

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und  
Endodontologie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Kommissarische Direktorin: Prof. Dr. Michelle Alicia Ommerborn

## **Temperaturverhalten intrakanalärer Spülung während endodontischer Therapie**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin der  
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von  
Ralf Keppel, M.Sc.

2021

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Prof. Dr. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. David Sonntag

Zweitgutachter: Prof. Dr. Alfons Hugger

Meinen Eltern, meiner Frau Ramona und meinen Kindern  
Wummwumm (★2017), Lilly (\*2018) und Emil (\*2020)

## Zusammenfassung

Natriumhypochlorit hat sich als Spüllösung bei der endodontischen Behandlung etabliert. Durch eine Erwärmung von Natriumhypochlorit wird die Desinfektionswirkung und die Gewebeauflösung verstärkt, ohne dass die Toxizität steigt. Das Temperaturverhalten im Wurzelkanal während einer Spülung mit erwärmten Natriumhypochlorit wurde jedoch nur wenig untersucht. Der Einfluss der Aufbereitungsform auf das Temperaturverhalten im Wurzelkanal wurde bisher noch nicht beachtet. In der vorliegenden Studie wurden Temperaturveränderungen bei Verwendung von unterschiedlich temperierten Spülflüssigkeiten gemessen. Weiterhin wurde der Einfluss von Aufbereitungsgröße und Konizität auf die intrakanaläre Temperatur untersucht. 24 Unterkieferfrontzähne mit jeweils einem Kanal wurden ausgewählt und randomisiert in vier Gruppen zu den Endgrößen 30.04, 30.06, 40.04 und 40.06 aufbereitet. Von apikal wurde ein Tauchfühler Typ K Durchmesser 0,5 mm im Wurzelkanal befestigt und die Zähne in einem Inkubator mit konstanten 37 °C installiert. Wasser wurde auf 10 °C, 21 °C, 37 °C, 45 °C und 60 °C temperiert und jeder Kanal zehn Mal jeweils 1 Minute gespült. Die Temperatur wurde kontinuierlich während des Spülvorganges sowie 2 Minuten darüber hinaus aufgezeichnet. Mittels Mann-Whitney-U-Test wurden die Maximaltemperaturen bzw. Minimaltemperaturen in der apikalen Region sowie die Temperaturen nach Ende des Spülvorganges jeweils in Abhängigkeit von der Aufbereitungsgröße und der Konizität untersucht. Eine höhere Aufbereitungskonizität führte bei einer Spülung mit erwärmter Flüssigkeit zu einer signifikant ( $p < 0,05$ ) höheren Temperatur im apikalen Wurzelkanal. Ebenso wurde nach einer Temperaturabsenkung der Aufwärmvorgang zurück auf 37 °C durch die Aufbereitungskonizität signifikant beeinflusst. Auf Abkühlphasen im Wurzelkanal hatte die Konizität keinen signifikanten Einfluss. Die apikale Aufbereitungsgröße hatte nur bei stark abgekühlten und leicht erwärmten Spüllösungen eine signifikante Wirkung auf die Temperatur im Wurzelkanal. Auf die Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur und auf die Haltezeit hatten die Aufbereitungsformen nur vereinzelt einen signifikanten Einfluss ( $p < 0,05$ ). Bei stark abgekühlten Spüllösungen wurden die Minimaltemperaturen signifikant häufiger erreicht, wenn der Zahn apikal größer oder mit einem höheren *Taper* aufbereitet wurde. Bei der Spülung mit unterschiedlich temperierten Flüssigkeiten kommt es während des Spülvorganges zu deutlichen Temperaturveränderungen im Kanal. Die Aufbereitungsform beeinflusst diese Temperaturentwicklung, aber nicht in jedem Fall signifikant. Ein Effekt über den Spülvorgang hinaus ist nicht zu erwarten.

## **Abstract**

Sodium hypochlorite is now the established rinsing solution for use in endodontic treatment. Preheating the sodium hypochlorite enhances the disinfection effect and tissue dissolution without increasing toxicity. However, the temperature curve in the root canal during irrigation with heated sodium hypochlorite has received little attention, and the influence of the preparation geometry on the temperature curve within the canal has not been studied at all. The present study measured temperature changes while irrigating root canals using liquids at different baseline temperatures and investigated the influence of the size and conicity of the preparation on intracanal temperature. Twenty-four single-canal mandibular anterior teeth were selected and prepared randomly in four groups for final sizes of 30.04, 30.06, 40.04, or 40.06. An immersion temperature probe (type K, diameter 0.5 mm) was inserted apically and secured inside the root canal. The teeth were placed in an incubator at a constant 37°C. Water was pre-tempered to 10°C, 21°C, 37°C, 45°C, or 60°C and used to irrigate each canal ten times for 1 minute. The temperature was continuously recorded during the irrigation process and until 2 minutes after its end. Using the Mann-Whitney U-test, the maximum and minimum temperatures in the apical region and the temperatures after the end of the process were examined in relation to the size of the preparation and its conicity. Greater preparation conicities resulted in significantly ( $p < 0.05$ ) higher temperatures in the apical root canal when irrigated with heated liquid. Likewise, after a temperature reduction, re-warming to 37°C was significantly influenced by the processing taper. Conicity had no significant influence on cooling phases within the root canal. The apical preparation size had a significant effect on the temperature in the root canal only if the irrigant had been cooled or only slightly heated. Only in isolated cases ( $p < 0.05$ ) did the preparation geometry have a significant influence on times to maximum/minimum temperature or on holding times. Minimum temperatures were reached significantly more often with cooler rinsing solutions if the root canal preparation was more extensive apically or exhibited a higher taper. Irrigation with liquids at different temperatures results in significant temperature changes in the root canal during the irrigation process. The preparation geometry has an influence on temperature gradients, but these are not always significant. No effects beyond the rinsing process itself are to be expected.

