identische Arbeitslänge bei allen Probekörpern gewährleistet werden konnte, wurde der Wurzelkanal vorab mit Hilfe eines Aufbereitungsinstruments, eines Gummistoppers und einer Messlehre vermessen. Für alle Prüfkörper wurde eine Arbeitslänge von 18 mm festgelegt.

#### **4.9.1.2 Manuelle Wurzelkanalaufbereitung**

Die manuelle Aufbereitung der Epoxidharz-Blöcke wurde mit Hedström-Edelstahlfeilen mit einer Konizität von 2% sowie einer Arbeitslänge von 25 mm durchgeführt.



Dabei wurde die im Phantomkurs erlernte Step-Back Technik zur Aufbereitung mit manuellen Instrumenten angewendet. Zwischen den einzelnen Arbeitsschritten wurde regelmäßig rekapituliert, mit H<sub>2</sub>O gespült und nochmal rekapituliert, um mögliche Späne aus dem Kanal zu entfernen.

Feilen der ISO-Größen 10-50 lagen für die Instrumentierung bereit. Der Wurzelkanal wurde in aufsteigender Reihenfolge aufbereitet. Die Aufbereitung endete im apikalen Bereich nach der Verwendung einer Hedström-Feile der ISO-Größe 30.

#### 4.9.1.3 Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung

Für die maschinelle Aufbereitung wurden die Systeme Protaper Next, F6 und WaveOne verwendet.

Mit einem Handinstrument der ISO-Größe 10 wurde bei allen aufzubereitenden Kanälen ein Gleitpfad nachgewiesen.

Daraufhin erfolgte die maschinelle Aufbereitung unter Zuhilfenahme eines Endomotors mit individuell auf das jeweilige System abgestimmtem Drehmoment und abgestimmter Umdrehungsfrequenz.

Es wurde explizit nach Herstellerempfehlungen gearbeitet und die Arbeitstechnik und Reihenfolge der Instrumente beachtet (siehe Punkt 2.5; Tab. 2-Tab. 4).

Wie schon bei der manuellen Aufbereitung erwähnt, wurde auch hier auf Rekapitulationen und ausreichende Spülungen mit H<sub>2</sub>O zwischen den Arbeitsschritten Wert gelegt.

ISO-Größe	Konizität
17	4%
25	6%
30	7%

Tab. 2: Protaper Next Ni-Ti-Instrumente zur maschinellen Aufbereitung

ISO-Größe	Konizität
20	6%
25	6%
30	6%

Tab. 3: F6 Ni-Ti-Instrumente zur maschinellen Aufbereitung

ISO-Größe	Konizität
21	6%
25	8%

Tab. 4: WaveOne Ni-Ti-Instrumente zur maschinellen Aufbereitung

#### 4.9.1.4 Instrumentenfrakturen

Kam es während der Aufbereitung der Blöcke zu Frakturen der Instrumente im Kanal, wurde jeweils die Feile, die Zeit sowie die Blocknummer auf dem dafür vorab ausgeteilten Dokumentationsbogen notiert. Anschließend wurde die Feile ausgetauscht und die Aufbereitung der nächsten Blöcke fortgesetzt. Verbogene oder aufgewundene Instrumente mussten zu jedem Zeitpunkt vom Studierenden gegen neue Instrumente ausgetauscht werden.

#### 4.9.1.5 Aufbereitungszeiten

Die Aufbereitungszeit wurde mittels einer Stoppuhr in Sekunden gemessen und umfasste die Aufbereitung, die Instrumentenwechsel, die zwischenzeitlichen Spülungen sowie die Rekapitulationen. Somit konnte Auskunft über die gesamte Aufbereitungszeit gegeben werden.

#### **4.10 Befragung der Studierenden**

Nach Abschluss der Versuchsdurchführung wurde den Studierenden ein Fragebogen ausgegeben.

Das Ausfüllen des Bogens erfolgte anonym. Hierbei wurde auf alle verwendeten maschinellen Aufbereitungssysteme eingegangen.

1. Welches System erschien oder welche Systeme erschienen Ihnen einfacher zu erlernen?
2. Welches System erschien oder welche Systeme erschienen Ihnen in der Anwendung sicherer?

Dabei konnten die Studierenden als eine Möglichkeit die Systeme nach Belieben in Ihre persönliche Reihenfolge bringen oder sich für „Alle Systeme gleich“ entscheiden.

#### **4.11 Digitale Bilddokumentation der aufbereiteten Epoxidharz-Blöcke**

Nach der Wurzelkanalaufbereitung wurden die farbigen Klebebänder von den Blöcken entfernt und jeder Wurzelkanal in der Vorrichtung fotografiert.

Das Millimeterpapier wurde anschließend gegen ein schwarzes Blatt Papier ausgetauscht und die Blöcke ohne Farbstoffpenetration erneut fotografiert.

Diese wurden einzeln in die vorgesehene Fixierungsvorrichtung eingebracht und mit zwei in den Repröstanänder integrierten Lichtquellen ausgeleuchtet (Abb. 26, Abb. 27).

Die Datenspeicherung erfolgte analog zur Speicherung vor der Aufbereitung wie in Punkt 4.6 beschrieben.

#### 4.12 Morphologische Beurteilung der Wurzelkanalaufbereitungen

Die Bilddateien wurden zur Beurteilung der morphologischen Veränderungen der Kanäle über das Bildbearbeitungsprogramm Adobe Photoshop CS 5 mit einem Zoomfaktor von 100% vergrößert dargestellt. Die Wurzelkanäle wurden auf Fehlerfreiheit oder das Vorliegen von charakteristischen Aufbereitungsfehlern wie Zip-Elbow-Effekt, Ledge und Apical Blockage untersucht (Abb. 28-Abb. 31).



Abb. 28: fehlerfreie Aufbereitung

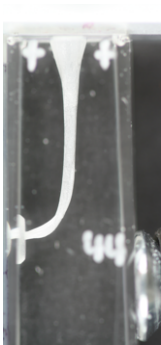


Abb. 29: Zip-Elbow-Effekt

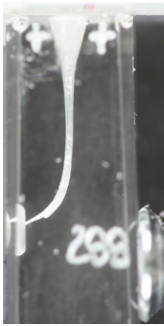


Abb. 30: Ledge

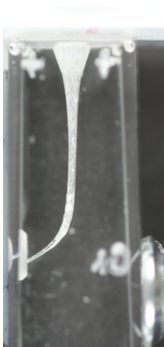


Abb. 31: Apical Blockage (Apikale Blockade)

#### 4.13 Überlagerung der Bilddateien am PC

Die digitalen Bilddateien wurden mithilfe von Adobe Photoshop CS 5 überlagert, um die Aufbereitung beurteilen zu können. Dazu öffnete man die Dateien mit dem eingefärbten Wurzelkanal und dem aufbereiteten Wurzelkanal (Abb. 32, Abb. 33), überlagerte das Bild des bearbeiteten Kanals und reduzierte die Deckkraft um 50% (Abb. 34, Abb. 35).

Der aufbereitete Kanal konnte anhand der zuvor stattgefundenen Markierungen ausgerichtet werden. Diese Untersuchungsmethode wurde auch in anderen Studien bereits angewendet (Baumann and Roth 1999; Sonntag, Guntermann et al. 2003).

**Vor der Aufbereitung:**



Abb. 32: eingefärbter, unaufbereiteter Wurzelkanal



**Nach der Aufbereitung:**

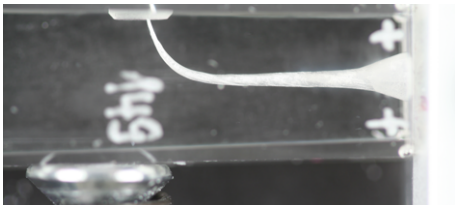


Abb. 33: aufbereiteter Wurzelkanal



**Überlagerte Wurzelkanäle:**

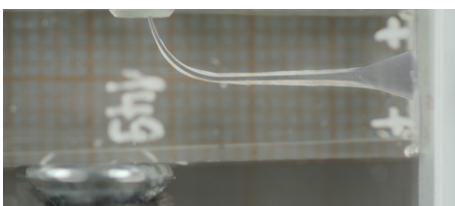


Abb. 34: mit Adobe Photoshop überlagerte Wurzelkanäle

#### 4.14 Quantitative Untersuchungen zur Kanaltransportation und zum Materialabtrag

Vor der Versuchsdurchführung wurde eine Maske unter Zuhilfenahme von Adobe Photoshop CS 5 erstellt, um die Transportationen beurteilen zu können (Abb. 36).

Diese Maske reproduziert den exakten Kanalverlauf. Die Messung wurde an sechs definierten Punkten durchgeführt. Der erste Messpunkt befand sich in einem Abstand von 1 mm zur apikalen Öffnung des Blocks, jeder weitere Punkt in einem Abstand von 2 mm (Abb. 37).

Die erstellte Maske wurde nach durchgeführter Überlagerung der Kanäle vor und nach der Versuchsreihe aufgelegt, um eine quantitative Untersuchung zum Materialabtrag an den definierten Messpunkten vorzunehmen.

Ein Zoom-Faktor von 100% und ein in Adobe Photoshop befindliches Lineal wurden zur Längenbestimmung eingesetzt, um ein möglichst exaktes Ergebnis zu erzielen.

Der Materialabtrag wurde an der Innen- und Außenkurvatur bestimmt und in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel überführt und ausgewertet (Abb. 38).

Definitionsgemäß liegt nach Luiten (Luiten, Morgan et al. 1995) eine Kanaltransportation vor, wenn der entstandene Materialabtrag einer Kanalseite den der gegenüberliegenden Seite an einem Punkt um den Faktor 3 überschreitet.

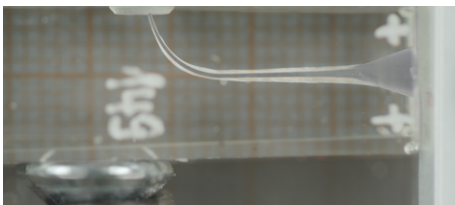


Abb. 35: mit Adobe Photoshop überlagerte Wurzelkanäle



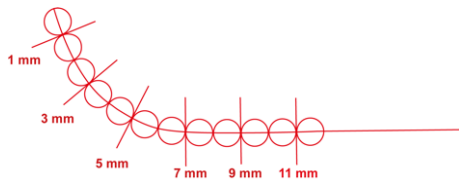


Abb. 36: Darstellung der erstellten Maske

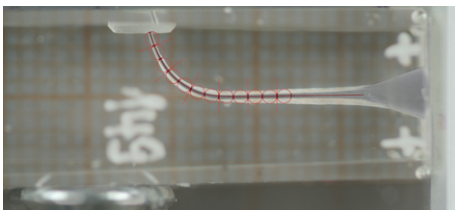


Abb. 37: überlagerte Wurzelkanäle mit Maske

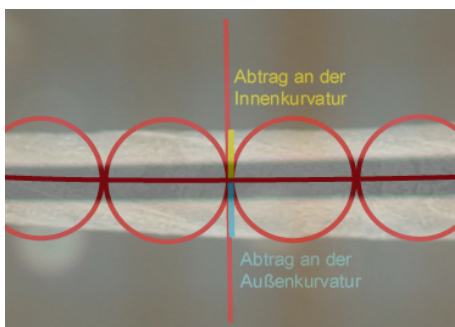


Abb. 38: Darstellung der Messung für den Materialabtrag im Wurzelkanal



#### 4.15 Statistische Auswertung

Die aus der Studie hervorgegangenen Daten wurden mithilfe des Statistikprogramms SPSS 21.0 ausgewertet.

Um mögliche Unterschiede zwischen der maschinellen und der manuellen Aufbereitung sowie zwischen den vollrotierenden Systemen und dem reziprok arbeitenden System in Bezug auf vorhandene Aufbereitungsfehler, Transportationen, Aufbereitungszeiten und Instrumentenfrakturen zu untersuchen, wurden folgende statistische Tests durchgeführt:

Für den Vergleich der Aufbereitungszeiten wurde der T-Test für unabhängige Stichproben verwendet. Die Unterschiede im Auftreten dichotomer Variablen (Aufbereitungsfehler, Transportationen und Instrumentenfrakturen) je System wurden über die logistische Regression analysiert.

Der prozentuale Anteil der Aufbereitungsfehler sowie die Kennzahlen der Aufbereitungszeiten der Kanäle wurden aus allen, für die jeweiligen Vergleiche relevanten, vollständig behandelten Wurzelkanälen ermittelt, deren Behandlung nicht durch Instrumentenfrakturen abgebrochen wurde. Der prozentuale Anteil der Transportationen wurde aus allen, für die jeweiligen Vergleiche relevanten, vollständig behandelten Wurzelkanälen ermittelt. Aus der Berechnung ausgeschlossen wurden Kanäle mit Aufbereitungsfehlern sowie Kanäle mit Instrumentenfrakturen. Der prozentuale Anteil der Instrumentenfrakturen wurde aus allen, für die jeweiligen Vergleiche relevanten, behandelten Wurzelkanälen ermittelt.

In dieser Studie wurden lediglich die zuvor formulierten Haupthypothesen getestet, da die Anzahl der sinnvollen Hypothesentests, die auf einer Datenmenge durchgeführt werden, in der Statistik beschränkt ist (Victor, Elsässer et al. 2010). Auf weitere Hypothesentests wurde verzichtet und hier dann die beschreibende Darstellung genutzt.

Die zuvor formulierten Haupthypothesen wurden unter Anwendung der Bonferroni-Holm-Methode getestet. Ein Signifikanzniveau von 5% wurde für alle Auswertungen angenommen, sodass Unterschiede dann als signifikant bezeichnet wurden, wenn  $p < 0,05$  war.

## 5 Ergebnisse

Im Ergebnisteil sind mögliche Unterschiede zwischen der maschinellen und der manuellen Aufbereitung sowie zwischen den vollrotierenden Systemen und dem reziprok arbeitenden System in Bezug auf vorhandene Aufbereitungsfehler, Transportationen, Aufbereitungszeiten und Instrumentenfrakturen dargestellt.

### 5.1 Aufbereitungsfehler (Zip-Elbow-Effekt, Ledge, Apical Blockage)

#### 5.1.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung

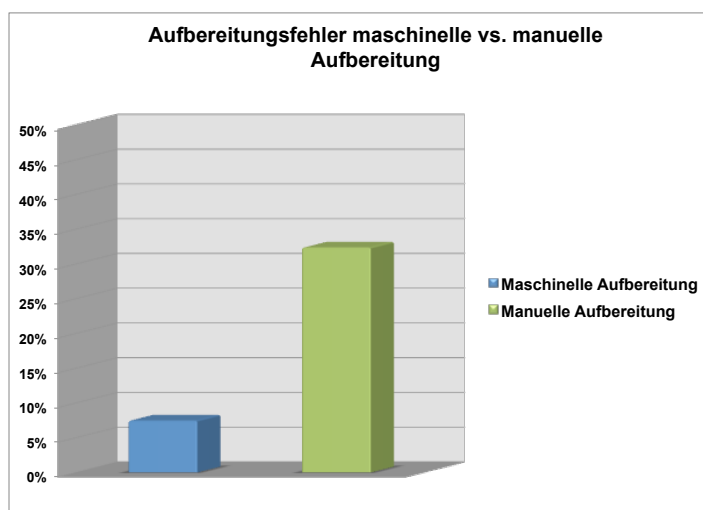


Abb. 39: Prozentuale Darstellung der Aufbereitungsfehler für die maschinelle und die manuelle Aufbereitung

Die maschinelle Aufbereitung mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne führte mit 7,5% zu signifikant ( $p=0,000$ ) weniger Aufbereitungsfehlern als die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 32,4% (Abb. 39).

### 5.1.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung

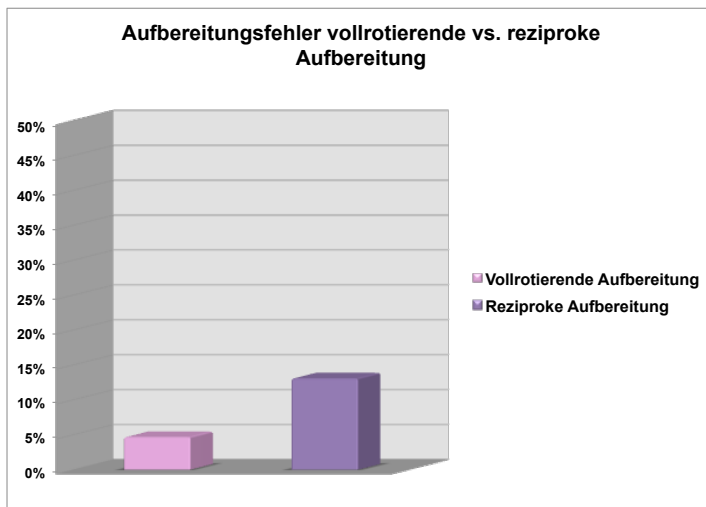


Abb. 40: Prozentuale Darstellung der Aufbereitungsfehler für die vollrotierende und die reziproke Aufbereitung

Die maschinelle Aufbereitung mit den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 führte mit 4,7% zu weniger Aufbereitungsfehlern als die maschinelle Aufbereitung mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne mit 13,1% (Abb. 40). Die statistische Untersuchung zeigte jedoch, dass der Unterschied nicht signifikant war ( $p=0,065$ ).

### 5.1.3 Aufbereitungsfehler in der Einzeldarstellung

Die Systeme wurden mit der prozentualen Anzahl an Aufbereitungsfehlern einander gegenübergestellt, um aufzuzeigen, wie sich die gesamten Aufbereitungsfehler auf die einzelnen Systeme verteilen.