## Abkürzungsverzeichnis

<b>%</b>	Prozent
<b>°C</b>	Grad Celsius
<b>Abb.</b>	Abbildung
<b>C. albicans</b>	Candida albicans
<b>E. faecalis</b>	Enterococcus faecalis
<b>EDTA</b>	Ethylendiamintetraessigsäure
<b>ISO</b>	Internationale Organisation für Normung
<b>K</b>	Kelvin
<b>m</b>	Meter
<b>min</b>	Minute
<b>ml</b>	Milliliter
<b>mm</b>	Millimeter
<b>s</b>	Sekunde
<b>W</b>	Watt

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Grundlagen.....	1
1.1.1	Chemische Entfernung von Biofilm.....	2
1.1.2	Formgebung durch endodontische Feilen.....	3
1.1.3	Kombination chemische und physikalische Anwendung.....	4
1.2	Natriumhypochlorit.....	6
1.2.1	Konzentration in der Endodontie.....	6
1.2.2	Spülunfälle und Toxizität.....	8
1.2.3	Erwärmung von Natriumhypochlorit.....	9
1.2.4	Temperaturverhalten im Wurzelkanal.....	11
1.2.5	Techniken zur Erwärmung im Wurzelkanal.....	12
1.2.6	Gewebeschädigung durch Temperatur.....	13
1.3	Aufbereitungsgröße und Aufbereitungstaper.....	14
1.3.1	Auswirkungen auf die Reinigung.....	14
1.3.2	Auswirkungen auf den Spülvorgang.....	15
1.3.3	Auswirkungen auf die Fließrate.....	16
1.3.4	Auswirkungen auf die Wurzelkanalfüllung und das Wurzelfrakturrisiko.....	17
1.4	Ziele der Arbeit.....	18
2	Material und Methoden.....	20
2.1	Vorbereitung und Ethikvotum.....	20
2.2	Zahnauswahl.....	20
2.3	Versuchsaufbau.....	21
2.4	Versuchsablauf.....	22
2.5	Untersuchungsparameter.....	26
2.6	Statistische Auswertung.....	27
2.6.1	Zusammenführung der Daten.....	27
2.6.2	Prüfung auf Normalverteilung.....	30
2.6.3	Gruppenaufteilung.....	30

2.6.4 Kontrollgruppe.....	30
2.7 Testauswahl.....	30
<b>3 Ergebnisse.....</b>	<b>33</b>
3.1 Temperaturverlauf der Gruppen.....	33
3.1.1 Temperaturverlauf nach apikaler Aufbereitungsgröße.....	33
3.1.2 Temperaturverlauf nach Aufbereitungskonizität.....	37
3.2 Maximaltemperatur/Minimaltemperatur.....	41
3.3 Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur/Minimaltemperatur.....	42
3.4 Haltezeit.....	43
3.5 Temperatur 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende.....	44
3.6 Häufigkeit der Maximaltemperatur/Minimaltemperatur.....	46
3.7 Kontrollgruppe.....	47
3.8 Fließrate.....	47
3.9 Zusammenfassung der Unterschiede im Temperaturverlauf.....	48
3.9.1 Isolierte Darstellung der apikalen Aufbereitungsgröße.....	49
3.9.2 Isolierte Darstellung der Aufbereitungskonizität.....	50
<b>4 Diskussion.....</b>	<b>51</b>
4.1 Versuchsaufbau.....	51
4.2 Versuchsablauf.....	53
4.3 Anzahl und Position der Messsonden im Kanal.....	54
4.4 Fließgeschwindigkeit.....	55
4.5 Untersuchungsparameter.....	57
4.6 Statistik.....	59
4.6.1 Testauswahl.....	59
4.6.2 Ergebnisse.....	60
4.6.3 Apikale Aufbereitungsgröße.....	61
4.6.4 Aufbereitungskonizität.....	61
4.6.5 Bewertung der statistischen Ergebnisse.....	62
4.7 Maximaltemperatur/Minimaltemperatur.....	63
4.8 Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur/Minimaltemperatur.....	64
4.9 Haltezeit.....	64
4.10 Temperatur 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende.....	65

4.11 Häufigkeit der Maximaltemperatur/Minimaltemperatur.....	65
4.12 Gefahr der Gewebeschädigung in der Praxis.....	65
4.13 Schlussfolgerung.....	66
5 Literaturangaben.....	67
6 Anhang.....	76