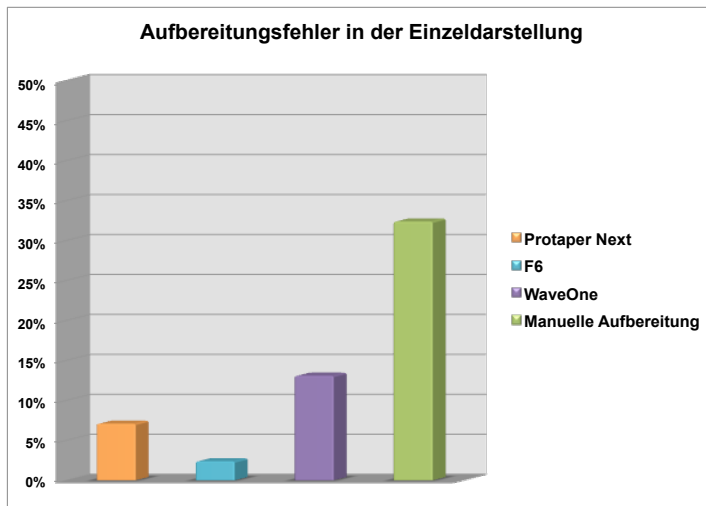


Abb. 41: Prozentuale Darstellung der Aufbereitungsfehler für die 4 Aufbereitungssysteme

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 32,4% zu mehr Aufbereitungsfehlern als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 7,1% und dem F6 System mit 2,4% (Abb. 41).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 32,4% zu mehr Aufbereitungsfehlern als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 13,1% (Abb. 41).

### 5.1.3.1 Zip-Elbow-Effekt

Die Systeme wurden mit der prozentualen Anzahl an „Zip-Elbows“ einander gegenübergestellt, um aufzuzeigen, wie sich die gesamten „Zip-Elbows“ auf die einzelnen Systeme verteilen.

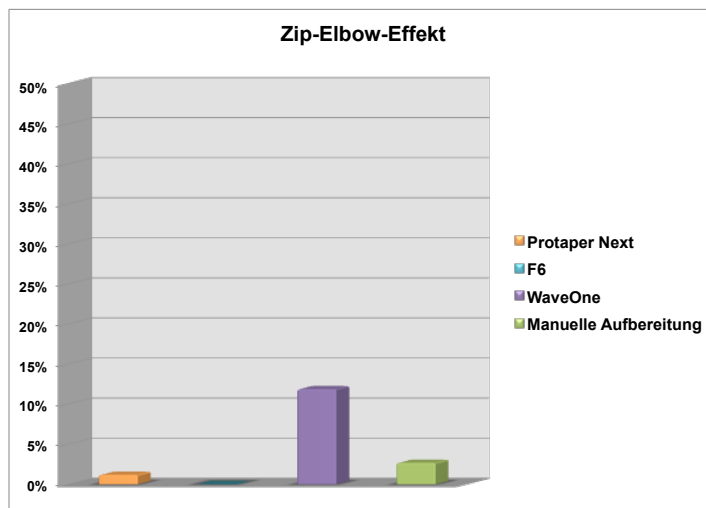


Abb. 42: Prozentuale Darstellung der „Zip-Elbows“ für die 4 Aufbereitungssysteme

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 2,7% zu mehr „Zip-Elbows“ als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 1,2% und dem F6 System mit 0,0% (Abb. 42).

Zudem führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 2,7% zu weniger „Zip-Elbows“ als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 11,9% (Abb. 42).

### 5.1.3.2 Ledge

Die Systeme wurden mit der prozentualen Anzahl an „Ledges“ einander gegenübergestellt, um aufzuzeigen, wie sich die gesamten „Ledges“ auf die einzelnen Systeme verteilen.

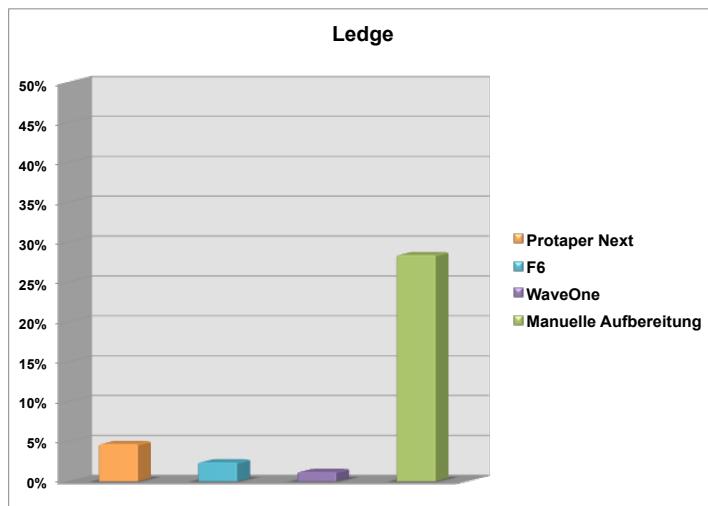


Abb. 43: Prozentuale Darstellung der „Ledges“ für die 4 Aufbereitungssysteme

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 28,4% zu mehr „Ledges“ als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 4,7% und dem F6 System mit 2,4% (Abb. 43).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 28,4% zu mehr „Ledges“ als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 1,2% (Abb. 43).

### 5.1.3.3 Apical Blockage

Die Systeme wurden mit der prozentualen Anzahl an „Apical Blockages“ einander gegenübergestellt, um aufzuzeigen, wie sich die gesamten „Apical Blockages“ auf die einzelnen Systeme verteilen.

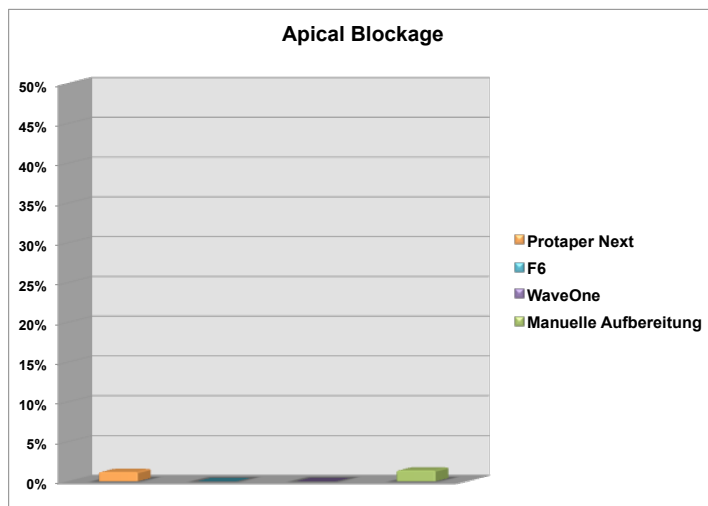


Abb. 44: Prozentuale Darstellung der „Apical Blockages“ für die 4 Aufbereitungssysteme

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 1,4% zu mehr „Apical Blockages“ als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 1,2% und dem F6 System mit 0,0% (Abb. 44).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 1,4% zu mehr „Apical Blockages“ als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 0,0% (Abb. 44).



## 5.2 Transportationen

### 5.2.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung

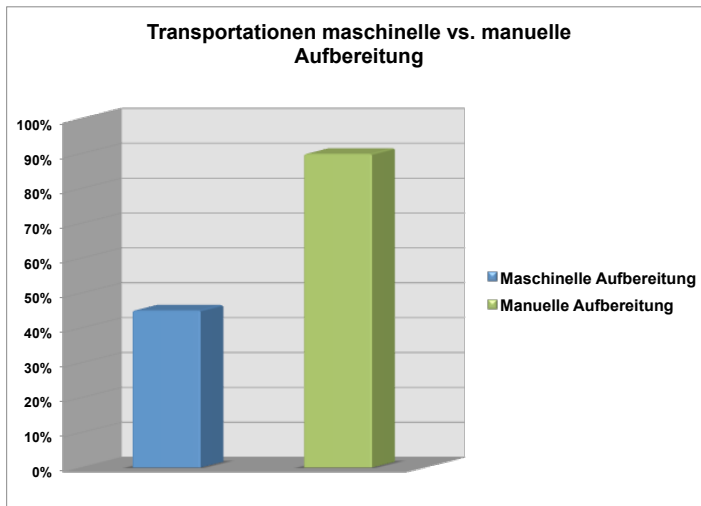


Abb. 45: Prozentuale Darstellung der transportierten Kanäle für die maschinelle und die manuelle Aufbereitung

Die maschinelle Aufbereitung mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne führte mit 45,1% zu signifikant ( $p=0,000$ ) weniger Transportationen als die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 90,0% (Abb. 45).

## 5.2.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung

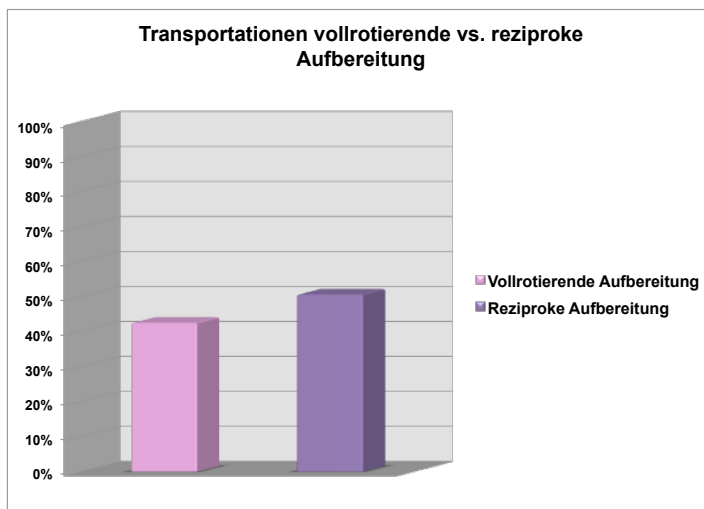


Abb. 46: Prozentuale Darstellung der transportierten Kanäle für die vollrotierende und die reziproke Aufbereitung

Die maschinelle Aufbereitung mit den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 führte mit 42,6% zu weniger Transportationen als die maschinelle Aufbereitung mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne mit 50,7% (Abb. 46). Die statistische Untersuchung zeigte jedoch, dass der Unterschied nicht signifikant war ( $p=0,499$ ).

### 5.2.3 Transportationen in der Einzeldarstellung

Die Systeme wurden mit der prozentualen Anzahl an Transportationen einander gegenübergestellt, um aufzuzeigen, wie sich die gesamten Transportationen auf die einzelnen Systeme verteilen.

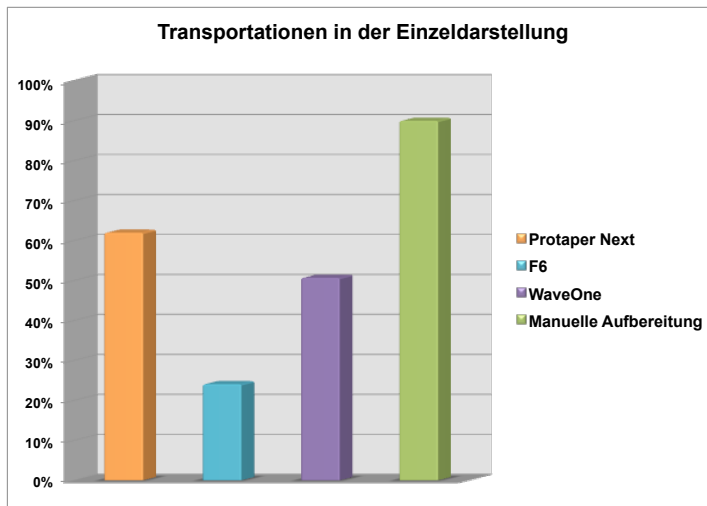


Abb. 47: Prozentuale Darstellung der transportierten Kanäle für die 4 Aufbereitungssysteme

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 90,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 62,0% und dem F6 System mit 24,1% (Abb. 47).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 90,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 50,7% (Abb. 47).

### 5.2.3.1 Messpunkte

Die Systeme wurden mit der prozentualen Anzahl an Transportationen einander gegenübergestellt, um aufzuzeigen, wie sich die gesamten Transportationen auf die einzelnen Systeme je Messpunkt verteilen.

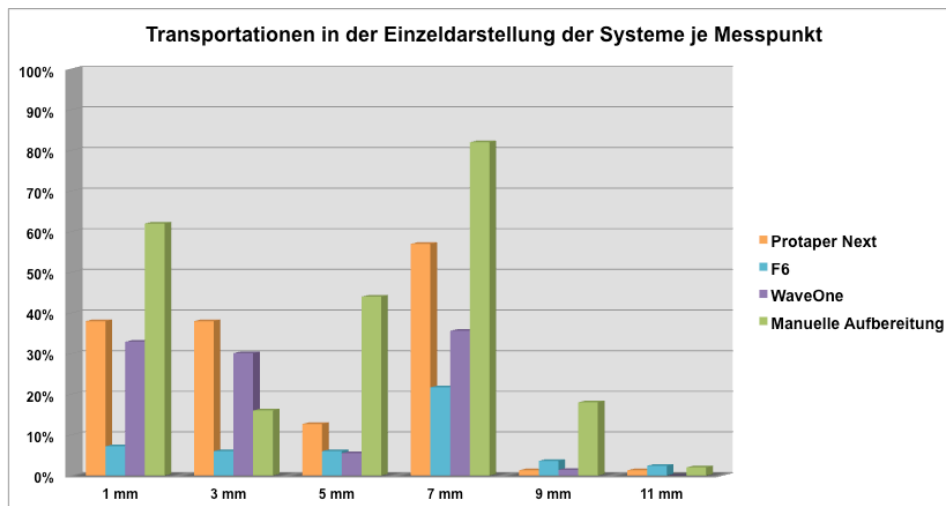


Abb. 48: Prozentuale Darstellung der transportierten Kanäle an den jeweiligen Messpunkten (1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm, 11 mm) für die 4 Aufbereitungssysteme

Aus der Abb. 48 lässt sich entnehmen, dass es an den jeweiligen Messpunkten zu einer unterschiedlichen Anzahl an transportierten Kanälen pro System kam. An den Messpunkten 5 mm, 9 mm und 11 mm zeigte sich eine verhältnismäßig geringere Anzahl an Transportationen gegenüber den Messpunkten 1 mm, 3 mm und 7 mm.

### **Messpunkt 1 mm**

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 62,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 38,0% und dem F6 System mit 7,2% (Abb. 48).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 62,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 32,9% (Abb. 48).

### **Messpunkt 3 mm**

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 16,0% zu weniger transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 38,0%, aber zu mehr als die maschinelle Aufbereitung mit dem F6 System mit 6,0% (Abb. 48).

Zudem führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 16,0% zu weniger transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 30,1% (Abb. 48).

### **Messpunkt 5 mm**

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 44,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 12,7% und dem F6 System mit 6,0% (Abb. 48).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 44,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 5,5% (Abb. 48).

### **Messpunkt 7 mm**

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 82,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 57,0% und dem F6 System mit 21,7% (Abb. 48).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 82,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 35,6% (Abb. 48).

### **Messpunkt 9 mm**

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 18,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 1,3% und dem F6 System mit 3,6% (Abb. 48).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 18,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 1,4% (Abb. 48).

### **Messpunkt 11 mm**

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 2,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 1,3% und zu weniger als die maschinelle Aufbereitung mit dem F6 System mit 2,4% (Abb. 48).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 2,0% zu mehr transportierten Kanälen als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System, bei dem es zu keinem transportierten Kanal kam (Abb. 48).

## 5.3 Aufbereitungszeiten

### 5.3.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung

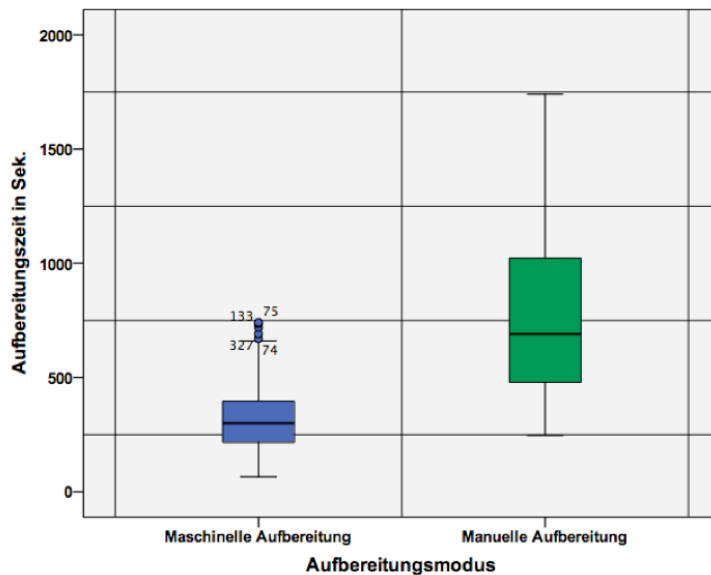


Abb. 49: Boxplot der Aufbereitungszeiten in Sekunden für die maschinelle und die manuelle Aufbereitung

Das arithmetische Mittel der maschinellen Aufbereitungszeiten mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne war mit 318 Sekunden (5,3 Minuten) signifikant ( $p=0,000$ ) kleiner als das arithmetische Mittel der manuellen Aufbereitungszeiten mit Hedström-Feilen mit 762 Sekunden (12,7 Minuten).

Die schnellste Aufbereitungszeit bei der maschinellen Aufbereitung lag bei 66 Sekunden (1,1 Minuten), die der manuellen Aufbereitung bei 247 Sekunden (4,12 Minuten). Die langsamste Aufbereitungszeit der maschinellen Aufbereitung betrug 741 Sekunden (12,35 Minuten), die der manuellen Aufbereitung 1740 Sekunden (29 Minuten). Damit ergab sich eine geringere Spannweite von 675 Sekunden (11,25 Minuten) für die maschinelle Aufbereitung im Vergleich zur Spannweite der manuellen Aufbereitung von



1493 Sekunden (24,88 Minuten). Die Aufbereitungszeiten der maschinellen Aufbereitung lagen damit dichter beieinander als die Aufbereitungszeiten der manuellen Aufbereitung (Abb. 49).

Bei den maschinellen Systemen sind fünf sogenannte milde Ausreißer zu erkennen, deren Abweichung vom 75% Quartil über dem 1,5-fachen des Interquartilabstands und somit über 660 Sekunden (11 Minuten) lag.