# 1 Einleitung

## 1.1 Grundlagen

Dringen Bakterien in das Wurzelkanalsystem ein, so ist eine symptomatische irreversible Pulpitis die häufige Folge. In manchen Fällen geht das Pulpagewebe auch asymptomatisch zugrunde. In beiden Fällen gilt das Wurzelkanalsystem als infiziert. Da die körpereigene Abwehr nur einen unzureichenden Zugang und kaum Reparaturmechanismen im Wurzelkanal besitzt, ist der Zahnerhalt nur durch eine Wurzelkanalbehandlung möglich. Auch nach einem Trauma kann eine Wurzelkanalbehandlung notwendig sein. Das Ziel der Wurzelkanalbehandlung ist im ersten Schritt die Entfernung des Pulpagewebes und der Bakterien im Wurzelkanal. Im zweiten Schritt wird das Kanalsystem durch eine Wurzelkanalfüllung versiegelt, so dass Bakterien keinen Raum zur Vermehrung vorfinden. In der Praxis erfolgt der erste Schritt der Reinigung und Desinfektion durch endodontische Feilen und durch desinfizierende Spülungen. Die Feilen wirken hauptsächlich mechanisch, da sie das Pulpagewebe entfernen und die Kanalwand durch Erweiterung des Wurzelkanals abtragen. Mit dieser mechanischen Reinigung wird auch gleichzeitig die Bakterienzahl reduziert. Die Wurzelkanalspülung soll durch ihre desinfizierende Eigenschaft eine chemische Reinigung bewirken. Durch die Strömung einer aktivierten Spülung erfolgt jedoch auch eine mechanische Reinigung. Auch wenn die Kombination von Wurzelkanalerweiterung mit Spülung als etabliert gilt, so sind die Details zur Ausführung in erster Linie abhängig von der Lehrmeinung, zusätzlich aber auch von den eingesetzten Materialien und Techniken. So wird teilweise eine weite Aufbereitungsgröße mit einer geringen Konizität befürwortet. Genauso wird jedoch auch eine minimale apikale Aufbereitung zusammen mit einer hohen Konizität gelehrt. Neuere Feilensysteme bieten teilweise nur noch eine sehr begrenzte Auswahl der apikalen Aufbereitungsgrößen an und geben oft auch durch das Feilensystem die Aufbereitungskonizität vor.

Eine Lösung zur Wurzelkanalspülung sollte die Schmierschicht entfernen, bakterizid wirken, das Gewebe auflösen und dabei das gesunde Gewebe nicht schädigen. Keine Spülflüssigkeit erfüllt alle diese Anforderungen allein. So entfernen Zitronensäure und EDTA zwar effektiv die Schmierschicht, sie haben aber keine bakterizide Wirkung und lösen auch nicht Gewebe auf. Chlorhexidin eliminiert zwar gut Bakterien und führt zu keiner Gewebeschädigung, aber es besitzt ebenfalls keine gewebeauflösende Eigenschaft. Natriumhypochlorit hat eine gute bakterizide Wirkung und ist in der Lage Gewebe aufzulösen. Deswegen wird in der Regel die Verwendung einer Wechselspülung aus Natriumhypochlorit und einer Lösung zur Entfernung der Schmierschicht empfohlen. Die Konzentration von Natriumhypochlorit wird kontrovers diskutiert, da Natriumhypochlorit einerseits mit steigender Konzentration zunehmend gesundes Gewebe schädigen kann, andererseits jedoch die höhere Konzentration eine stärkere bakterizide Wirkung als niedrig konzentriertes Natriumhypochlorit hat.

### **1.1.1 Chemische Entfernung von Biofilm**

Bilden Bakterien in einer selbst gebildeten Matrix eine strukturierte Gemeinschaft, die auf einer festen Oberfläche anheftet, spricht man von einem Biofilm (1). Dieser Biofilm bietet den kolonisierenden Bakterien einen guten Schutz gegen konkurrierende Bakterienspezies, gegen die Immunantwort des Körpers und gegen antibakterielle Substanzen. Die Polymatrix dient dabei als Puffer, so dass antibakterielle Lösungen beim Durchtritt verlangsamt und abgeschwächt werden. Zusätzlich sind Bakterien im Biofilm gegen desinfizierende Lösungen erheblich widerstandsfähiger als in planktonischer Form. Natriumhypochlorit besitzt grundsätzlich das Potential diesen Biofilm zu eliminieren. Die Fähigkeit dazu ist abhängig von der Konzentration, der Temperatur, der Kontaktzeit und der Aktivierung der Lösung. Dies macht es möglich, auch Kanalbereiche zu desinfizieren und Gewebe aufzulösen, wo die Feilen keine ausreichende Zugangsmöglichkeit haben.

### 1.1.2 Formgebung durch endodontische Feilen

Die Aufbereitungsform richtet sich nach den gewählten Aufbereitungsfeilen und nach der Sequenz, wie diese endodontischen Feilen eingesetzt werden. Die Spezifikationen endodontischer Instrumente wird durch die Internationale Organisation für Normung in der ISO 3630 beschrieben. Für Feilen und Reamer wurden darin die Maße und Fertigungstoleranzen aufgeführt. Bei den klassischen Edelstahlfeilen und Edelstahlreamern ergibt sich nach der ISO 3630-1 eine konische Instrumentenform mit einer Steigung von 2 %. Dieser Winkel resultiert aus der Definition, dass das schneidfähige Arbeitsteil nach der ISO-Norm 16 mm lang ist und über diese Länge von der Spitze ausgehend bis zum Ende des Arbeitsteils immer um 0,32 mm zunimmt. Daraus folgt eine Steigung von 0,02 mm pro 1 mm. Der Winkel wird in der Regel nicht in Prozent angegeben, sondern in Dezimalzahlen. Dabei hat es sich auch in Deutschland etabliert, dass die Dezimalzahlen nicht durch ein Komma, sondern wie im Englischen durch einen Punkt getrennt werden. Die führende Null wird dabei meistens weggelassen. Außerdem wird in der Regel der Konus des Instrumentes englisch mit *Taper* benannt. So wird eine Feile mit 2 % Steigung auch als Instrument mit *.02 Taper* bezeichnet. Aufgrund der rigiden Eigenschaften von Edelstahl sind Instrumente mit einem größeren Konus als 2 % bei diesem Material nicht sinnvoll. Ein größerer *Taper* kann aber durch eine *step-back-Technik* (2,3) erreicht werden, bei der die folgenden größeren Instrumente nur verkürzt eingesetzt werden. So erzeugt eine Verkürzung der Arbeitslänge in 1 mm Schritten eine Aufbereitungsform im Wurzelkanal mit einem Konus von 5 %. Dabei ist zu beachten, dass es sich eigentlich um eine stufige Aufbereitung handelt und die gleichmäßige Steigung sensibel auf Anwenderfehler ist. Mit der Einführung des Werkstoffes Nickel-Titan für die Herstellung von endodontischen Instrumenten wurden auch Feilen mit einem größeren *Taper* hergestellt. Durch die elastischen Eigenschaften von Nickel-Titan ist eine Feile auch bei größeren Querschnitten, die bei einem Schneidendesign mit einem größerem *Taper* entstehen, noch ausreichend flexibel. Es ist deswegen heute nicht mehr notwendig, den Wurzelkanal mit unterschiedlichen Feilen auszuformen, um einen größeren *Taper* als 2 % zu erhalten, sondern es kann mit einer Feile der gesamte Wurzelkanal final ausgeformt werden. Dabei

haben sich in der Anfangszeit der Nickel-Titan-Instrumente vor allem *Taper* mit 4 % und 6 % auf dem Markt durchgesetzt. Die neueren Generationen der Nickel-Titan-Feilen besitzen einen variablen *Taper*. Bei Instrumenten mit einem variablen *Taper* ist die Anordnung der verschiedenen Steigungen über das Arbeitsteil nicht einheitlich, sondern unterscheidet sich zwischen den Aufbereitungssystemen und auch zwischen den Feilen innerhalb eines Aufbereitungssystems.

Entsprechend der ISO 3630 wird die Größe einer endodontischen Feile nach dem Durchmesser an der Instrumentenspitze in Hundertstelmmillimeter benannt. Eine Feile ISO 30 misst somit 0,30 mm an der Instrumentenspitze. Die ISO-Norm lässt dabei eine Fertigungstoleranz von  $\pm 0,02$  mm zu. Da Feilen ab ISO 10 in 0,05 mm Schritten in der Größe zunehmen, hat dies insbesondere auf kleine Feilengrößen Auswirkungen. So kann eine ISO-Feile 10 auch einen Spitzendurchmesser von 0,08 mm aufweisen und eine ISO-Feile 15 im Extremfall einen Spitzendurchmesser von 0,17 mm. Damit liegt der Größensprung in diesem Beispiel bei 112,5 %. Bei höheren ISO Größen relativiert sich die Zunahme. So beträgt die Zunahme von ISO 35 auf ISO 40 ohne Fertigungstoleranz 12,5 %. Das Feilensystem ProFile Series 29 (Tulsa Dental Products, Tulsa, OK, USA) durchbrach deswegen die ISO-Norm und führte eine kontinuierliche Größenzunahme von 29,17 % an der Instrumentenspitze ein. Dadurch sollte sich insbesondere bei kleinen Größen die Schneidleistung und die Sicherheit verbessern (4,5). Der überwiegende Teil der auf dem Markt befindlichen endodontischen Feilen orientiert sich jedoch bei der Größe der Instrumentenspitze an der ISO-Norm.

### **1.1.3 Kombination chemische und physikalische Anwendung**

Die desinfizierenden Eigenschaften von Natriumhypochlorit können durch physikalische Anwendungen ergänzt und damit verstärkt werden. So führt der aktivierte Spülvorgang selbst zu einer Strömung der Flüssigkeit. Diese kinetische Energie bewirkt eine Scherspannung an der Kanalwand und somit eine zusätzliche Reinigung. Außerdem kommt es durch die Strömung zu einem Austausch der Spülflüssigkeit. Dadurch wird zum einen verbrauchte Spüllösung erneuert und gelöster *Debris* heraus gespült. Für die Aufbereitung sollte der

Wurzelkanal mit Spüllösung geflutet sein. Die Spülflüssigkeit dient dabei als eine Art Gleitmittel für die Feilen und zum anderen führt die Arbeit der Feile zu einem besseren Austausch der Flüssigkeit im Kanal. Insbesondere die Anwendung von Schall und Ultraschall führt im Kanal zu einem stärkeren Austausch der Spüllösung. Bei Ultraschall wird die Desinfektion zusätzlich durch die Kavitationseffekte und eine leichte Temperaturerhöhung im Kanal verstärkt. Von einigen Autoren wird die Erwärmung von Natriumhypochlorit für den Spülvorgang empfohlen, da von erwärmten Natriumhypochlorit bekannt ist, dass sich durch eine höhere Temperatur die bakterizide und die gewebeauflösende Wirkung steigern lässt.