Der Normbereich der Aufbereitungszeiten für die maschinelle Aufbereitung lag somit zwischen 66 Sekunden (1,1 Minuten) und 660 Sekunden (11 Minuten).

Der Median lag bei der maschinellen Aufbereitung bei einem Wert von 300 Sekunden (5 Minuten) und damit leicht unterhalb des Mittelwerts. Es zeigt sich, dass der Abstand von der unteren „Antenne“ bis zum Median geringer ist als vom Median zur oberen „Antenne“ und dass sich die Box im unteren Bereich der Werte befindet. Mit anderen Worten, die Stichprobe ist leicht rechtsschief, das bedeutet, dass mehr als 50% der Aufbereitungszeiten unterhalb der mittleren Aufbereitungszeit lagen (Abb. 49).

Der Normbereich der Aufbereitungszeiten für die manuelle Aufbereitung lag zwischen 247 Sekunden (4,12 Minuten) und 1740 Sekunden (29 Minuten).

Der Median lag bei der manuellen Aufbereitung bei einem Wert von 691 Sekunden (11,52 Minuten) und wie bei der maschinellen Aufbereitung ebenfalls unterhalb des Mittelwerts. Es zeigt sich, dass der Abstand von der unteren „Antenne“ bis zum Median geringer ist als vom Median zur oberen „Antenne“ und dass sich die Box im Vergleich zur maschinellen Aufbereitung noch deutlicher im unteren Bereich der Werte befindet. Die Stichprobe ist somit deutlich rechtsschief, das bedeutet, dass mehr als 50% der Aufbereitungszeiten unterhalb der mittleren Aufbereitungszeit lagen (Abb. 49).

Bei der maschinellen Aufbereitung kann man erkennen, dass die Box aufgrund des geringen Interquartilsabstands von 182 Sekunden (3,03 Minuten) klein ist. Damit sind die Aufbereitungszeiten in einem kleinen Bereich zwischen 216 Sekunden (3,6 Minuten) und 398 Sekunden (6,63 Minuten) konzentriert, d.h.

die Krümmung dieser Verteilung ist eher spitzgipflig. Bei der manuellen Aufbereitung ist die Box im Vergleich zur gesamten Breite der Verteilung deutlich größer.

Die Aufbereitungszeiten sind in einem größeren Bereich zwischen 480 Sekunden (8 Minuten) und 1023 Sekunden (17,05 Minuten) verteilt und damit differieren die Aufbereitungszeiten stärker als bei der maschinellen Aufbereitung.

Weiterhin wird deutlich, dass erst 25% der manuellen Aufbereitungen beendet waren, nachdem bereits mehr als 75% der maschinellen Aufbereitungen fertiggestellt wurden (Abb. 49).

### 5.3.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung

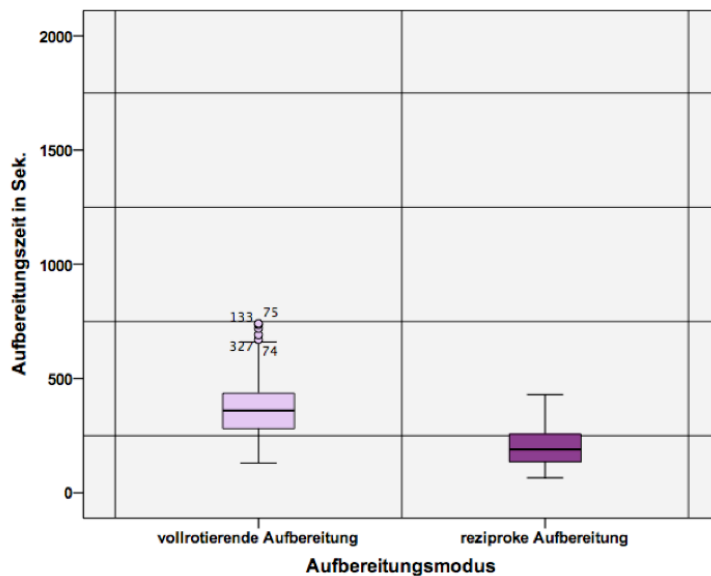


Abb. 50: Boxplot der Aufbereitungszeiten in Sekunden für die vollrotierende und die reziproke Aufbereitung

Das arithmetische Mittel der maschinellen Aufbereitungszeiten mit den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 war mit 375 Sekunden (6,25

Minuten) signifikant ( $p=0,000$ ) größer als das arithmetische Mittel der maschinellen Aufbereitungszeiten mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne mit 202 Sekunden (3,37 Minuten).

Die schnellste Aufbereitungszeit bei der vollrotierenden Aufbereitung lag bei 131 Sekunden (2,18 Minuten), die der reziproken Aufbereitung bei 66 Sekunden (1,1 Minuten). Die langsamste Aufbereitungszeit der vollrotierenden Aufbereitung betrug 741 Sekunden (12,35 Minuten), die der reziproken Aufbereitung 430 Sekunden (7,17 Minuten). Damit ergab sich im Vergleich zur Spannweite der reziproken Aufbereitung von 364 Sekunden (6,07 Minuten) eine größere Spannweite von 610 Sekunden (10,17 Sekunden) für die vollrotierende Aufbereitung.

Die Aufbereitungszeiten der reziproken Aufbereitung lagen damit dichter beieinander als die Aufbereitungszeiten der vollrotierenden Aufbereitung (Abb. 50).

Der Normbereich der Aufbereitungszeiten für die vollrotierende Aufbereitung lag zwischen 131 Sekunden (2,18 Minuten) und 660 Sekunden (11 Minuten).

Bei den vollrotierenden Systemen sind fünf sogenannte milde Ausreißer zu erkennen, deren Abweichung vom 75% Quartil über dem 1,5-fachen des Interquartilabstands und somit über einem Wert von 660 Sekunden (11 Minuten) lag.

Der Median lag bei der vollrotierenden Aufbereitung bei einem Wert von 361 Sekunden (6,02 Minuten) und damit knapp unterhalb des Mittelwerts (Abb. 50).

Der Normbereich der Aufbereitungszeiten für die reziproke Aufbereitung lag zwischen 66 Sekunden (1,1 Minuten) und 430 Sekunden (7,17 Minuten).

Der Median lag bei der reziproken Aufbereitung bei einem Wert von 190 Sekunden (3,17 Minuten) und damit unterhalb des Mittelwerts. Es zeigt sich, dass der Abstand von der unteren „Antenne“ bis zum Median geringer ist als vom Median zur oberen „Antenne“ und dass sich die Box im Vergleich zur

vollrotierenden Aufbereitung deutlich im unteren Bereich der Werte befindet. Die Stichprobe ist somit rechtsschief, das bedeutet, dass mehr als 50% der Aufbereitungszeiten unterhalb der mittleren Aufbereitungszeit lagen (Abb. 50). Bei der reziproken Aufbereitung kann man erkennen, dass die Box aufgrund des geringen Interquartilsabstands von 124 Sekunden (2,07 Minuten) klein ist. Damit sind die Aufbereitungszeiten in einem kleinen Bereich zwischen 136 Sekunden (2,27 Minuten) und 259 Sekunden (4,32 Minuten) konzentriert, d.h. die Krümmung dieser Verteilung ist eher spitzgipflig. Bei der vollrotierenden Aufbereitung ist die Box im Vergleich zur gesamten Breite der Verteilung etwas größer.

Die Aufbereitungszeiten sind in einem etwas größeren Bereich zwischen 281 Sekunden (4,68 Minuten) und 437 Sekunden (7,28 Minuten) verteilt und damit sind die Aufbereitungszeiten stärker gestreut als bei der reziproken Aufbereitung.

Weiterhin wird deutlich, dass schon bereits 75% der Aufbereitungen mit dem reziproken System beendet waren, bevor die ersten 25% der Studierenden die vollrotierenden Aufbereitungen beendet hatten (Abb. 50).

### **5.3.3 Aufbereitungszeiten in der Einzeldarstellung**

Die Systeme wurden mit den jeweiligen Aufbereitungszeiten einander gegenübergestellt, um aufzuzeigen, wie sich die gesamte Aufbereitungszeit auf die einzelnen Systeme verteilte.

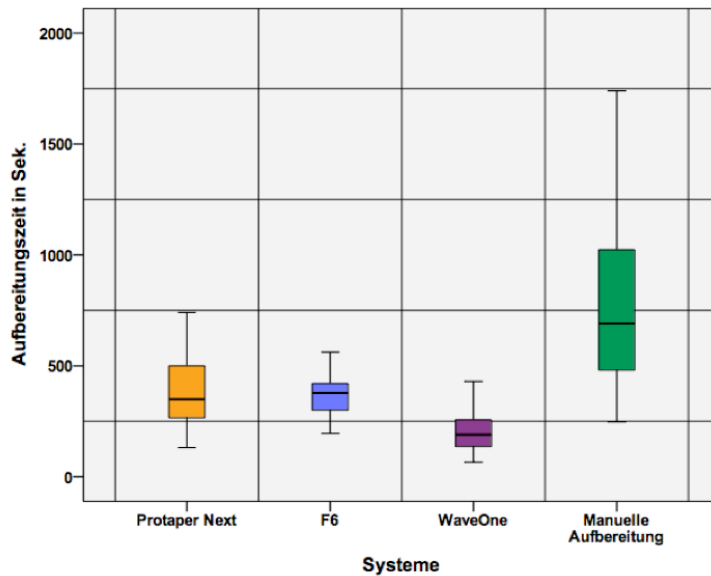


Abb. 51: Boxplot der Aufbereitungszeiten in Sekunden für die 4 Aufbereitungssysteme

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Das arithmetische Mittel der manuellen Aufbereitungszeiten mit Hedström-Feilen war mit 762 Sekunden (12,7 Minuten) größer als das arithmetische Mittel der maschinellen Aufbereitungszeiten mit dem Protaper Next System mit 385 Sekunden (6,42 Minuten), dem F6 System mit 366 Sekunden (6,1 Minuten) und dem WaveOne System mit 202 Sekunden (3,37 Minuten).

Die schnellste Aufbereitungszeit lag bei 66 Sekunden (1,1 Minuten) und wurde durch das reziproke Aufbereitungssystem WaveOne erreicht. Die langsamste Aufbereitungszeit lag bei 1740 Sekunden (29 Minuten) und wurde durch die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen erzielt. Es ergaben sich geringere Spannweiten für die maschinellen Systeme im Vergleich zur Spannweite der manuellen Aufbereitung. Die Aufbereitungszeiten der maschinellen Aufbereitung lagen damit dichter beieinander als die Aufbereitungszeiten der manuellen Aufbereitung (Abb. 51).

Weiterhin wird deutlich, dass schon knapp 75% der Aufbereitungen mit dem Protaper Next System, mehr als 75% der Aufbereitungen mit dem F6 System und alle Aufbereitungen mit dem WaveOne System beendet waren, als erst etwa 25% der Kanäle mit der manuellen Aufbereitung fertiggestellt wurden (Abb. 51).

## 5.4 Instrumentenfrakturen

### 5.4.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung

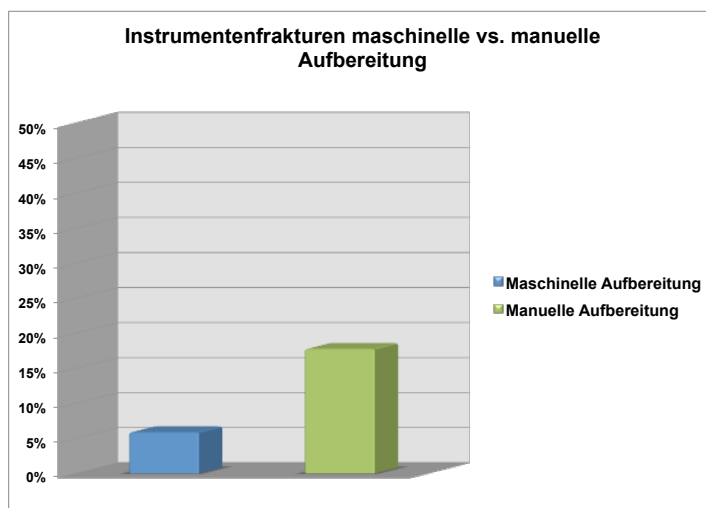


Abb. 52: Prozentuale Darstellung der Instrumentenfrakturen für die maschinelle und die manuelle Aufbereitung

Die maschinelle Aufbereitung mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne führte mit 5,9% zu signifikant ( $p=0,004$ ) weniger Instrumentenfrakturen als die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 17,8% (Abb. 52).

### 5.4.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung

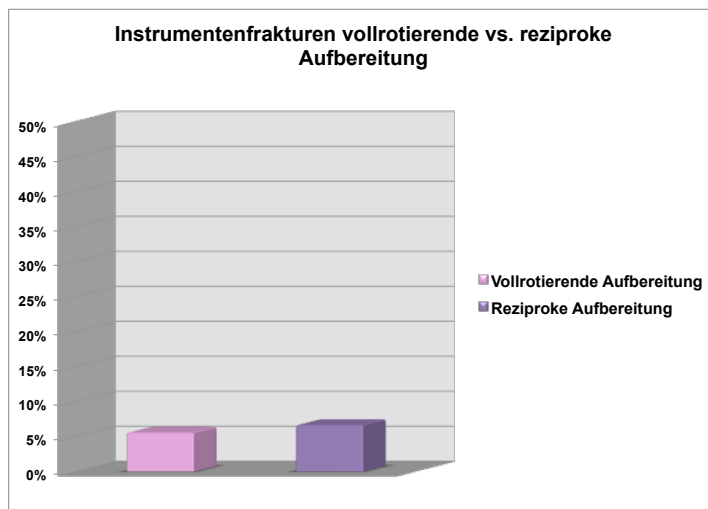


Abb. 53: Prozentuale Darstellung der Instrumentenfrakturen für die vollrotierende und die reziproke Aufbereitung

Die maschinelle Aufbereitung mit den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 führte mit 5,6% zu weniger Instrumentenfrakturen als die maschinelle Aufbereitung mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne mit 6,7% (Abb. 53). Die statistische Untersuchung zeigte jedoch, dass der Unterschied nicht signifikant war ( $p=0,716$ ).

### 5.4.3 Instrumentenfrakturen in der Einzeldarstellung

Die Systeme wurden mit der prozentualen Anzahl an Instrumentenfrakturen einander gegenübergestellt, um aufzuzeigen, wie sich die gesamten Instrumentenfrakturen auf die einzelnen Systeme verteilen.

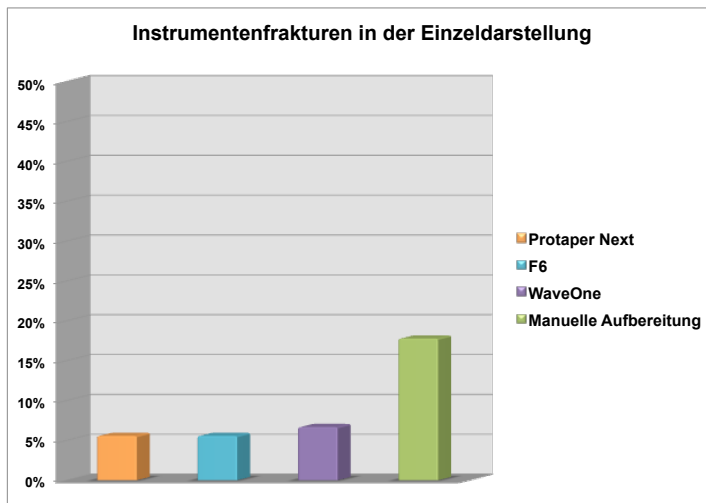


Abb. 54: Prozentuale Darstellung der Instrumentenfrakturen für die 4 Aufbereitungssysteme

#### Maschinelle Systeme einzeln gegen manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen:

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte mit 17,8% zu mehr Instrumentenfrakturen als die maschinelle Aufbereitung mit dem Protaper Next System mit 5,6% und dem F6 System mit 5,6% (Abb. 54).

Ebenso führte die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 17,8% zu mehr Instrumentenfrakturen als die maschinelle Aufbereitung mit dem WaveOne System mit 6,7% (Abb. 54).



## 5.5 Fragebogen

Der Fragebogen umfasste zwei Fragen. Dabei konnten die Studierenden als eine Möglichkeit die Systeme nach Belieben in Ihre persönliche Reihenfolge bringen oder sich für „Alle Systeme gleich“ entscheiden.

Die Ergebnisse wurden auf die folgende Fragestellung untersucht:

1. *Welches System erschien oder welche Systeme erschienen Ihnen einfacher zu erlernen?*

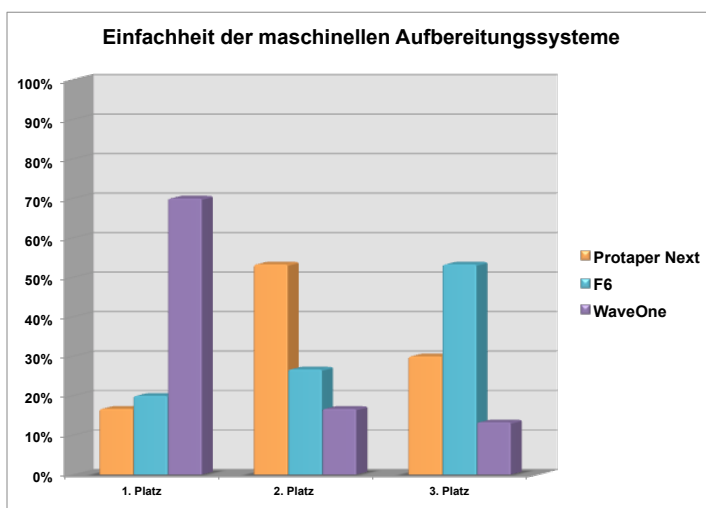


Abb. 55: Prozentuale Darstellung der Antworten, welches Aufbereitungssystem den Studierenden einfacher zu erlernen erschien

### Protaper Next:

16,7% der Studierenden wählten das Protaper Next System auf Platz 1, 53,3% auf Platz 2 und 30,0% der Studierenden wählten es auf Platz 3 (Abb. 55).

F6:

20,0% der Studierenden wählten das F6 System auf Platz 1, 26,7% auf Platz 2 und 53,3% der Studierenden wählten es auf Platz 3 (Abb. 55).

WaveOne:

70,0% der Studierenden wählten das WaveOne System auf Platz 1, 16,7% auf Platz 2 und 13,3% der Studierenden wählten es auf Platz 3 (Abb. 55).

Den Studierenden erschien das WaveOne System am einfachsten zu erlernen. Sie favorisierten das System im Mittel mit 1,43, gefolgt vom Protaper Next System mit 2,13 und dem F6 System mit 2,33.

Weiterhin wurden die Ergebnisse auf die folgende Fragestellung untersucht:

2. *Welches System erschien oder welche Systeme erschienen Ihnen in der Anwendung sicherer?*

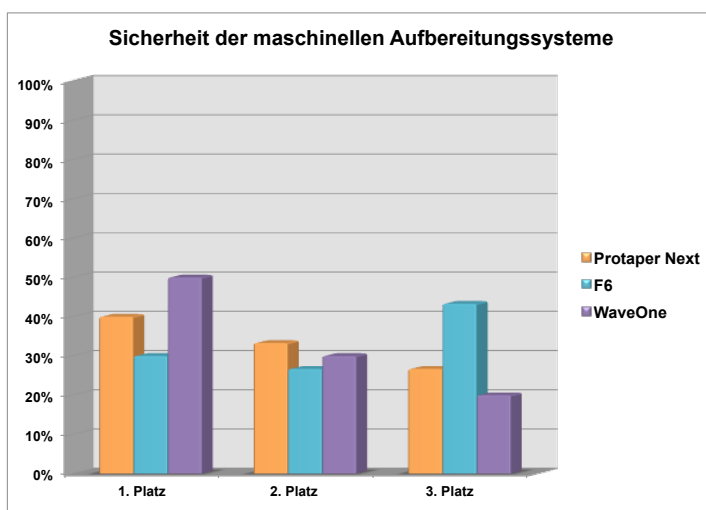


Abb. 56: Prozentuale Darstellung der Antworten, welches Aufbereitungssystem den Studierenden sicherer zu erlernen erschien

Protaper Next:

40,0% der Studierenden wählten das Protaper Next System auf Platz 1, 33,3% auf Platz 2 und 26,7% der Studierenden wählten es auf Platz 3 (Abb. 56).

F6:

30,0% der Studierenden wählten das F6 System auf Platz 1, 26,7% auf Platz 2 und 43,3% der Studierenden wählten es auf Platz 3 (Abb. 56).

WaveOne:

50,0% der Studierenden wählten das WaveOne System auf Platz 1, 30,0% auf Platz 2 und 20,0% der Studierenden wählten es auf Platz 3 (Abb. 56).

Den Studierenden erschien das WaveOne System in der Anwendung am sichersten. Sie favorisierten das System im Mittel mit 1,70, gefolgt vom Protaper Next System mit 1,87 und dem F6 System mit 2,13.

## 5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

### 5.6.1 Aufbereitungsfehler (Zip-Elbow-Effekt, Ledge, Apical Blockage)

#### 5.6.1.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung

Die nachfolgende Nullhypothese konnte durch die Ergebnisse dieser Studie verworfen werden:

*Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer gleichen Anzahl an Aufbereitungsfehlern im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.*

Es konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden und somit die Arbeits-/Alternativhypothese angenommen werden:

*Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer geringeren Anzahl an Aufbereitungsfehlern im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.*

#### 5.6.1.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung

Die nachfolgende Nullhypothese konnte durch die Ergebnisse dieser Studie nicht verworfen werden:

*Trotz der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich keine Unterschiede in der Anzahl der Aufbereitungsfehler zwischen den*

*vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.*

Es konnte nicht nachgewiesen werden, dass es einen signifikanten Unterschied gibt. Somit konnte die Arbeits-/Alternativhypothese nicht angenommen werden:

*Aufgrund der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich Unterschiede in der Anzahl der Aufbereitungsfehler zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.*

## **5.6.2 Transportationen**

### **5.6.2.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung**

Die nachfolgende Nullhypothese konnte durch die Ergebnisse dieser Studie verworfen werden:

*Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer gleichen Anzahl an Transportationen im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.*

Es konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden und somit die Arbeits-/Alternativhypothese angenommen werden:

*Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer geringeren Anzahl an Transportationen im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.*

### 5.6.2.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung

Die nachfolgende Nullhypothese konnte durch die Ergebnisse dieser Studie nicht verworfen werden:

*Trotz der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich keine Unterschiede in der Anzahl der Transportationen zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.*

Es konnte nicht nachgewiesen werden, dass es einen signifikanten Unterschied gibt. Somit konnte die Arbeits-/Alternativhypothese nicht angenommen werden:

*Aufgrund der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich Unterschiede in der Anzahl der Transportationen zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.*

### 5.6.3 Aufbereitungszeiten

#### 5.6.3.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung

Die nachfolgende Nullhypothese konnte durch die Ergebnisse dieser Studie verworfen werden:

*Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer gleichen Aufbereitungszeit im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.*

Es konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden und somit die Arbeits-/Alternativhypothese angenommen werden:

*Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer geringeren Aufbereitungszeit im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.*

### **5.6.3.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung**

Die nachfolgende Nullhypothese konnte durch die Ergebnisse dieser Studie ebenfalls verworfen werden:

*Trotz der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich keine Unterschiede in der Aufbereitungszeit zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.*

Es konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden und somit die Arbeits-/Alternativhypothese angenommen werden:

*Aufgrund der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich Unterschiede in der Aufbereitungszeit zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.*

## 5.6.4 Instrumentenfrakturen

### 5.6.4.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung

Die nachfolgende Nullhypothese konnte durch die Ergebnisse dieser Studie verworfen werden:

*Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer gleichen Anzahl an Instrumentenfrakturen im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.*

Es konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden und somit die Arbeits-/Alternativhypothese angenommen werden:

*Die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Aufbereitungssystemen führt bei Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen zu einer geringeren Anzahl an Instrumentenfrakturen im Vergleich zu der konventionellen manuellen Aufbereitung.*

### 5.6.4.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung

Die nachfolgende Nullhypothese konnte durch die Ergebnisse dieser Studie nicht verworfen werden:

*Trotz der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich keine Unterschiede in der Anzahl der Instrumentenfrakturen zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.*



Es konnte nicht nachgewiesen werden, dass es einen signifikanten Unterschied gibt. Somit konnte die Arbeits-/Alternativhypothese nicht angenommen werden:

*Aufgrund der unterschiedlichen Antriebsmodi ergeben sich Unterschiede in der Anzahl der Instrumentenfrakturen zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne.*

### **5.6.5 Fragebogen**

Den Studierenden erschien das WaveOne System am einfachsten zu erlernen. Sie favorisierten das System im Mittel mit 1,43, gefolgt vom Protaper Next System mit 2,13 und dem F6 System mit 2,33.

Des Weiteren erschien das WaveOne System den Studierenden auch am sichersten in der Anwendung zu sein. Sie favorisierten das System im Mittel mit 1,70, gefolgt vom Protaper Next System mit 1,87 und dem F6 System mit 2,13.

## **6 Diskussion**

### **6.1 Material und Methode**

#### **6.1.1 Auswahl der Studienteilnehmer/-innen**

An dieser in-vitro Untersuchung nahmen 30 Studierende eines ersten klinischen Semesters im Sinne eines Convenience Samples teil.

Im Rahmen des Phantomkurses sammelten sie erste endodontische Erfahrungen. Sie erlernten die theoretischen Grundlagen der Wurzelkanalbehandlung sowie die manuelle Aufbereitung an Epoxidharz-Blöcken und an extrahierten Zähnen.

Es wurde somit eine Stichprobenauswahl an studentischen Probanden/Probandinnen eines Semesters in die Studie einbezogen. Das Ziel war es, sowohl weniger als auch hoch qualifizierte Studierende in die Versuchsreihe einzuschließen.

In einer ähnlich angelegten Studie konnte bestätigt werden, dass die Qualität des Ergebnisses mit den manuellen Fertigkeiten des jeweiligen Studierenden einhergeht (Namazikhah, Mokhlis et al. 2000).

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse mit einer anderen Studie, die Versuchsreihen gleicher Thematik untersuchte (Dissertation Tran Khanh. URL: <http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2015/7209/>), war nur bedingt möglich, da die jeweiligen Kohorten stets heterogen zueinander waren und individuelle Nuancierungen die Ergebnisse ebenfalls beeinflussen konnten.

#### **6.1.2 Auswahl der Aufbereitungssysteme und Maschinerien**

Das reziprok arbeitende System WaveOne (Dentsply Maillefer) wurde 2011 eingeführt und soll laut Herstellerinformationen einfacher, sicherer und

effizienter arbeiten und die Aufbereitungszeit um bis zu 40% gegenüber kontinuierlich rotierenden Feilen verringern. Um die Aufbereitungsqualität und die Aufbereitungszeit zu überprüfen, wurde es mit dem bereits in mehreren Studien untersuchten vollrotierenden System Protaper Next (Dentsply Maillefer), (Elnaghy 2014; Koçak, Çiçek et al. 2015) und dem F6 System (Komet) verglichen.

Weiterhin wurden mögliche Unterschiede zwischen den drei genannten Systemen und der konventionellen manuellen Aufbereitung mit Hedström-Feilen untersucht.

Die manuelle Aufbereitung gilt nach wie vor als Basis zur Erlernung der Endodontie in der studentischen Ausbildung.

Die Innovationen der in dieser Studie verwendeten maschinellen Systeme sind u.a. die M-Wire Technologie, die neuartigen Querschnitte sowie die Reduktion der Feilenzahl und die damit verbundene Vereinfachung der Systeme.

Gerade für Studierende mit wenig endodontischen Erfahrungen ist es ein großer Vorteil, wenn Arbeitsschritte überschaubar sind und komplizierte Arbeitsabläufe auf ein Minimum reduziert werden können. So zeigte sich nach anfänglicher Instruktionszeit, dass die Studierenden die vereinfachten Arbeitsabläufe schnell erlernten.

Zur Versuchsdurchführung wurden den Studierenden firmenseits empfohlene, drehmomentbegrenzte Endomotoren zur Verfügung gestellt. Für die Aufbereitung mit dem vollrotierenden System F6 wurde der Endopilot der Firma Schlumbohm GmbH & Co. KG verwendet, welcher von der Firma Komet vertrieben wird.

Der X-Smart Plus Motor der Firma Dentsply Maillefer wurde für die Aufbereitung mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne und dem vollrotierenden System Protaper Next eingesetzt. In beiden Maschinerien sind Programme mit den empfohlenen Umdrehungsfrequenzen und Drehmomenten voreingestellt. Diese sollten für ein fraktursicheres Arbeiten unbedingt eingehalten werden.

Die Studierenden mussten keinerlei manuelle Programmierungen vornehmen, sondern lediglich Programmwechsel zwischen den voreingestellten

Programmen durchführen. So konnten Anwenderfehler durch Fehleinstellung an der Maschinerie minimiert werden.

### 6.1.3 Auswahl der Versuchsmodelle

Generell dienen als Versuchsmodelle sowohl Epoxidharz-Blöcke als auch extrahierte Zähne. Beide Modelle haben Vor- und Nachteile.

Für diese in-vitro Studie wurden gebogene Kanäle in Epoxidharz-Blöcken verwendet.

Diese weisen alle die gleiche Kanallänge, Kanalkrümmung und Form auf (Garip and Günday 2001). Es konnte somit ein direkter Vergleich über die Eigenschaften unterschiedlicher Instrumente gezogen werden (Peters 2004).

Jedoch muss auch darauf hingewiesen werden, dass Epoxidharz-Blöcke nicht das Abbild der Realität darstellen. Es gibt Unterschiede in der Oberflächenstruktur, der Härte und dem Querschnitt (Peters 2004).

So wurde eine Knoop Härte des Epoxidharz-Blocks von 36 errechnet (Calberson, Deroose et al. 2004), die Knoop Härte des Dentins wird zwischen 42 und 70 angegeben (Patterson 1963).

Auch andere Autoren beschrieben, dass die Härte des Dentins und des Epoxidharzes zueinander variiert (Lim and Webber 1985; Dummer, Alodeh et al. 1991).

Bei der Verwendung von extrahierten Zähnen können die Unterschiede in der Kanal Anatomie den Vergleich der Präparationen erschweren. Extrahierte Zähne weisen individuelle Wurzelkanalmorphologien auf, geben aber als Einziges die Möglichkeit, den Reinigungseffekt verschiedener Aufbereitungstechniken zu beurteilen (Hülsmann, Gressmann et al. 2003).

Es muss hervorgehoben werden, dass bei extrahierten Zähnen eine Übertragbarkeit auf die klinische Situation möglich wird, wohingegen dieses bei artifiziellen Versuchsmodellen nur bedingt durchführbar ist. Aufgrund dessen favorisieren einige Autoren die Verwendung von extrahierten Zähnen

(Hübscher, Barbakow et al. 2003; Hülsmann, Gressmann et al. 2003; Weiger, Brückner et al. 2003).

Es kann jedoch geschlussfolgert werden, dass trotz aller Vor- und Nachteile Epoxidharz-Blöcke als ein gültiges experimentelles Modell angesehen werden können (Lim and Webber 1985; Ahmad 1989).

#### **6.1.4 Randomisierung**

360 Epoxidharz-Blöcke wurden über einen internetbasierten Zufallsgenerator ([www.random.org](http://www.random.org)) in vier gleichgroße randomisierte Zahlenkolonnen aufgeteilt.

Die ersten drei Zahlen der jeweiligen Kolonnen wurden zusammengefasst, sodass sich ein Satz aus zwölf Zahlen ergab. Zudem wurde auch die Zuordnung der Studierenden zu zwei Gruppen à 15 Personen bestimmt.

Festgelegt wurde außerdem die individuelle Behandlungsreihenfolge der jeweiligen Aufbereitungssysteme für jeden Studierenden. Nachdem die Aufbereitung des ersten Blocks mit dem ersten Aufbereitungssystem beendet wurde, wurde der nächste Block mit dem zweiten System bearbeitet, dann wurde analog dazu auf das Dritte gewechselt und anschließend auf das Vierte und mit dem Ersten wieder gestartet.

Somit sammelten die Studierenden gleichermaßen Erfahrungen in allen Systemen. Folglich konnte vermieden werden, dass ein Übungseffekt von einem System auf das nächste System weitergegeben wurde.

Die Randomisierung diente der Verwendung des Zufallsmechanismus, um mögliche systematische Fehler auszuschließen.

### 6.1.5 Manuelle Wurzelkanalaufbereitung

Die manuelle Wurzelkanalaufbereitung der künstlichen Epoxidharz-Blöcke wurde konventionell mit Hedström-Edelstahlfeilen durchgeführt. Den Studierenden wurden Feilen der ISO-Größen 10 bis 50 zur Verfügung gestellt. Der Wurzelkanal wurde anschließend mit der Step-Back Technik aufbereitet. Vor der Versuchsdurchführung wurden die Studierenden instruiert, dass ein Preflaring insbesondere bei gekrümmten Kanälen einen besseren Zugang in die Tiefe des Wurzelkanals ermöglicht (Abou-Rass and Jastrab 1982; Leeb 1983; Schrader, Ackermann et al. 1999). Zudem wurde die Notwendigkeit regelmäßiger Rekapitulationen und Spülungen mit H<sub>2</sub>O erläutert.

### 6.1.6 Maschinelle Wurzelkanalaufbereitung

Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung erfolgte mit allen bereits vorgestellten Systemen (siehe Punkt 2.5) entsprechend der Systemvorgaben nach der Single-Length Technik.

Die verwendeten Feilen wiesen systemabhängig unterschiedliche Größen und Konizitäten auf (siehe Punkt 4.9.1.3).

Damit eine vergleichbare Aufbereitung möglich war, musste der apikale Feilendurchmesser berücksichtigt werden (Paqué, Musch et al. 2005).

Bei der Verwendung der WaveOne „primary“-Feile ergab sich in Folge des Tapers von 08 eine größere trichterförmige Erweiterung als bei den übrigen Systemen.

Die Systeme Protaper Next und F6 sind in gleicher Feilengröße jedoch mit geringerem Taper erhältlich (Protaper Next: 25.06; F6: 25.06). Um annähernd gleiche Aufbereitungsverhältnisse zu schaffen, wurde jeweils eine weitere Aufbereitungsgröße für die vollrotierenden Systeme (Protaper Next: 30.07; F6: 30.06) verwendet. Weiterhin musste berücksichtigt werden, dass der Größe der Aufbereitung des Epoxidharz-Blocks aufgrund der Krümmung des

Wurzelkanals Grenzen gesetzt sind. Mit steigender Instrumentengröße wird die Rigidität des Instruments erhöht, sodass daraus eine Begradigung des Kanals resultieren kann (Lam, Lewis et al. 1999).

Eine regelmäßige Rekapitulation und eine ausreichende Spülung mit H<sub>2</sub>O waren auch bei der Verwendung der maschinellen Aufbereitungsinstrumente während der gesamten Aufbereitungszeit obligat, um einen stetigen Abtransport der Späne zu gewährleisten. Auf die Verwendung von Natriumhypochlorid wurde verzichtet, um eine chemische Reaktion zwischen der Spüllösung und dem Epoxidharz zu vermeiden (Tepel, Schäfer et al. 1993).