## 1.2 Natriumhypochlorit

### 1.2.1 Konzentration in der Endodontie

Endodontische Instrumente sind nicht in der Lage bei der Aufbereitung alle Wandanteile zu berühren (6). Die Instrumente können daher keine vollständige Reinigung des Kanalsystems erreichen. Bei der Reinigung stellt die chemische Desinfektion durch Spüllösungen somit einen wichtigen Schritt dar.

Natriumhypochlorit hat dabei einen hohen Stellenwert in der Behandlung (7) erlangt. Im Ersten Weltkrieg entdeckte Dakin (8) die desinfizierende Wirkung von Natriumhypochlorit. Er behandelte infizierte Wunden mit einer 0,5-prozentigen Lösung. Die gewebeauflösende Wirkung von Natriumhypochlorit wurde 26 Jahre später beschrieben. Dazu untersuchten 1941 Grossman und Meiman (9) neun proteolytische Lösungen an Pulpagewebe. 5 % Natriumhypochlorit war dabei am effizientesten. Hand et al. (10) konnten 1978 in einer Studie zeigen, dass die gewebeauflösende Wirkung proportional mit der Konzentration von Natriumhypochlorit steigt. Sowohl ein Anstieg der Konzentration als auch eine längere Einwirkzeit bei Austausch der Lösung führen zu einer größeren Gewebeauflösung. Das Kollagen des Dentins wird dabei allerdings stärker nachteilig beeinflusst (11). Ältere Studien wie 1976 von Cvek et al. (12) konnten bei der antibakteriellen Wirkung keinen Unterschied von 0,5 % und 5 % Natriumhypochlorit auf 22 Keime feststellen. Dies wurde 1985 von Byström et al. (13) in einer ähnlichen Versuchsanordnung bestätigt. Neuere *in vitro* Studien (14) zeigen jedoch, dass die Anwendung einer höheren Konzentration von Natriumhypochlorit auch eine bessere Desinfektion zur Folge hat. Bei schwarzpigmentierten, gram-negativen, anaeroben und fakultativ-anaeroben Bakterien fanden 1998 Siqueira et al. (15), dass die Inhibitionszone mit der Konzentration von 0,5 % nach 4 % steigt. Zwei Jahre später beschäftigten sich Siqueira et al. (16) mit *E. faecalis*. In dieser Studie konnte zwar mit 1 %, 2,5 % und 5,25 % Natriumhypochlorit eine ausreichende Bakterienreduktion erreicht werden, jedoch war auch hier die Inhibitionszone mit steigender Konzentration höher. Berber et al. (17) verglichen 2006 in ihrer Studie die Konzentrationen 5,25 %, 2,5 % und 0,5 % Natriumhypochlorit miteinander. Sie spülten Kanäle, die mit unterschiedlichen Techniken

aufbereitet wurden. Die bakterizide Wirkung war unabhängig von der Aufbereitungstechnik bei 5,25 % Natriumhypochlorit am stärksten, gefolgt von 2,5 %. Im Jahr 2007 untersuchten Oliveira et al. (18) ebenfalls die Wirkung von Natriumhypochlorit auf *E. Faecalis* und konnten bei 5,25 % Natriumhypochlorit eine stärkere Wirkung nachweisen als bei einer 1,5-prozentigen Lösung. Während bei einem jungen Biofilm 1 % Natriumhypochlorit *E. faecalis* eliminieren kann, ist die Lösung bei einem ausgereiften Biofilm nicht mehr ausreichend bakterizid (19). Konzentrationen von 2,5 % und 5 % Natriumhypochlorit können nach Untersuchungen von Frough-Reyhani et al. (19) aus dem Jahr 2016 einen solchen ausgereiften Biofilm jedoch eliminieren. Natriumhypochlorit mit einer Konzentration von 5,25 % benötigt zudem signifikant weniger Zeit als geringere Konzentrationen, um *E. faecalis* (20) und *Streptococcus faecalis* (21) zu eliminieren. Laut Betancourt et al. (22) wirkt eine Spülung mit 5 % Natriumhypochlorit effektiv gegen Bakterien. Dagegen ist eine Konzentration von 0,5 % in ihrer bakteriziden Wirkung einer Kochsalzlösung gleich zu setzen. Verma et al. (23) konnten zwar eine höhere klinische Heilungsrate bei der Verwendung von 5 % Natriumhypochlorit im Vergleich zu 1 % feststellen, der Unterschied war jedoch nicht statistisch signifikant. In einer klinischen Studie untersuchten Ulin et al. (24) Wurzelkanäle mikrobiologisch nach Spülungen mit 0,5 % und 3 % Natriumhypochlorit. Sie konnten keinen signifikanten Unterschied bei den verbliebenen Bakterien zwischen den Gruppen feststellen. An einem Model zeigten Sun et al. (25) jedoch, dass die Elimination von *E. faecalis* aus Dentintubuli abhängig von der Konzentration und der Einwirkdauer des Natriumhypochlorits war. Je höher die Konzentration und je länger die Einwirkdauer war, umso mehr Bakterien wurden aus den Mikroröhrchen herausgelöst. Bei Untersuchungen mit Rinderfrontzähnen stellten Retamozo et al. (26) fest, dass nur 5,25 % Natriumhypochlorit nach einer Einwirkzeit von 40 Minuten in der Lage war, *E. faecalis* vollständig aus den Dentinzylindern zu beseitigen. Lösungen mit einer Konzentration von 2,5 % waren dazu nur teilweise in der Lage und 1,3 % Natriumhypochlorit konnte auch bei langer Kontaktzeit *E. faecalis* nicht eliminieren. Auch beim Versuch von Mohammed et al. (27) mit 3D-Zahnmodellen konnte mit 5,25 % Natriumhypochlorit eine bessere bakterizide Wirkung erreicht werden als mit einer geringeren Konzentration. Es wurde mit 5,25 % Natriumhypochlorit mehr Biofilm