### **6.1.7 Beurteilung der Aufbereitungsfehler und der Transportationen**

Nach der Versuchsdurchführung wurde die Aufbereitungsqualität der Epoxidharz-Blöcke überprüft. Dieses wurde ebenfalls bereits in anderen vergleichbaren Studien durchgeführt (Himel, Ahmed et al. 1995; Baumann and Roth 1999; Sonntag, Guntermann et al. 2003). Insbesondere bei der Aufbereitung von gekrümmten Wurzelkanälen wurden häufig charakteristische Aufbereitungsfehler sowie Transportationen beobachtet (Roig-Cayón, Brau-Aguadé et al. 1994; Namazikhah, Mokhlis et al. 2000).

Die bereits in Punkt 2.1.3 aufgeführte Rückstellungstendenz der Instrumente resultiert oftmals in einer Begradigung der Instrumente im Kanal (Weine, Kelly et al. 1975; Weber 2010). Insbesondere im Bereich der Außenkrümmung im unteren Wurzelkanaldrittel sowie im Bereich der Innenkrümmung im mittleren Wurzelkanaldrittel wird vermehrt Substanz abgetragen (Baumann and Roth 1999; Yun and Kim 2003; Calberson, Deroose et al. 2004; Weber 2010).

In diesem Zusammenhang muss berücksichtigt werden, dass die in Punkt 6.1.3 erwähnte geringere Knoop Härte des Epoxidharz-Blocks gegenüber der Knoop Härte des Dentins möglicherweise zu einer stärkeren Rückstellung der Instrumente im Kanal führen kann.

Zur Beurteilung der Aufbereitungsfehler wurden die nach der

Versuchsdurchführung gemachten Aufnahmen visuell beurteilt. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch der gelegentlich fließende Übergang zwischen den auftretenden Fehlern, der eine Zuordnung zu einem spezifischen Fehler erschwerte.

Durch Bildüberlagerung der vor und nach der Aufbereitung produzierten Aufnahmen konnte eine gezielte Vermessung zum Materialabtrag vorgenommen werden (Baumann and Roth 1999; Schäfer 2001; Sonntag, Guntermann et al. 2003).

Um eine dazu notwendige Deckungsgleichheit zu erreichen, wurden die Epoxidharz-Blöcke in eine eigens dafür vorgesehene Fixierungsvorrichtung positioniert, die eine fixe, zur Bildebene reproduzierbare Position ermöglichte (Dummer, Alodeh et al. 1989). Nur so konnten mögliche Abweichungen umgangen werden.

Ebenso wurde eine einmalige Fokussierung an der am Repröstander befestigten Kamera vorgenommen, sodass eine exakte Überlagerung durch gleichbleibende Strukturen möglich war. Um zu beurteilen, ob eine Transportation - eine Abweichung vom ursprünglichen Kanalverlauf - vorlag, wurden Messwerte standardisiert erhoben und verglichen. Ein an zwei Messpunkten orientiertes Verfahren zur Bestimmung von Transportationen wurde von Svec und Wang beschrieben (Svec and Wang 1998). Das von Luiten (Luiten, Morgan et al. 1995) dargestellte Messverfahren, das eine Bestimmung der Transportationen an mehreren Messpunkten vorsah, war für diese Versuchsauswertung geeigneter.

Es wurden an jeweils sechs Messpunkten Werte erhoben, sodass stets kleine Abstände eine genauere Aussage über die Lokalisation der Transportation möglich machten. Besonders der für die Studie entscheidende apikale Anteil des Kanals, der häufig von Aufbereitungsfehlern aufgrund der Aufrichtungstendenz der Instrumente betroffen ist, konnte hierbei exakter untersucht werden. Der obere Kanalbereich wurde bei der quantitativen Beurteilung des Materialabtrags nicht berücksichtigt, da dort ausschließlich eine geringe Drehmomentbelastung auf die Feile wirkt und keine kanalmorphologischen Veränderungen zu erwarten sind.



Die Auswertung der Aufnahmen wurde unter Zuhilfenahme von Adobe Photoshop CS 5 vorgenommen. Eine für diesen Versuch eigens erstellte Maske diente als Hilfsmittel, um den exakten Materialabtrag an der Wand des Wurzelkanals zu vermessen. Diese Untersuchungsmethode wurde auch in anderen Studien bereits angewendet (Baumann and Roth 1999; Sonntag, Guntermann et al. 2003).

Die Maske wurde für jedes überlagerte Bild identisch aufgelegt, sodass die Auswertung für jedes Bild gleichermaßen vorgenommen werden konnte.

### **6.1.8 Beurteilung der Aufbereitungszeiten**

Die Wurzelkanalaufbereitungszeit umfasste die Aufbereitung, die Instrumentenwechsel, die zwischenzeitlichen Spülungen sowie die Rekapitulationen. Die Zeitmessung erfolgte mit einer Stoppuhr in Sekunden.

Mögliche Differenzen in der Aufbereitungszeit sind nicht ausschließlich durch die individuellen Fertigkeiten und das individuelle Arbeitstempo eines jeden Probanden zu begründen.

Unterschiedlich lange durchgeführte Spülungen und Rekapitulationen können die Aufbereitungszeiten zwischen den Studierenden maßgeblich beeinflussen.

Des Weiteren können die Aufbereitungszeiten für alle drei maschinellen Systeme nicht ganz uneingeschränkt miteinander verglichen werden, da beim WaveOne System lediglich ein Instrumentenwechsel stattfinden musste. Die Zeit des zweiten Instrumentenwechsels, der für die vollrotierenden Systeme Protaper Next und F6 erforderlich war, entfiel für das reziproke System. Außerdem können ein falsches Stoppen und/oder Notieren der Aufbereitungszeiten nicht ausgeschlossen werden.

### 6.1.9 Beurteilung der Instrumentenfrakturen

Kam es während der Aufbereitung der Blöcke zu Frakturen der Instrumente im Kanal wurde die Feile, die Zeit sowie die Blocknummer auf dem dafür ausgeteilten Dokumentationsbogen notiert. Anschließend wurde die Aufbereitung der weiteren Blöcke fortgesetzt.

In einer Studie von Mandel und Kollegen (Mandel, Adib-Yazdi et al. 1999) konnte gezeigt werden, dass es gerade bei unerfahrenen Behandlern/Behandlerinnen zu einer erhöhten Frakturnrate der Ni-Ti-Feilen kommen kann.

Die Instrumente können dabei ohne zuvor sichtbare Deformationen frakturieren (Pruett, Clement et al. 1997; Mandel, Adib-Yazdi et al. 1999; Sattapan, Nervo et al. 2000). Das Auftreten einer zyklischen Ermüdung oder einer Torsionsfraktur kann möglicherweise durch falsches Handling der Studierenden begründet werden.

Verantwortlich für eine Torsionsfraktur sind ein Verklemmen der Instrumente, eine Manipulation der Geschwindigkeiten oder ein zu starkes manuelles Forcieren der Präparation (Hülsmann 2001). Bei zu häufiger Biegebeanspruchung, die durch Rotation des Instruments in Kombination mit lateraler Auslenkung auftritt, könnte es zur zyklischen Ermüdung kommen (Weber 2010).

## 6.2 Ergebnisse

### 6.2.1 Aufbereitungsfehler (Zip-Elbow-Effekt, Ledge, Apical Blockage)

#### 6.2.1.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung

In der Gesamtbetrachtung führte die maschinelle Aufbereitung mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne mit 7,5% zu signifikant ( $p=0,000$ ) weniger Aufbereitungsfehlern als die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 32,4%.

Der signifikante Unterschied in der Anzahl der Aufbereitungsfehler zwischen der maschinellen und der manuellen Aufbereitung kann durch die differierenden Materialien begründet werden. Nickel-Titan-Feilen sind trotz des größeren Tapers wesentlich flexibler als Edelstahlfeilen. Dieses wurde bereits 1988 bei einer Untersuchung von Nickel-Titan-Instrumenten belegt. Walia zeigte (Walia, Brantley et al. 1988), dass Nickel-Titan-Instrumente eine 2- bis 3-fach höhere Flexibilität aufweisen als Edelstahlfeilen. Diese Eigenschaft führt dazu, dass Nickel-Titan-Instrumente dem Kanalverlauf des Epoxidharz-Blocks besser folgen können als Edelstahlfeilen.

In der detaillierten Betrachtung wird deutlich, dass die Ausbildung einer Stufe (Ledge) mit 28,4% der am häufigsten auftretende Fehler bei der manuellen Aufbereitung war. Bei der maschinellen Aufbereitung mit dem Protaper Next System traten in 4,7% der Fälle Ledges auf. Mit dem F6 System wurden 2,4% und mit dem WaveOne System 1,2% Ledges ermittelt.

Auch Sonntag und Kollegen (Sonntag, Guntermann et al. 2003) zeigten in einer Untersuchung ähnlichen Studiendesigns, dass es durch die Verwendung von Nickel-Titan-Instrumenten zu einer Minimierung von Ledges kam. Die maschinelle Aufbereitung führte mit 1,9% zu weniger Ledges als die manuelle

Aufbereitung mit 6,7%. Das höhere Aufkommen dieses Fehlers bei der manuellen Aufbereitung kann eventuell mit mangelnder Übung und damit mangelnder Ausprägung der Taktilität der Studierenden begründet werden. Das zu forcierte Arbeiten nach apikal, das zu schnelle Arbeiten mit zu großen Aufbereitungsfeilen sowie das zeitweilig zu lange Schaben an einem Bereich der Kanalwand können ebenfalls zur Ausbildung einer Stufe führen.

Ein weiterer Punkt wäre, dass die für die manuelle Aufbereitung wichtigen Rekapitulationen und Spülungen nicht ausreichend durchgeführt wurden. Mangelnde Konzentration oder Motivation als Ursachen können somit die vollständige Präparation des Wurzelkanals verhindern und zu einer Verblockung nach apikal (Apical Blockage) führen. Dieser Fehler trat in der Versuchsreihe jedoch mit einer geringeren Fehlerhäufigkeit auf. Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen verursachte mit 1,4% die meisten Apical Blockages, gefolgt vom Protaper Next System mit 1,2%. Das F6 System und das WaveOne System führten zu keinen Apical Blockages.

#### **6.2.1.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung**

In der Gesamtbetrachtung führte die maschinelle Aufbereitung mit den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 mit 4,7% zu weniger Aufbereitungsfehlern als die maschinelle Aufbereitung mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne mit 13,1%. Die statistische Untersuchung zeigte jedoch, dass der Unterschied nicht signifikant war ( $p=0,065$ ).

Das erhöhte Fehleraufkommen mit dem reziproken System gegenüber den vollrotierenden Systemen kann also rein zufällig entstanden sein. Im Vergleich der vollrotierenden Systeme mit dem reziproken System können somit keine konkreten Aussagen gemacht werden, sondern lediglich gemutmaßt werden, wie der prozentuale Unterschied in der Fehlerhäufigkeit zustande kam.

Möglicherweise kann die Unerfahrenheit der Studierenden und das damit verbundene falsche Handling zu einer erhöhten Fehlerquote geführt haben.

Es kann vermutet werden, dass es aufgrund des größeren Tapers des WaveOne Systems (08) zu einer höheren Drehmomentbelastung beim Einbringen des Instruments in den Kanal kam und folglich eine längere Verweildauer im Kanal über mehrere Zyklen zu einer Begradigung des Kanalverlaufs führte. Dieses könnte das erhöhte Auftreten des Zip-Elbow-Effekts mit dem reziproken System begründen. Das WaveOne System führte in 11,9%, das Protaper Next System in nur 1,2% und das F6 System in keinem Fall zu einem Zip-Elbow-Effekt.

Um final beurteilen zu können, ob ein genauere Zusammenhang zwischen der praktischen Erfahrung und dem Wissensstand zum einen und dem Auftreten von Aufbereitungsfehlern zum anderen besteht, müsste eine weitere Studie angeschlossen werden, die erfahrene Behandler/-innen und weniger erfahrene Behandler/-innen einschließen sollte.

## **6.2.2 Transportationen**

### **6.2.2.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung**

In der Gesamtbetrachtung führte die maschinelle Aufbereitung mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne mit 45,1% zu signifikant ( $p=0,000$ ) weniger Transportationen als die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 90,0%.

Die signifikant höhere Anzahl an transportierten Kanälen durch die Aufbereitung mit Hedström-Feilen lässt sich u.a. durch die unterschiedliche

Aufbereitungstechnik in Kombination mit einer deutlich differierenden Feilenanzahl gegenüber der maschinellen Aufbereitung erklären.

Für die manuelle Aufbereitung mit der Step-Back Technik standen den Studierenden neun Feilengrößen (ISO 10 bis ISO 50) zur Verfügung. Die maschinelle Aufbereitung mit der Single-Length Technik erforderte für die vollrotierenden Systeme eine 3-Feilen-Sequenz und für das reziproke System lediglich eine 2-Feilen-Sequenz.

Durch die deutlich häufigeren Instrumentenwechsel bei der manuellen Aufbereitung kam es zu mehrmaligen Rekapitulationen und einer insgesamt längeren Verweildauer der Instrumente im Wurzelkanal. Außerdem kann es durch häufig durchgeführte Präparationen an der Außenkurvatur des apikalen Kanalabschnitts in diesem Gebiet zu einem erhöhten Materialabtrag kommen. Dieses könnten mögliche Einflussfaktoren für die erhöhte Transportationsrate bei der manuellen Aufbereitung sein.

Weiterhin kann vermutet werden, dass die stärkere Rigidität der Edelmetallinstrumente gegenüber den Nickel-Titan-Instrumenten zu einer höheren Anzahl an Transportationen führte. Lam und Kollegen belegten bereits 1999 (Lam, Lewis et al. 1999), dass das Maß der Kanaltransportationen durch die Rigidität der Instrumente beeinflusst wird. Je größer die Durchmesser der Instrumente sind, desto schwieriger wird es für die Aufbereitungsfeilen, dem gekrümmten Kanalverlauf nachzugehen. Diese durch die physikalischen Eigenschaften der Feile entstehende Problematik wird durch falsches Handling der Studierenden begünstigt.

Der Blick auf die nach Messpunkten aufgefächerte Anzahl an Transportationen zeigt, dass sich die meisten Transportationen an den Messpunkten 1 mm sowie 7 mm vom Apex entfernt (MP 1 und MP 7) befanden. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Studierenden bei der Bearbeitung des Wurzelkanals einen Druckpunkt im apikalen Bereich und am Ende der Krümmung erzeugten, sodass die Hauptbelastungspunkte der Instrumente in diesen Bereichen lagen.

Zwischen den genannten Messpunkten und über dem MP 7 (mehr als 7 mm vom Apex entfernt) wurde eine geringere Anzahl an Transportationen ermittelt. An der Außenkrümmung des MP 1 (1 mm vom Apex entfernt) ergab sich die größte Anzahl an transportierten Kanälen bei der manuellen Aufbereitung mit 62,0%. Das F6 System zeigte die wenigsten Transportationen mit 7,2%, gefolgt vom WaveOne System mit 32,9% und dem Protaper Next System mit 38,0%.

An der Innenkrümmung des MP 7 (7 mm vom Apex entfernt) wurden die meisten Kanäle mit der manuellen Aufbereitung mit 82,0% transportiert. Das F6 System führte mit 21,7% zu den wenigsten Transportationen, gefolgt vom WaveOne System mit 35,6% und dem Protaper Next System mit 57,0%. Auch hierfür kann die Rigidität der Edelmetallinstrumente verantwortlich sein.

Die flexibleren Nickel-Titan-Instrumente führten zu einer geringeren Erweiterung im Bereich der Innenkrümmung. Dieses wurde bereits durch andere Autoren bestätigt (Garip and Günday 2001; Yoo and Cho 2012). Die in dieser Versuchsreihe gemessene Anzahl an Transportationen, die durch die maschinellen Systeme entstand, lässt sich damit begründen, dass ein Teil der Flexibilität durch eine zu lange Verweildauer der Feilen im Kanal verloren ging, sodass es trotz flexiblerer Feilen zu einer Verlagerung des ursprünglichen Kanalverlaufs kam.

An der Innenkrümmung des MP 9 (9 mm vom Apex entfernt) führte die manuelle Aufbereitung zu 18% Transportationen. In diesem geraden Abschnitt des Wurzelkanals treten bei richtiger Anwendung nur noch geringe, die Feilen verformende Kräfte auf. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass falsches Handling und die daraus resultierende Begradigung der Wurzelwand an der Innenkrümmung um den MP 7 (7 mm vom Apex entfernt) Einfluss auf die Wandbearbeitung bis zum MP 9 (9 mm vom Apex entfernt) hat. Durch einen höheren Abtrag an der Innenkrümmung des Wurzelkanals resultierte ebenfalls eine Begradigung um den MP 9 (9 mm vom Apex entfernt).

Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird abschließend deutlich, dass an der

Außenkrümmung des MP 1 (1 mm vom Apex entfernt) mit 62,0% und an der Innenkrümmung des MP 5 (5 mm vom Apex entfernt) mit 44,0% relativ viele Transportationen bei der Aufbereitung mit Hedström-Feilen gemessen wurden. Genau an diesen Messpunkten liegen ebenfalls die für den Zip-Elbow-Effekt typischen Abweichungen. Es muss kritisch angemerkt werden, dass der Übergang zwischen den einzelnen Fehlern bis hin zur Transportation gelegentlich fließend war.

### 6.2.2.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung

In der Gesamtbetrachtung führte die maschinelle Aufbereitung mit den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 mit 42,6% zu weniger Transportationen als die maschinelle Aufbereitung mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne mit 50,7%. Die statistische Untersuchung zeigte jedoch, dass der Unterschied nicht signifikant war ( $p=0,499$ ).

Das erhöhte Fehlerrisiko mit dem reziproken System gegenüber den vollrotierenden Systemen kann also rein zufällig entstanden sein. Im Vergleich der vollrotierenden Systeme mit dem reziproken System können somit keine konkreten Aussagen gemacht werden, sondern lediglich vermutet werden, wie der prozentuale Unterschied in der Transportationshäufigkeit zustande kam.