durch Spülung eliminiert als mit einer 2,5-prozentigen Konzentration. Diese Ergebnisse zeigen zusammengefasst, dass bei Natriumhypochlorit eine Erhöhung der Konzentration eine stärkere Desinfektion des Wurzelkanalsystems bewirkt.

Laut einer Untersuchung von de Gregorio et al. (28) verwenden Generalisten unter den Zahnärzten zur Hälfte bei Natriumhypochlorit eine Konzentration von unter 2,5 % und dreiviertel der spezialisierten Endodontologen bevorzugen eine Konzentration von über 2,5 %. Nach einer Erhebung von Dutner et al. (7) unter den Mitgliedern der American Association of Endodontists benutzen über 90 % Natriumhypochlorit als Spüllösung und von diesen wenden es 57 % in einer Konzentration von 5 % an.

Natriumhypochlorit reduziert das Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit des Dentins, wie Sim et al. (29) in ihrer Studie feststellen konnten. Dabei waren die Veränderungen bei einer Konzentration von 5,25 % stärker als bei 0,5 %. Wang et al. (30) bestätigten, dass mit steigender Konzentration die Biegefestigkeit abnimmt.

### **1.2.2 Spülunfälle und Toxizität**

Bei Verwendung von Natriumhypochlorit können auch Spülunfälle (31–35) auftreten. Die Anzahl der Veröffentlichungen dazu ist jedoch recht gering (36) und Spülunfälle gelten als seltener Zwischenfall. Von 314 Mitgliedern des American Board of Endodontics berichteten die Hälfte, dass in ihrem gesamten Berufsleben nie ein Spülunfall auftrat. Bei 82 Mitgliedern trat jeweils ein Spülunfall auf und 50 Mitglieder hatten mehr als einen Spülunfall in ihrem Berufsleben (37). Die Gründe für Spülunfälle sind aufgrund der mangelnden Datenlage nicht vollständig geklärt (38). Ein zu hoher Spüldruck, *via falsa* und ein Verblocken der Spülkanüle sind jedoch sicher häufige Gründe, warum es zu Spülunfällen kommt. Ein Kontakt von Spülflüssigkeit mit dem periapikalen Gewebe kann jedoch auch bei vorsichtigen Spülungen nie ausgeschlossen werden (39,40). Dieser Kontakt sollte wegen der zytotoxischen Wirkung (41) möglichst vermieden werden. Zu postoperativen Beschwerden scheint ein Kontakt zwischen Gewebe und Natriumhypochlorit allerdings nicht zu führen, wie Harrison et al. (42) feststellten. In der Literatur sind die Empfehlungen für

die Auswahl der Konzentration von Natriumhypochlorit mit 0,5 - 6 % (12–14,20,21,43–46) recht uneinheitlich. Mit steigender Konzentration von Natriumhypochlorit erhöht sich nicht nur die antibakterielle Wirkung, sondern es steigt auch die Toxizität. Darauf wiesen bereits 1973 Spangberg et al. (47) hin. Im Jahr 1995 konnten Yesilsoy et al. (48) in einer kombinierten *in-vitro* und Tierversuchsstudie diesen Zusammenhang bestätigen. In der Untersuchung von Ulin et al. (24) konnte festgestellt werden, dass eine Spülung mit 0,5 % Natriumhypochlorit weniger Schmerzen und weniger Schwellung verursachte als eine Spülung mit 3 % Natriumhypochlorit. Der Unterschied war jedoch bei den Schmerzen nicht signifikant. Mostafa et al. (49) fanden allerdings bei Spülung mit 1,3 % Natriumhypochlorit signifikant weniger Schmerzen im Vergleich zu 2,5 % Natriumhypochlorit. Zum Schutz des Patienten ist somit die Natriumhypochloritlösung auf die notwendige Konzentration zu begrenzen.

### **1.2.3 Erwärmung von Natriumhypochlorit**

Um die antibakterielle und die gewebeauflösende Wirkung weiter zu steigern, haben sich einige Studien mit der Wirksamkeit von Natriumhypochlorit bei unterschiedlichen Temperaturen befasst. Die ersten Veröffentlichungen zu diesem Thema stammen von Cunningham. In der ersten Untersuchung konnten Cunningham et al. (50) zeigen, dass 2,6 % Natriumhypochlorit bei 37 °C Gewebe genauso effektiv auflöst wie 5,2 % Natriumhypochlorit bei 21 °C. In der kurz darauf veröffentlichten Studie konnten Cunningham et al. (51) nachweisen, dass 2,6 % Natriumhypochlorit bei einer Temperatur von 37 °C die Bakterienanzahl von fünf verschiedenen Keimen signifikant besser reduziert als bei Raumtemperatur (22 °C). Auch andere Autoren wie 1981 Abou-Rass et al. (52) und 2010 Stojicic et al. (53) konnten ebenfalls zeigen, dass sich die gewebeauflösende Eigenschaft von Natriumhypochlorit sowohl durch eine höhere Konzentration als auch durch eine höhere Temperatur der Lösung erreichen lässt. Im Jahr 2015 untersuchten Dumitriu und Dobre (54) das Auflösungspotential von Natriumhypochlorit an Rattenkollagen bei verschiedenen Temperaturen und Konzentrationen. Sie fanden dieselbe Auflösungsgeschwindigkeit mit 5 % Natriumhypochlorit bei 20 °C, mit 4 % bei 20,8 °C, mit 3 % bei 23,5 °C, mit 2 % bei 26,9 °C und mit 1 % bei 36,0 °C. Aus

der Untersuchung von Sirtes et al. (55) geht hervor, dass es keinen signifikanten Unterschied bei der Pulpaauflösung zwischen 5,25 % Natriumhypochlorit bei 20 °C und 1 % Natriumhypochlorit bei 45 °C gibt. Zusätzlich wurde jedoch festgestellt, dass eine weitere Erwärmung der 1-prozentigen Natriumhypochloritlösung auf 60 °C zu einer signifikant stärkeren Auflösung des Pulpagewebes führt. Auch Rossi-Fedele et al. (56) ziehen in ihrer Studie die Schlussfolgerung, dass mit steigender Temperatur eine schnellere Gewebeauflösung einhergeht, wobei eine Erwärmung über 60 °C keinen weiteren Effekt mehr hat. In der schon erwähnten Untersuchung konnten Sirtes et al. (55) auch feststellen, dass mit einer Erwärmung der Natriumhypochloritlösung eine stärkere antibakterielle Wirkung gegen *E. faecalis* verbunden ist. Bei den bisher genannten Untersuchungen der Temperatur auf die Effektivität der Spüllösung wurde der Spülvorgang nicht im Wurzelkanal durchgeführt. Raphael et al. (57) dagegen verwendeten in einer *in vitro* Untersuchung 390 einwurzelige Frontzähne. Die Zähne wurden mit *Streptococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus* und *Pseudomonas aeruginosa* beimpft. Die Wurzelkanäle wurden mit einer 5,25-prozentigen Natriumhypochloritlösung gespült, die in drei Gruppen auf 21 °C, 27 °C und 37 °C erwärmt wurden. Hier wurde keine direkte Verbindung zwischen der bakteriziden Effektivität von 5,25 % Natriumhypochlorit und der Temperatur der Spülflüssigkeit festgestellt. In der Beschreibung des Versuchsaufbaus finden sich allerdings keine Hinweise, welche Umgebungstemperatur vorlag und wie diese konstant gehalten wurde. Bei den beiden Untersuchungen von Gulsahi et al. (58) und von del Carpio-Perochena et al. (59) wurde eine konstante Umgebungstemperatur von 37 °C bei der Spülung von Zähnen sichergestellt. Gulsahi et al. (58) fanden bei *E. faecalis* keine erhöhte bakterizide Wirkung, wenn die Temperatur des 2,5-prozentigen Natriumhypochlorits von 25 °C auf 37 °C erhöht wurde. Bei der Elimination von *C. Albicans* und einer Kontaktzeit von 5 Minuten konnte die Wirkung durch dieselbe Temperaturerhöhung jedoch gesteigert werden. Del Carpio-Perochena et al. (59) stellten bei ihrer Untersuchung fest, dass eine Temperaturerhöhung von 22 °C auf 37 °C für die Auflösung des Biofilms und den bakteriziden Effekt nicht relevant war. Der antibakterielle Effekt ist nach ihrer Untersuchung mehr abhängig von der Konzentration und der Kontaktzeit als von der Temperatur. Aus der Literatur

lässt sich somit ableiten, dass die Erwärmung von Natriumhypochlorit biochemisch betrachtet die bakterizide und gewebeauflösende Wirkung steigert. Für den Spülvorgang im Zahn ist dieser Effekt jedoch nicht einheitlich bestätigt und wenig untersucht.

Gambarini et al. (60) konnten zeigen, dass eine Natriumhypochloritlösung durch Erwärmung nichts von seiner antibakteriellen und gewebeauflösenden Wirkung einbüßt. Auch bei der Untersuchung von Sirtes et al. (55) wurde nachgewiesen, dass Natriumhypochlorit bei Temperaturen bis zu 60 °C eine Stunde stabil ist.