Betrachtet man die nach Messpunkten und Systemen aufgefächerte Darstellung der Transportationen, stellt sich heraus, dass das Protaper Next System bei den Messpunkten MP 1, MP 3 und MP 7 (1 mm, 3 mm sowie 7 mm vom Apex entfernt) die meisten und das F6 System die wenigsten Transportationen verzeichnete.

An der Außenkrümmung des MP 1 (1 mm vom Apex entfernt) sind für das F6 System die wenigsten Transportationen mit 7,2% zu nennen, gefolgt vom



WaveOne System mit 32,9% und dem Protaper Next System mit 38,0%. Im Bereich des Scheitelpunkts der Kanalkrümmung (MP 3, 3 mm vom Apex entfernt) führte erneut das F6 System an der Außenkrümmung zu den wenigsten Transportationen mit 6,0%, gefolgt vom WaveOne System mit 30,1% und dem Protaper Next System mit 38,0%.

An der vierten Messstelle (MP 7, 7 mm vom Apex entfernt) stellten sich an der Innenkrümmung mit dem F6 System mit 21,7% die wenigsten Transportationen dar, gefolgt vom WaveOne System mit 35,6% und dem Protaper Next System mit 57,0%.

Das reziprok arbeitende System WaveOne befand sich somit bei allen drei Messpunkten zwischen den vollrotierenden Systemen. Es wird deutlich, dass keine generell höhere Anzahl an Transportationen pro Messpunkt bei dem reziproken System zu verzeichnen war, sondern lediglich die Gesamtbetrachtung zu einem höheren Prozentsatz führte.

Es kann im Allgemeinen gemutmaßt werden, dass die Unerfahrenheit der Studierenden zu einer behutsameren und langsameren Arbeitsweise bei allen maschinellen Systemen führte. Des Weiteren könnte die unterschiedliche Arbeitsweise der maschinellen Systeme gegenüber der manuellen Aufbereitung ursächlich für das Auftreten von Transportationen sein. Das Picking Motion Prinzip wurde möglicherweise nicht konsequent durchgeführt, sodass eine zu lange Verweildauer im Kanal zu einer Begradigung des Kanalverlaufs beitrug.

Es zeigte sich, dass die Wahl des Antriebsmodus keinen entscheidenden Einfluss auf die Anzahl der Transportationen hatte. Insbesondere die Entwicklung der neuartigen segmentierten Drehbewegung des WaveOne Systems soll das Auftreten von Transportationen minimieren. Dieses konnte nicht bestätigt werden. Es wird somit deutlich, dass die von Herstellerseite propagierten Vorteile in der vorliegenden in-vitro Studie von Studierenden mit wenig endodontischen Erfahrungen nur bedingt genutzt werden konnten.

Zusammenfassend kann formuliert werden, dass die Aufbereitung mit maschinellen Instrumenten der manuellen Aufbereitung mit Hedström-Feilen

überlegen war, obwohl die Studierenden wenig Erfahrungen mit der maschinellen Aufbereitung besaßen. Insbesondere das F6 System führte zu einer geringen Anzahl an Transportationen und gewährleistete eine gute Zentrierung der Feile im Kanal.

### **6.2.3 Aufbereitungszeiten**

#### **6.2.3.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung**

Das arithmetische Mittel der maschinellen Aufbereitungszeiten mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne war mit 318 Sekunden (5,3 Minuten) signifikant ( $p=0,000$ ) kleiner als das arithmetische Mittel der manuellen Aufbereitungszeiten mit Hedström-Feilen mit 762 Sekunden (12,7 Minuten). Somit konnte ein Unterschied nachgewiesen werden.

Die schnellste Aufbereitungszeit bei der maschinellen Aufbereitung lag bei 66 Sekunden (1,1 Minuten), die der manuellen Aufbereitung bei 247 Sekunden (4,12 Minuten). Die langsamste Aufbereitungszeit der maschinellen Aufbereitung betrug 741 Sekunden (12,35 Minuten), die der manuellen Aufbereitung 1740 Sekunden (29 Minuten). Es ergab sich somit eine geringere Spannweite von 675 Sekunden (11,25 Minuten) für die maschinelle Aufbereitung im Vergleich zur Spannweite der manuellen Aufbereitung von 1493 Sekunden (24,88 Minuten).

Die Aufbereitungszeiten der maschinellen Aufbereitung lagen damit dichter beieinander als die Aufbereitungszeiten der manuellen Aufbereitung.

Die Feststellung, dass die maschinelle Aufbereitung maßgeblich schneller war als die manuelle Aufbereitung, ist kongruent mit Ergebnissen diverser Studien

(Himmel, Ahmed et al. 1995; Gluskin, Brown et al. 2001; Schäfer 2001; Guelzow, Stamm et al. 2005; Alves, Souza et al. 2013).

Die Zeitersparnis mit den maschinellen Aufbereitungssystemen lässt sich u.a. mit der geringeren Feilenanzahl, die zur vollständigen Aufbereitung benötigt wurde, begründen. Bei der maschinellen Aufbereitung wurden für die vollrotierenden Systeme Protaper Next und F6 jeweils nur drei Feilen, für das reziproke System WaveOne lediglich zwei Feilen benötigt. Für die manuelle Aufbereitung wurden insgesamt neun Feilen zur Verfügung gestellt (ISO 10 bis ISO 50).

Der häufigere Instrumentenwechsel bei der manuellen Aufbereitung trug letztlich zur Summierung der Aufbereitungszeiten bei.

Des Weiteren weisen die F6 Feilen einen Doppel-S-Querschnitt mit zwei aktiven Schneidekanten auf. Ein großer Spanraum und ein kleiner Schneidekantenwinkel sorgen für eine hohe Effizienz der Feilen, sodass auch dadurch die Aufbereitungszeit reduziert werden konnte. Bei dem Protaper Next System liegen ebenfalls ausschließlich stets zwei Kanten an der Kanalwand an, wodurch der Torsionswiderstand sowie die Drehmomentbelastung abnehmen sollen. Durch die segmentierte Drehbewegung des WaveOne Systems kommt es ebenfalls zu einer Effizienzsteigerung und einer damit verbundenen Zeitersparnis.

Zudem führt die manuelle Aufbereitung zu einer höheren physiologischen Belastung als die maschinelle Aufbereitung, sodass eine Ermüdung des Studierenden und eine damit verbundene Summation der Aufbereitungszeiten nicht ausgeschlossen werden kann.

### **6.2.3.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung**

Das arithmetische Mittel der maschinellen Aufbereitungszeiten mit den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 war mit 375 Sekunden (6,25

Minuten) signifikant ( $p=0,000$ ) größer als das arithmetische Mittel der maschinellen Aufbereitungszeiten mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne mit 202 Sekunden (3,37 Minuten). Somit konnte ein Unterschied nachgewiesen werden.

Die schnellste Aufbereitungszeit bei der vollrotierenden Aufbereitung lag bei 131 Sekunden (2,18 Minuten), die der reziproken Aufbereitung bei 66 Sekunden (1,1 Minuten). Die langsamste Aufbereitungszeit der vollrotierenden Aufbereitung betrug 741 Sekunden (12,35 Minuten), die der reziproken Aufbereitung 430 Sekunden (7,17 Minuten). Es ergab sich im Vergleich zur Spannweite der reziproken Aufbereitung von 364 Sekunden (6,07 Minuten) eine größere Spannweite von 610 Sekunden (10,17 Sekunden) für die vollrotierende Aufbereitung.

Die Aufbereitungszeiten der reziproken Aufbereitung lagen damit dichter beieinander als die Aufbereitungszeiten der vollrotierenden Aufbereitung.

Die Minimierung der Aufbereitungszeit durch die Anwendung des WaveOne Systems lässt sich durch die reziproke Aufbereitungstechnik und der damit verbundenen Effizienz der Feile begründen.

Das reziproke Rotationsprinzip führt dazu, dass das Instrument durch einen großen Winkel in Schneidrichtung mit einer hohen Effizienz arbeiten kann und ein kleinerer Winkel in die Gegenrichtung das Instrument schrittweise in den Kanal eindringen lässt (Dentsply Maillefer Produktbroschüre (WaveOne)).

Der Umstand, dass das reziproke System eine geringere Aufbereitungszeit benötigte als die vollrotierenden Systeme, steht mit weiteren Studien im Einklang (You, Bae et al. 2010; Bürklein, Hinschitzka et al. 2012).

Eine eher untergeordnete Rolle für die Unterschiede in der Aufbereitungszeit hat die Feilenanzahl. Die Aufbereitung mit dem WaveOne System erfolgte pro Epoxidharz-Block mit zwei Feilen, wohingegen die vollrotierenden Systeme drei Feilen für die vollständige Aufbereitung benötigten.

Ein zweiter Instrumentenwechsel wie bei den vollrotierenden Systemen blieb bei dem WaveOne System aus. Das erneute Aus- und wieder Einspannen der vollrotierenden Instrumente führte möglicherweise zu einer leichten Summation der Aufbereitungszeiten.

Abschließend muss kritisch angemerkt werden, dass die Ergebnisse durch unterschiedlich lange durchgeführte Spülungen und Rekapitulationen sowie ein falsches Stoppen und/oder Notieren der Aufbereitungszeiten beeinflusst werden konnten. Dieses sollte bei der Betrachtung der Aufbereitungszeiten berücksichtigt werden.

## **6.2.4 Instrumentenfrakturen**

### **6.2.4.1 Maschinelle vs. manuelle Aufbereitung**

In der Gesamtbetrachtung führte die maschinelle Aufbereitung mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne mit 5,9% zu weniger Instrumentenfrakturen als die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen mit 17,8%. Dieser Unterschied konnte als signifikant ( $p=0,004$ ) nachgewiesen werden.

Eine mögliche Ursache für die deutlich höhere Frakturrate bei der manuellen Aufbereitung kann auf eine inadäquate und ineffektive Arbeitsweise der Studierenden zurückgeführt werden. Die Studierenden arbeiteten mit den Hedström-Feilen vermutlich nicht nur vertikal, sondern auch mit einer Rotationsbewegung.

Zudem kann die Unerfahrenheit der Studierenden möglicherweise die hohe Frakturrate beeinflussen. So konnte ein zu forciertes Arbeiten nach apikal sowie

das Auftreten zu starker Zugkräfte bei kleinen Feilen zu Frakturen der Instrumente führen.

Außerdem ist die Formveränderung einer Hedström-Feile, die sich vor einer Fraktur einstellt, häufig makroskopisch sichtbar. Dieses lässt vermuten, dass die Studierenden keine regelmäßigen visuellen Kontrollen der Instrumente vornahmen, um frühzeitig sich abzeichnende Deformationen der Feile zu erkennen.

Die Frakturnrate der maschinellen Instrumente ist vergleichsweise gering gegenüber der Frakturnrate der manuellen Aufbereitung. Der drehfrequenz- und drehmomentüberwachte Endomotor griff ein, sobald die Drehmomentbelastung - u.a. durch apikale Krafteinwirkung oder volle Spanräume - zu hoch wurde, sodass eine Torsionsfraktur verhindert werden konnte. Die Kontrollfunktion ist insbesondere für unerfahrene Behandler sehr vorteilhaft, da diese durch ein akustisches Signal auf eine zu hohe Drehmomentbelastung hingewiesen werden.

Der dennoch auftretende geringere Anteil an Frakturen bei der maschinellen Aufbereitung kann durch eine Missachtung der akustischen Signale oder durch eine zu lange Verweildauer der Instrumente im Kanal begründet werden, welche zu einer zyklischen Ermüdung des Materials führten.

#### **6.2.4.2 Vollrotierende vs. reziproke Aufbereitung**

In der Gesamtbetrachtung führte die maschinelle Aufbereitung mit den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 mit 5,6% zu weniger Instrumentenfrakturen als die maschinelle Aufbereitung mit dem reziprok arbeitenden System WaveOne mit 6,7%. Die statistische Untersuchung zeigte jedoch, dass der Unterschied nicht signifikant war ( $p=0,716$ ).

Das erhöhte Frakturaufkommen mit dem reziproken System gegenüber den vollrotierenden Systemen kann also zufällig entstanden sein.

Eine zyklische Ermüdung kann insbesondere in gekrümmten Kanälen auftreten. Es kommt bei der Aufbereitung des Wurzelkanals zu einem ständigen Wechsel zwischen einer Dehnung an der Außenseite und einer Stauchung an der Innenseite des gekrümmten Instruments. Diese nehmen mit zunehmender Anwendungszeit und Rotationsgeschwindigkeit zu (Städtler 2012). Durch freie Rotation wird das Instrument im Bereich der Krümmung somit einem dauerhaften Zug-Druck-Belastungszyklus ausgesetzt, sodass es zum Bruch am Ort der maximalen Biegung kommen kann. Des Weiteren kann ein zu forciertes Arbeiten nach apikal und eine damit verbundene zu starke Krafteinwirkung zu einem Verklemmen des Instruments im apikalen Anteil führen (Pruett, Clement et al. 1997). Das Instrument rotiert dabei im koronalen Anteil weiter, sodass es durch die Zug-Druck-Belastung zu einer Fraktur kommen kann.

Trotz der Unerfahrenheit der Studierenden ist die Frakturnrate bei den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 sowie dem reziprok arbeitenden System WaveOne im Vergleich zur manuellen Aufbereitung geringer. Die vorhandene geringe Frakturnrate kann durch häufige Durchführung der Feilenbewegung in Kombination mit der Nichteinhaltung des Picking Motion Prinzips entstanden sein.

Die in der Literatur häufig beschriebene Tatsache, dass die verwendeten Instrumente durch die reziproke Bewegung entlastet werden und das Risiko für Deformationen (Varela-Patiño, Ibañez-Párraga et al. 2010) und zyklische Ermüdungen reduziert wird (Yared 2008; De-Deus, Moreira et al. 2010; Kim, Kwak et al. 2012; Kiefner, Ban et al. 2014), konnte in dieser Studie nicht gezeigt werden.

Ebenso konnte kein Unterschied bezüglich der Frakturhäufigkeit der Ni-Ti-Legierung des F6 Systems und der neu auf dem Markt etablierten M-Wire Legierung des Protaper Next und des WaveOne Systems festgestellt werden.

Laut Herstellerinformationen soll die Legierung widerstandfähiger gegenüber zyklischen Ermüdungen sein.

Dieses wurde bereits in diversen Studien bestätigt (Johnson, Lloyd et al. 2008; Al-Hadlaq, Aljarbou et al. 2010; Pereira, Peixoto et al. 2012).

### **6.2.5 Fragebogen**

Den Studierenden erschien das WaveOne System am einfachsten zu erlernen. Sie favorisierten das System im Mittel mit 1,43, gefolgt vom Protaper Next System mit 2,13 und dem F6 System mit 2,33.

Die Studierenden benötigten für die Aufbereitung mit dem reziproken System WaveOne lediglich zwei Feilen, sodass nur ein Instrumentenwechsel stattfinden musste. Die ganze Aufbereitung konnte mit einer zuvor eingestellten Umdrehungsfrequenz und einem zuvor eingestellten Drehmoment durchgeführt werden. Es kann geschlussfolgert werden, dass die Übersichtlichkeit des Systems und die damit verbundenen überschaubaren Arbeitsabläufe die Studierenden überzeugten.

Des Weiteren erschien das WaveOne System den Studierenden auch am sichersten in der Anwendung zu sein. Sie favorisierten das System im Mittel mit 1,70, gefolgt vom Protaper Next System mit 1,87 und dem F6 System mit 2,13.

In dieser Untersuchung zeigte sich allerdings, dass gerade das reziproke System WaveOne mit 6,7% zu mehr Frakturen führte als die vollrotierenden Systeme Protaper Next und F6 mit jeweils 5,6%. Interessanterweise deckte sich somit das Sicherheitsempfinden der Studierenden nicht mit den Ergebnissen dieser Studie.



### 6.3 Schlussfolgerung

Angesichts der vorliegenden Untersuchungsergebnisse können folgende Rückschlüsse gezogen werden:

- Die manuelle Aufbereitung führte gegenüber der maschinellen Aufbereitung zu schlechteren Ergebnissen. Es konnten signifikante Unterschiede zwischen der maschinellen Aufbereitung mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne und der manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen im Hinblick auf vorhandene Aufbereitungsfehler, Transportationen, Aufbereitungszeiten und Instrumentenfrakturen festgestellt werden.
- Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne hinsichtlich vorhandener Aufbereitungsfehler, Transportationen und Instrumentenfrakturen.
- Das reziprok arbeitende System WaveOne führte zu einer signifikanten Zeitersparnis gegenüber den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6.
- Es zeigte sich, dass trotz Unerfahrenheit der Studierenden bessere Ergebnisse bei der maschinellen Aufbereitung mit Ni-Ti-Feilen erzielt wurden. Dieses deckt sich mit den klinischen Erfahrungen in den Studierendenkursen. Die guten Resultate am Patienten haben dazu geführt, dass die maschinelle Aufbereitung nach und nach in den Kursalltag integriert wurde. Die in dieser Untersuchung hervorgehobenen Vorteile konnten somit bereits auch schon in den klinischen Kursen bestätigt werden.

## 7 Zusammenfassung

Erstes Ziel dieser in-vitro Studie war es, den Unterschied der neuartigen maschinellen Systeme Protaper Next, F6 und WaveOne gegenüber der konventionellen manuellen Aufbereitungstechnik bei Studierenden mit wenig klinischen Erfahrungen nachzuweisen. Ein weiteres Ziel war es zu zeigen, dass unterschiedliche Antriebsmodi zu qualitativen Unterschieden führen. Dazu wurden zwei vollrotierende Systeme und ein reziprok arbeitendes System miteinander verglichen.

Es wurden insgesamt 360 Epoxidharz-Blöcke von 30 Studierenden eines ersten klinischen Semesters mit den vier unterschiedlichen Systemen aufbereitet.

Die gekrümmten Wurzelkanäle wurden anschließend auf vorhandene Aufbereitungsfehler, Transportationen und Instrumentenfrakturen untersucht. Des Weiteren erfolgte eine Analyse der Aufbereitungszeiten. Am Ende der Versuchsdurchführung wurde zudem ein Fragebogen ausgeteilt. Die Studierenden sollten die Einfachheit und Sicherheit der neuartigen maschinellen Aufbereitungssysteme beurteilen.

Digitale Aufnahmen vor und nach der Versuchsdurchführung wurden mit Hilfe von Adobe Photoshop CS 5 überlagert und hinsichtlich der oben genannten Variablen untersucht und ausgewertet.

Die manuelle Aufbereitung mit Hedström-Feilen führte gegenüber der maschinellen Aufbereitung mit den Systemen Protaper Next, F6 und WaveOne zu schlechteren Ergebnissen und zu einem signifikanten Unterschied in Bezug auf vorhandene Aufbereitungsfehler, Transportationen, Aufbereitungszeiten und Instrumentenfrakturen ( $p < 0,05$ ).

Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 und dem reziprok arbeitenden System WaveOne in Bezug auf vorhandene Aufbereitungsfehler, Transportationen und Instrumentenfrakturen ( $p > 0,05$ ).

Das reziprok arbeitende System WaveOne führte zu einer signifikanten Zeitersparnis gegenüber den vollrotierenden Systemen Protaper Next und F6 ( $p < 0,05$ ).

Das Aufbereitungssystem WaveOne überzeugte die Studierenden am meisten. Das Ergebnis des Fragebogens zeigte, dass das System sowohl im Erlernen als auch hinsichtlich des Sicherheitsempfindens das beste Resultat erzielte, was im Gegensatz zum Ergebnis bezüglich der Frakturhäufigkeit steht.

Das Ziel einer Vergleichbarkeit von Systemen konnte in dieser in-vitro Studie durch die Verwendung von Epoxidharz-Blöcken in hohem Maße realisiert werden.

Die Ergebnisse sollten jedoch mit Bedacht auf die klinische Situation übertragen werden, da die Epoxidharz-Blöcke nicht das Abbild der Realität darstellen.

Der gelegentlich fließende Übergang zwischen den auftretenden Fehlern, der eine Zuordnung zu einem spezifischen Fehler erschwerte, stellte eine weitere Problematik dieser Untersuchung dar.

Insgesamt betrachtet führte die Wurzelkanalaufbereitung mit den maschinellen Systemen für Studierende zu einer Erleichterung und Verbesserung der Aufbereitungsqualität gegenüber der manuellen Aufbereitung.

In allen untersuchten Punkten hat die Aufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten bessere Ergebnisse gegenüber Edelstahlinstrumenten erzielt.

Für die Ergebnisse dieser Studie schien es jedoch nicht maßgeblich zu sein, ob Feilen der M-Wire Technologie des Protaper Next und WaveOne Systems eingesetzt wurden oder Nickel-Titan-Instrumente des F6 Systems.

Die Einfachheit der maschinellen Systeme wirkte sich ebenfalls positiv auf die Versuchsreihe aus. Es zeigte sich, dass die Studierenden die Arbeitsabläufe nach der Instruktionszeit schnell beherrschten.

Die unterschiedlichen Antriebsmodi schienen eine eher untergeordnete Rolle zu spielen. Bei der Anzahl der Aufbereitungsfehler, Transportationen und Frakturen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem reziproken Antriebsmodus und dem vollrotierenden Antriebsmodus nachgewiesen werden.

Insgesamt kann gemutmaßt werden, dass die entstandenen Fehler,

Transportationen und Frakturen überwiegend aufgrund von Anwenderfehlern entstanden sind. Eine gewisse Erfahrungheit der Studierenden hätte möglicherweise zu noch besseren Ergebnissen geführt.

Die positiven Eigenschaften der maschinellen Systeme und die damit verbundenen Vorteile konnten in dieser in-vitro Studie aufgrund dessen nicht immer vollständig nachgewiesen werden.

Abschließend kann geschlussfolgert werden, dass es damit sinnvoll erscheint, die Aufbereitung mit maschinellen Instrumenten in den studentischen Kursalltag zu integrieren, da die Aufbereitungsqualität trotz gewisser Anwenderfehler und Unerfahrenheit der Studierenden im Vergleich zur manuellen Aufbereitungstechnik maßgeblich verbessert wird.

## 8 Literaturverzeichnis

Abou-Rass, M. and R. J. Jastrab (1982).

“The use of rotary instruments as auxiliary aids to root canal preparation of molars.”

J Endod 8(2): 78-82.

Ahliquist, M., O. Henningsson, et al. (2001).

“The effectiveness of manual and rotary techniques in the cleaning of root canals: a scanning electron microscopy study.”

Int Endod J 34(7): 533-537.

Ahmad, M. (1989).

“The validity of using simulated root canals as models for ultrasonic instrumentation.”

J Endod 15(11): 544-547.

Alapati, S. B., W. A. Brantley, et al. (2009).

“Metallurgical characterization of a new nickel-titanium wire for rotary endodontic instruments.”

J Endod 35(11): 1589-1593.

Al-Hadlaq, S. M., F. A. Aljarbou, et al. (2010).

“Evaluation of cyclic flexural fatigue of M-wire nickel-titanium rotary instruments.”

J Endod 36(2): 305-307.

Alves, R. A., J. B. Souza, et al. (2013).

“Detection of Procedural Errors with Stainless Steel and NiTi Instruments by Undergraduate Students Using Conventional Radiograph and Cone Beam Computed Tomography.”

Iran Endod J 8(4): 160-165.

Andreasen, G. F. and R. E. Morrow (1978).

“Laboratory and clinical analyses of nitinol wire.”

Am J Orthod 73(2): 142-151.

Baumann, M. A. and R. Beer (2007).

Endodontologie - Farbatlant der Zahnmedizin.

Stuttgart - New York, Georg Thieme Verlag.

Baumann, M. A. and A. Roth (1999).

"Effect of experience on quality of canal preparation with rotary nickel-titanium files."

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 88(6): 714-718.

Bertrand, M. F., L. Lupi-Pégurier, et al. (2001).

“Curved molar root canal preparations using Hero 642 rotary nickel-titanium instruments.”

Int Endod J 34(8): 631-636.

Berutti, E., D. S. Paolino, et al. (2012).

”Root canal anatomy preservation of WaveOne reciprocating files with or without glide path.”

J Endod 38(1): 101-104.

Bishop, K. and P. M. Dummer (1997).

“A comparison of stainless steel Flexofiles and nickel-titanium NiTiFlex files during the shaping of simulated canals.“

Int Endod J 30(1): 25-34.

Buehler, W. J., J. V. Gilfrich, et al. (1963).

"Effect of Low-Temperature Phase Changes on the Mechanical Properties of Alloys near Composition TiNi."

J Appl Phys 34(5): 1475-1477.

Bürklein, S., S. Benten, et al. (2013).

"Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth."

Int Endod J 46(6): 590-597.

Bürklein, S., K. Hinschitza, et al. (2012).

"Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper."

Int Endod J 45(5): 449-461.

Calberson, F. L., C. A. Deroose, et al. (2004).

"Shaping ability of ProTaper nickel-titanium files in simulated resin root canals."

Int Endod J 37(9): 613-623.

Chen, J. L. and H. H. Messer (2002).

“A comparison of stainless steel hand and rotary nickel-titanium instrumentation using a silicone impression technique.“

Aust Dent J 47(1): 12-20.

Cunningham, C. J. and E. S. Senia (1992).

“A three-dimensional study of canal curvatures in the mesial roots of mandibular molars.“

J Endod 18(6): 294-300.

De-Deus, G., E. J. Moreira, et al. (2010).

“Extended cyclic fatigue life of F2 ProTaper instruments used in reciprocating movement.“

Int Endod J 43(12): 1063-1068.

Dentsply Maillefer Produktbroschüre (Protaper Next).

„Protaper Next: Exzentrisch rotierendes Feilensystem.“

Dentsply Maillefer Produktbroschüre (WaveOne).

„Wave one: Einfachheit ist die wahre Innovation.“

Dentsply Tulsa Dental Specialities.

"ENTER THE NEW ERA OF M-WIRE NiTi.“

URL: [www.mwireniti.com/stronger.html](http://www.mwireniti.com/stronger.html) (Stand: 03.12.2014).

Dummer, P. M., M. H. Alodeh, et al. (1989).

"Shaping of simulated root canals in resin blocks using files activated by a sonic handpiece."

Int Endod J 22(5): 211-215.

Dummer, P. M., M. H. Alodeh, et al. (1991).

“A method for the construction of simulated root canals in clear resin blocks.“

Int Endod J 24(2): 63-66.



Elnaghy, A. M. (2014).

“Cyclic fatigue resistance of ProTaper Next nickel-titanium rotary files.“

Int Endod J 47(11): 1034-1039.

ESE (2006).

“Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology.“

Int Endod J 39(12): 921-930.

Esposito, P. T. and C. J. Cunningham (1995).

"A comparison of canal preparation with nickel-titanium and stainless steel instruments."

J Endod 21(4): 173-176.

Fava, L. R. (1983).

"The double-flared technique: an alternative for biomechanical preparation."

J Endod 9(2): 76-80.

Foschi, F., C. Nucci, et al. (2004).

“SEM evaluation of canal wall dentine following use of Mtwo and ProTaper NiTi rotary instruments.“

Int Endod J 37(12): 832-839.

Gambarini, G., N. M. Grande, et al. (2008).

“Fatigue resistance of engine-driven rotary nickel-titanium instruments produced by new manufacturing methods.“

J Endod 34(8): 1003-1005.

Gambarini, G. and J. Laszkiewicz (2002).

“A scanning electron microscopic study of debris and smear layer remaining following use of GT rotary instruments.“

Int Endod J 35(5): 422-427.

Gambarini, G., L. Testarelli, et al. (2013).

“The influence of three different instrumentation techniques on the incidence of postoperative pain after endodontic treatment.“

Ann Stomatol 4(1):152-155.

Gao, Y., V. Shotton, et al. (2010).

“Effects of raw material and rotational speed on the cyclic fatigue of ProFile Vortex rotary instruments.“

J Endod 36(7): 1205-1209.

Garip, Y. and M. Günday (2001).

"The use of computed tomography when comparing nickel-titanium and stainless steel files during preparation of simulated curved canals."

Int Endod J 34(6): 452-457.

Glickman, G. N. and T. C. Dumsha (1991).

„Probleme bei der Säuberung und Aufbereitung der Kanäle.“

In: Gutmann, J. L., T. C. Dumsha, et al.

Problemlösungen in der Endodontie.

München - Wien, Carl Hanser Verlag.

Gluskin, A. H., D. C. Brown, et al. (2001).

"A reconstructed computerized tomographic comparison of Ni-Ti rotary GT™ files versus traditional instruments in canals shaped by novice operators."  
Int Endod J 34(6): 476-484.

Goerig, A. C., R. J. Michelich, et al. (1982).

"Instrumentation of root canals in molar using the step-down technique."  
J Endod 8(12): 550-554.

Greene, K. J. and K. V. Krell (1990).

"Clinical factors associated with ledged canals in maxillary and mandibular molars."  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 70(4): 490-497.

Guelzow, A., O. Stamm, et al. (2005).

"Comparative study of six rotary nickel-titanium systems and hand instrumentation for root canal preparation."  
Int Endod J 38(10): 743-752.

Guldener, P. H. (1993).

„Indikation und Kontraindikation der endodontischen Behandlung.“  
In: Guldener, P. H. and K. Langeland  
Endodontologie. Diagnostik und Therapie.  
Stuttgart - New York, Georg Thieme Verlag.

Haïkel, Y., R. Serfaty, et al. (1999).

“Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments.“  
J Endod 25(6): 434-440.

Harris, W. E. (1976).

“A simplified method of treatment for endodontic perforations.“

J Endod 2(5):126-134.

Harrington, G. W. and E. Natkin (1992).

“Midtreatment flare-ups.“

Dent Clin North Am 36(2): 409-423.

Hellwig, E., J. Klimek, et al. (2009).

Einführung in die Zahnerhaltung. Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie.

Köln, Deutscher Zahnärzte Verlag.

Himmel, V. T., K. M. Ahmed, et al. (1995).

“An evaluation of nitinol and stainless steel files used by dental students during a laboratory proficiency exam.“

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 79(2): 232-237.

Hübscher, W., F. Barbakow, et al. (2003).

"Root-canal preparation with FlexMaster: canal shapes analysed by micro-computed tomography."

Int Endod J 36(11): 740-747.

Hülsmann, M. (2001).

„Die Aufbereitung des Wurzelkanals.“

In: Heidemann, D.

Endodontie.

München - Jena, Urban & Fischer Verlag.

Hülsmann, M. (2008).

Checklisten der Zahnmedizin - Endodontie.

Stuttgart - New York, Georg Thieme Verlag.

Hülsmann, M., C. Rümmelin, et al. (1997).

“Root canal cleanliness after preparation with different endodontic handpieces and hand instruments: a comparative SEM investigation.“

J Endod 23(5): 301-306.

Hülsmann, M., G. Gressmann, et al. (2003).

“A comparative study of root canal preparation using FlexMaster and HERO 642 rotary Ni-Ti instruments.“

Int Endod J 36(5): 358-366.

Hülsmann, M., O. A. Peters, et al. (2005).

“Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means.“

Endodontic Topics 10(1): 30-76.

Ingle, J. I. (1961).

"A standardized endodontic technique utilizing newly designed instruments and filling materials."

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 14(1): 83-91.

Jadent: wave one von Dentsply.

„Die Schritt-für-Schritt Anwendung der wave one Feilen.“

URL: <http://www.dentsply-waveone.de/de/applikation.html> (Stand: 20.08.2014).

Jeon, I. S., L. S. Spångberg, et al. (2003).

“Smear layer production by 3 rotary reamers with different cutting blade designs in straight root canals: A scanning electron microscopic study.“

Oral Surg Oral Med Oral Path Oral Radiol Endod 96(5): 601-607.

Johnson, E., A. Lloyd, et al. (2008).

“Comparison between a novel nickel-titanium alloy and 508 nitinol on the cyclic fatigue life of ProFile 25/.04 rotary instruments.“

J Endod 34(11): 1406-1409.

Kakehashi, S., H. R. Stanley, et al. (1965).

"The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats."

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 20(3): 340-349.

Kapalas, A. and T. Lambrianidis (2000).

"Factors associated with root canal ledging during instrumentation."

Endod Dent Traumatol 16(5): 229-231.

Kazemi, R. B., E. Stenman, et al. (1996).

“Machining efficiency and wear resistance of nickel-titanium endodontic files.“

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 81(5): 596-602.

Kiefner, P., M. Ban, et al. (2014).

"Is the reciprocating movement per se able to improve the cyclic fatigue resistance of instruments?"

Int Endod J 47(5): 430-436.

Kim, H. C., S. W. Kwak, et al. (2012).

“Cyclic fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne.“

J Endod 38(4): 541-544.

Klayman, S. M. and J. D. Brilliant (1975).

“A comparison of the efficacy of serial preparation versus Giromatic preparation.“

J Endod 1(10): 334-337.

Klimm, W. (2011).

Endodontologie. Lehrbuch für Studium und Beruf.

Köln, Deutscher Zahnärzte Verlag.

Koçak, M. M., E. Çiçek, et al. (2015).

“Apical extrusion of debris using ProTaper Universal and ProTaper Next rotary systems.“

Int Endod J 48(3): 283-286.

Komet Dental Produktbroschüre (F360).

„F360. Liebe auf den ersten Pick.“

Komet Dental Produktbroschüre (F6 SkyTaper).

„Ein neues Level der Flexibilität. F6 SkyTaper.“

Lam, T. V., D. J. Lewis, et al. (1999).

“Changes in root canal morphology in simulated curved canals over-instrumented with a variety of stainless steel and nickel titanium files.“

Aust Dent J 44(1): 12-19.

Leeb, J. (1983).

"Canal orifice enlargement as related to biomechanical preparation."

J Endod 9(11): 463-470.

Lim, K. C. and J. Webber (1985).

"The validity of simulated root canals for the investigation of the prepared root canal shape."

Int Endod J 18(4): 240-246.

Luiten, D. J., L. A. Morgan, et al. (1995).

"A comparison of four instrumentation techniques on apical canal transportation."

J Endod 21(1): 26-32.

Mandel, E., M. Adib-Yazdi, et al. (1999).

"Rotary Ni-Ti profile systems for preparing curved canals in resin blocks: influence of operator on instrument breakage."

Int Endod J 32(6): 436-443.

Morgan, L. F. and S. Montgomery (1984).

"An evaluation of the crown-down pressureless technique."

J Endod 10(10): 491-498.

Namazikhah, M. S., H. R. Mokhlis, et al. (2000).

"Comparison between a hand stainless-steel K file and a rotary NiTi 0.04 taper."

J Calif Dent Assoc 28(6): 421-426.



Paqué, F., U. Musch, et al. (2005).

“Comparison of root canal preparation using RaCe and ProTaper rotary Ni-Ti instruments.“

Int Endod J 38(1): 8-16.

Patiño, P. V., B. M. Biedma, et al. (2005).

"The influence of a manual glide path on the separation rate of NiTi rotary instruments."

J Endod 31(2): 114-116.

Patterson, S. S. (1963).

“In vivo and in vitro studies of the effect of the disodium salt of ethylenediamine tetra-acetate on human dentine and its endodontic implications.“

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 16(1): 83-103.

Pereira, E. S., I. F. Peixoto, et al. (2012).

"Physical and mechanical properties of a thermomechanically treated NiTi wire used in the manufacture of rotary endodontic instruments."

Int Endod J 45(5): 469-474.

Peters, O. A. (2004).

"Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review."

J Endod 30(8): 559-567.

Platzer, U. and J. Sedelmayer (1993).

„Die manuelle Wurzelkanalaufbereitung: Neue Instrumente - neue Techniken?“

In: Schriftenreihe APW: Endodontie - Neue Erkenntnisse aus Praxis und Wissenschaft.

München - Wien, Carl Hanser Verlag.

Pruett, J. P., D. J. Clement, et al. (1997).

“Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments.“

J Endod 23(2): 77-85.

Roane, J. B., C. L. Sabala, et al. (1985).

"The "balanced force" concept for instrumentation of curved canals."

J Endod 11(5): 203-211.

Roig-Cayón, M., E. Brau-Aguadé, et al. (1994).

“A comparison of molar root canal preparations using Flexofile, Canal Master U, and Heliapical Instruments.“

J Endod 20(10): 495-499.

Ruddle, C. J., P. Machtou, et al. (2013).

„Wurzelkanalfeilen der fünften Generation.“

Endodontie Journal Sonderdruck 2; 12. Jahrgang.

Sattapan, B., G. J. Nervo, et al. (2000).

"Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use."

J Endod 26(3): 161-165.

Saunders, W. P. and E. M. Saunders (1994).

“Comparison of three instruments in the preparation of the curved root canal using the modified double-flared technique.“

J Endod 20(9): 440-444.

Schäfer, E. (2001).

"Shaping ability of Hero 642 rotary nickel-titanium instruments and stainless steel hand K-Flexofiles in simulated curved root canals."

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 92(2): 215-220.

Schäfer, E. and D. Lohmann (2002 a).

"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(6): 505-513.

Schäfer, E. and D. Lohmann (2002 b).

"Efficiency of rotary nickel-titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile - Part 2. Cleaning effectiveness and instrumentation results in severely curved root canals of extracted teeth."

Int Endod J 35(6): 514-521.

Schäfer, E. and R. Schlingemann (2003).

"Efficiency of rotary nickel-titanium K3 instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth."

Int Endod J 36(3): 208-217.

Schäfer, E. and M. Vlassis (2004).

"Comparative investigation of two rotary nickel-titanium instruments: ProTaper versus RaCe. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth."

Int Endod J 37(4): 239-248.

Schilder, H. (1974).

"Cleaning and shaping the root canal."

Dent Clin North Am 18(2): 269-296.

Schneider, S. W. (1971).

"A comparison of canal preparations in straight and curved root canals."

Oral Surg Oral Med Oral Pathol 32(2): 271-275.

Schrader, C., M. Ackermann, et al. (1999).

"Step-by-step description of a rotary root canal preparation technique."

Int Endod J 32(4): 312-320.

Serene, T. P., J. D. Adams, et al. (1995).

Nickel-titanium instruments: applications in endodontics.

St. Louis, Ishiyaku EuroAmerica, Inc.

Siqueira, J. F., I. N. Rôças, et al. (2002).

"Incidence of postoperative pain after intracanal procedures based on an antimicrobial strategy."

J Endod 28(6): 457-460.

Sjögren, U., B. Hägglund, et al. (1990).

"Factors affecting the long-term results of endodontic treatment."

J Endod 16(10): 498-504.

Sonntag, D. (2005).

„Single-length-Technik.“

Endodontie Journal 1: 36-37.

Sonntag, D., A. Guntermann, et al. (2003).

"Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students."

Int Endod J 36(4): 246-255.

Städtler, P. (2012).

„Essenzielle Fragen zur maschinellen WK-Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten.“

Endodontie Journal 2: 14-20.

Svec, T. A. and M. M. Wang (1998).

"Precurving of nickel-titanium files affects transportation in simulated canals."

J Endod 24(1): 23-25.

Tepel, J., E. Schäfer, et al. (1993).

„Kunststoffe als Modellmaterial 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(4): 297-310.

Torabinejad, M. and R. E. Walton (1991).

"Managing endodontic emergencies."

J Am Dent Assoc 122(5): 99, 101, 103.

Turpin, Y. L., F. Chagneau, et al. (2000).

"Impact of two theoretical cross-sections on torsional and bending stresses of nickel-titanium root canal instrument models."

J Endod 26(7): 414-417.

Tran Khanh, C. (2015).

Dissertation (Universität Hamburg): „Vergleichende Studie zur manuellen und maschinellen Aufbereitung künstlicher, gekrümmter Wurzelkanäle.“

URL: <http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2015/7209/> (Stand: 29.06.2015).

Varela-Patiño, P., A. Ibañez-Párraga, et al. (2010).

“Alternating versus continuous rotation: a comparative study of the effect on instrument life.“

J Endod 36(1): 157-159.

Veltri, M., A. Mollo, et al. (2005).

"A comparative study of Endoflare-Hero Shaper and Mtwo NiTi instruments in the preparation of curved root canals."

Int Endod J 38(9): 610-616.

Victor, A., A. Elsäßer, et al. (2010).

„Wie bewertet man die p-Wert-Flut?“

Dtsch Arztebl Int 107(4): 50-56.

Walia, H. M., W. A. Brantley, et al. (1988).

"An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files."

J Endod 14(7): 346-351.

Weber, T. (2010).

Memorix Zahnmedizin.

Stuttgart - New York, Georg Thieme Verlag.

Weiger, R., M. Brückner, et al. (2003).

"Preparation of curved root canals with rotary FlexMaster instruments compared to Lightspeed instruments and NiTi hand files."

Int Endod J 36(7): 483-490.

Weine, F. S., R. F. Kelly, et al. (1975).

"The effect of preparation procedures on original canal shape and on apical foramen shape."

J Endod 1(8): 255-262.

Wu, M. K. and P. R. Wesselink (1995).

"Efficacy of three techniques in cleaning the apical portion of curved root canals."

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 79(4): 492-496.

Wu, M. K., P. R. Wesselink, et al. (2000).

"Apical terminus location of root canal treatment procedures."

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 89(1): 99-103.

Yared, G. (2008).

"Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations."

Int Endod J 41(4): 339-344.

Ye, J. and Y. Gao (2012).

"Metallurgical characterization of M-Wire nickel-titanium shape memory alloy used for endodontic rotary instruments during low-cycle fatigue."

J Endod 38(1): 105-107.

Yoo, Y. S. and Y. B. Cho (2012).

“A comparison of the shaping ability of reciprocating NiTi instruments in simulated curved canals.“

Restor Dent Endod 37(4): 220-227.

You, S. Y., K. S. Bae, et al. (2010).

“Lifespan of one nickel-titanium rotary file with reciprocating motion in curved root canals.“

J Endod 36(12): 1991-1994.

Yun, H. H. and S. K. Kim (2003).

"A comparison of the shaping abilities of 4 nickel-titanium rotary instruments in simulated root canals."

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 95(2): 228-233.

Zmener, O. and L. Balbachan (1995).

“Effectiveness of nickel-titanium files for preparing curved root canals.“

Endod Dent Traumatol 11(3): 121-123.



## 9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufrichtungstendenz einer Edelstahlfeile im apikalen Bereich eines gekrümmten Wurzelkanals	6
Abb. 2: Zip-Elbow-Effekt nach der Aufbereitung eines gekrümmten Wurzelkanals	8
Abb. 3: apikale Perforation bei der Aufbereitung eines gekrümmten Wurzelkanals	9
Abb. 4: Darstellung einer Blockade im apikalen Bereich eines gekrümmten Wurzelkanals	10
Abb. 5: Stufenbildung an der Außenkurvatur eines gekrümmten Wurzelkanals	11
Abb. 6: Längen- und Durchmesserbeschreibung eines Reamers (ISO 110)	13
Abb. 7: vergrößerte Darstellung des Arbeitsteils eines Reamers (ISO 80)	13
Abb. 8: vergrößerte Darstellung des Arbeitsteils einer K-Feile (ISO 80)	13
Abb. 9: vergrößerte Darstellung des Arbeitsteils einer Hedström-Feile (ISO 80)	14
Abb. 10: Kern bei einer Hedström-Feile (links), Reamer oder K-Feile mit dreieckigem Querschnitt (Mitte) und Reamer oder K-Feile mit quadratischem Querschnitt (rechts)	16
Abb. 11: Spanraum (dunkellila) bei einer Hedström-Feile (links), Reamer oder K-Feile mit dreieckigem Querschnitt (Mitte) und Reamer oder K-Feile mit quadratischem Querschnitt (rechts)	17
Abb. 12: Grundformen der Handinstrumente (K-Feile, Hedström-Feile und Reamer) mit der Darstellung des Tangentenwinkels	17
Abb. 13: Schematische Darstellung der Durchmesserzunahme unterschiedlicher Konizitäten von 2%, 4%, 6%, 8% und der progressiven Konizität von verschiedenen marktüblichen Systemen am Punkt D3 (3 mm vom Apex entfernt)	20
Abb. 14: aktiver (Dreieck) und passiver (U-Form) Instrumentenquerschnitt	20
Abb. 15: Umwandlung einer Ni-Ti-Legierung von einer Austenit- in eine Martensitphase	28
Abb. 16: Darstellung der Protaper Next Feile der Größe 050 (6%)	30
Abb. 17: Darstellung der Protaper Next Feilen der Größen 017 (4%), 025 (6%), 030 (7%), 040 (6%), 050 (6%)	31
Abb. 18: Darstellung der Wellen- oder Schlangenbewegung einer Protaper Next Feile der Größe 050 entlang des Schneidbereichs	32
Abb. 19: Darstellung der F6 Feile der Größe 030 (6%)	33
Abb. 20: Darstellung der F6 Feilen der Größen 020 (6%), 025 (6%) und 030 (6%)	34
Abb. 21: Darstellung der WaveOne Feile der Größe 040 (8%)	36
Abb. 22: Darstellung der WaveOne Feilen der Größen 021 (6%), 025 (8%) und 040 (8%)	36
Abb. 23: Epoxidharz-Block, lateral	45
Abb. 24: Epoxidharz-Block mit eingravierter Zahl und Justierungskreuzen	46
Abb. 25: Epoxidharz-Block, angefärbt mit Toluidinblau-Lösung	47
Abb. 26: Repräsentation mit befestigter Spiegelreflexkamera und Fixierungsvorrichtung	48
Abb. 27: Fixierungsvorrichtung mit Millimeterpapier	48
Abb. 28: fehlerfreie Aufbereitung	54
Abb. 29: Zip-Elbow-Effekt	54
Abb. 30: Ledge	55
Abb. 31: Apical Blockage (Apikale Blockade)	55
Abb. 32: eingefärbter, unaufbereiteter Wurzelkanal	56
Abb. 33: aufbereiteter Wurzelkanal	56
Abb. 34: mit Adobe Photoshop überlagerte Wurzelkanäle	56
Abb. 35: mit Adobe Photoshop überlagerte Wurzelkanäle	57
Abb. 36: Darstellung der erstellten Maske	58
Abb. 37: überlagerte Wurzelkanäle mit Maske	58
Abb. 38: Darstellung der Messung für den Materialabtrag im Wurzelkanal	58
Abb. 39: Prozentuale Darstellung der Aufbereitungsfehler für die maschinelle und die manuelle Aufbereitung	61
Abb. 40: Prozentuale Darstellung der Aufbereitungsfehler für die vollrotierende und die reziproke Aufbereitung	62
Abb. 41: Prozentuale Darstellung der Aufbereitungsfehler für die 4 Aufbereitungssysteme	63

Abb. 42: Prozentuale Darstellung der „Zip-Elbows“ für die 4 Aufbereitungssysteme	<b>64</b>
Abb. 43: Prozentuale Darstellung der „Ledges“ für die 4 Aufbereitungssysteme	<b>65</b>
Abb. 44: Prozentuale Darstellung der „Apical Blockages“ für die 4 Aufbereitungssysteme	<b>66</b>
Abb. 45: Prozentuale Darstellung der transportierten Kanäle für die maschinelle und die manuelle Aufbereitung	<b>67</b>
Abb. 46: Prozentuale Darstellung der transportierten Kanäle für die vollrotierende und die reziproke Aufbereitung	<b>68</b>
Abb. 47: Prozentuale Darstellung der transportierten Kanäle für die 4 Aufbereitungssysteme	<b>69</b>
Abb. 48: Prozentuale Darstellung der transportierten Kanäle an den jeweiligen Messpunkten (1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm, 11 mm) für die 4 Aufbereitungssysteme	<b>70</b>
Abb. 49: Boxplot der Aufbereitungszeiten in Sekunden für die maschinelle und die manuelle Aufbereitung	<b>74</b>
Abb. 50: Boxplot der Aufbereitungszeiten in Sekunden für die vollrotierende und die reziproke Aufbereitung	<b>76</b>
Abb. 51: Boxplot der Aufbereitungszeiten in Sekunden für die 4 Aufbereitungssysteme	<b>79</b>
Abb. 52: Prozentuale Darstellung der Instrumentenfrakturen für die maschinelle und die manuelle Aufbereitung	<b>80</b>
Abb. 53: Prozentuale Darstellung der Instrumentenfrakturen für die vollrotierende und die reziproke Aufbereitung	<b>81</b>
Abb. 54: Prozentuale Darstellung der Instrumentenfrakturen für die 4 Aufbereitungssysteme	<b>82</b>
Abb. 55: Prozentuale Darstellung der Antworten, welches Aufbereitungssystem den Studierenden einfacher zu erlernen erschien	<b>83</b>
Abb. 56: Prozentuale Darstellung der Antworten, welches Aufbereitungssystem den Studierenden sicherer zu erlernen erschien	<b>84</b>

## 10 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Versuchsdesign	<b>43</b>
Tab. 2: Protaper Next Ni-Ti-Instrumente zur maschinellen Aufbereitung	<b>51</b>
Tab. 3: F6 Ni-Ti-Instrumente zur maschinellen Aufbereitung	<b>52</b>
Tab. 4: WaveOne Ni-Ti-Instrumente zur maschinellen Aufbereitung	<b>52</b>

## 11 Anhang

### 11.1 Materialienliste

1. Beleuchtungseinrichtung, Kaiser<sup>®</sup>
2. Copylizer eVision<sup>®</sup>, Kaiser<sup>®</sup>
3. Endopilot<sup>®</sup> Endomotor, Schlumbohm GmbH & Co. KG<sup>®</sup>
4. Epoxidharz-Block, Komet<sup>®</sup>
5. Excel<sup>®</sup> 2010, Microsoft<sup>®</sup>
6. F6 SkyTaper<sup>®</sup> Feilen, Komet<sup>®</sup>
7. Handstück, keine Angabe
8. Hedström-Feilen, VDW<sup>®</sup>
9. Illustrator<sup>®</sup> CS 5, Adobe<sup>®</sup>
10. Kanüle ENDO 30G, Transcodent<sup>®</sup>
11. MacBook Pro<sup>®</sup> 13", Apple<sup>®</sup>
12. Makro-Objektiv EF 100mm/1:2,8 USM, Canon<sup>®</sup>
13. Messblock Typ Endo-M-Bloc, Dentsply<sup>®</sup>
14. Millimeterpapier, Ursus<sup>®</sup>
15. Photoshop<sup>®</sup> CS 5, Adobe<sup>®</sup>
16. Protaper Next<sup>®</sup> Feilen, Dentsply Maillefer<sup>®</sup>
17. PVC-Klebeband, Tesa<sup>®</sup>
18. Rosenbohrer 0,4 mm, Komet<sup>®</sup>
19. SDHC-Card 8 GB, SanDisk<sup>®</sup>

20. SLR-Digitalkamera EOS 350 D, Canon<sup>®</sup>
21. Spritze Luer Lock Solo 3 ml, B. Braun<sup>®</sup>
22. SPSS<sup>®</sup> 21, IBM<sup>®</sup>
23. Toluidinblau-Lösung, keine Angabe
24. USB-Kabel, keine Angabe
25. WaveOne<sup>®</sup> Feilen, Dentsply Maillefer<sup>®</sup>
26. X-Smart Plus<sup>®</sup> Endomotor, Dentsply Maillefer<sup>®</sup>
27. Zufallsgenerator, [www.random.org](http://www.random.org)

## 11.2 Lebenslauf

Entfällt aus datenschutzrechtlichen Gründen.

### 11.3 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: .....

## 12 Danksagung

Eine wissenschaftliche Arbeit wie diese benötigt die Unterstützung durch wichtige Menschen, um zum Abschluss zu kommen. Mein Dank gilt daher allen, die mich auf diesem Wege begleitet haben und immer ein offenes Ohr für mich hatten.

Ein großer Dank gilt Frau Prof. Dr. Platzer für das Engagement, dieses Dissertationsvorhaben zu betreuen und mich dabei finanziell zu unterstützen.

Für die zahlreichen guten Gespräche und den kompetenten Rat danke ich Herrn Dr. Lemke ganz herzlich. Mit großem Einsatz stand er mir bei der Projektplanung zu jedem Zeitpunkt zur Seite und half mir bei Fragen mit seinem fundierten Fachwissen immer weiter. Dieses hat sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Dankbar anerkennen möchte ich die Unterstützung von meinem Patenonkel Winfried Zabel, der mir die Zusammenarbeit mit Ines Kreuzfeldt ermöglichte. Sie gab sich zu jeder Zeit Mühe, mir bei meinen statistischen Fragen zur Seite zu stehen. Besonders wertvoll waren die tollen Gespräche und ihre positiv gestimmte Art, die mir Mut machten, auch bei schwierigen Dingen stets den Kopf oben zu halten.

Ein besonders wichtiges Dankeschön gilt meinem Verlobten Sebastian Woehe, der mich bestärkt hat, wenn ich an mir gezweifelt habe und mir den Rücken freigehalten hat. Seine liebevolle Art hat mich immer wieder aufgebaut. In diesem Zusammenhang möchte ich mich ebenfalls bei seiner Familie bedanken, die fest an mich geglaubt hat und mir zu jeder Zeit Kraft gab.

Am Ende gebührt mein Dank meiner Großmutter Christel Zabel und meiner Mutter Sabine Zabel, die mir das Studium der Zahnmedizin ermöglichten und



mir den Grundstein für diesen Beruf legten. Sie waren in meinem Leben immer an meiner Seite und haben mir mit ihrer Lebenserfahrung den richtigen Weg gezeigt. Ein Dank dafür, dass sie immer alles Erdenkliche bereit sind für mich zu geben.