#### **1.2.4 Temperaturverhalten im Wurzelkanal**

Beim Temperaturverhalten der Lösung im Wurzelkanal muss berücksichtigt werden, dass im Zahn eine konstante Körpertemperatur von circa 37 °C vorhanden ist. Cameron (61) hat dies bei seiner Studie zu Temperaturveränderungen bei unterschiedlichen Ultraschallanwendungen im Kanal berücksichtigt. Er untersuchte die Temperaturveränderungen im Kanal und an der Wurzeloberfläche. Die konstante Umgebungstemperatur stellte er mit einem Wasserbad von 37 °C sicher. Bei der intermittierenden Spülmethode mit Ultraschall konnte er einen Temperaturanstieg auf maximal 45 °C messen. In einer früheren Pilotstudie (62), die sich mit den Temperaturveränderungen während des Spülvorganges befasste, wurden die Zähne in Gips eingebettet und die Umgebungstemperatur durch Installation in einen Inkubator konstant auf 37 °C gehalten. Hierbei konnte gezeigt werden, dass bei einer Spülung mit einer Temperatur von 60 °C nur circa 52 °C im Wurzelkanal erreicht werden. Bei Spülung mit einer 45 °C Lösung können nur 41 °C im Wurzelkanal erwartet werden. Außerdem näherten sich die Temperaturen im Wurzelkanal nach Abschluss der Spülung wieder recht schnell der Körpertemperatur an. So wurde bei allen Spültemperaturen 2 Minuten nach Spülende wieder 37 °C  $\pm$  4 °C erreicht. Bei diesem Versuchsaufbau wurde jedoch nur ein Zahn mit der Aufbereitungsgröße 40.04 verwendet. De Hemptinne et al. (63) führten eine *in vivo* Studie durch, bei der sie 3 mm vor Arbeitslänge direkt neben der Spülkanüle die Temperatur gemessen haben, nachdem eine 66 °C und 21 °C Spülflüssigkeit eingebracht wurden. Sie kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass sich die Temperatur beim Spülvorgang rasch änderte und nach dem

Spülende schnell der Körpertemperatur annäherte. Macedo et al. (64) untersuchten im Jahr 2017 *in vitro* das Temperaturverhalten von Spülflüssigkeiten mit 21 °C, 45 °C und 60 °C während und nach dem Spülvorgang an mehreren Stellen im Zahn, aber auch in der Spülspritze selbst. Auch sie stellten fest, dass die Temperatur sich rasch wieder der Ausgangstemperatur annäherte. Weiterhin merkten sie an, dass die Temperatur im Kanal innerhalb 1 Sekunde auf einen Wert bis 2 °C unterhalb der Spritzentemperatur anstieg. Zusätzlich fanden sie heraus, dass eine langsamere Fließrate eine niedrigere Durchschnittstemperatur bewirkt, bei einem geschlossenen Apex eine höhere Temperatur vorlag und eine 60 °C Spüllösung in einer Spülspritze innerhalb 1 Minute auf 45 °C abkühlt. Untersuchungen zum Temperaturverhalten beim Spülvorgang im Wurzelkanal mit unterschiedlichen Aufbereitungsformen liegen bisher nicht vor.

### **1.2.5 Techniken zur Erwärmung im Wurzelkanal**

Alternativ zum Einbringen erwärmter Spüllösung kann die Erwärmung von Natriumhypochlorit auch im Wurzelkanal erfolgen. Einige Autoren (61,65,66) haben sich damit beschäftigt, wie sich die Temperatur im Wurzelkanal bei Ultraschallanwendung verändert. Je nach Anwendungstechnik wurde in extrahierten Zähnen eine Temperaturerhöhung bis maximal 9,9 °C (65) erreicht. Iandolo et al. (67) beschrieben im Jahr 2018 die Erwärmung von Natriumhypochlorit mit Hilfe eines System B-Gerätes. Sie fanden eine bessere Säuberung der Kanalwände im Vergleich zur Spülung mit zuvor erwärmten Natriumhypochlorit. Im Jahr 2019 berichteten Leonardi et al. (68) ebenfalls über diese Alternative und konnten eine stärkere Erwärmung als mit Ultraschall oder mit erwärmter Spülflüssigkeit feststellen. Die Studienlage zu diesem Vorgehen ist jedoch noch nicht ausreichend, um eine Einschätzung für den klinischen Nutzen geben zu können.

### **1.2.6 Gewebeschädigung durch Temperatur**

Bei Applikation von Wärme im Wurzelkanal kann das umliegende Gewebe durch eine zu hohe Hitzeentwicklung potenziell geschädigt werden. So gehen Eriksson und Albrektsson (69) nach einer Tierversuchsstudie davon aus, dass es ab einer Temperatur von 47 °C am Knochengewebe zu einer Schädigung kommt. Macedo et al. (64) konnten jedoch nur eine maximale Temperatur von 39 °C auf der Wurzeloberfläche feststellen, wenn der Zahn mit einer 60 °C erwärmten Flüssigkeit gespült wurde.

## 1.3 Aufbereitungsgröße und Aufbereitungstaper

### 1.3.1 Auswirkungen auf die Reinigung

Die Wurzelkanalaufbereitung beinhaltet die mechanische Erweiterung und die Desinfektion des Wurzelkanalsystems. Ng et al. (70) stellten jedoch schon fest, dass es nur wenige Studien gibt, die sich mit der Erfolgsquote anhand der Aufbereitungsgröße und der Aufbereitungskonizität beschäftigt hatten. Diese Studien sind zudem recht uneinheitlich. So propagierten Smith et al. (71) die Aufbereitung mit einem großen *Taper*. Dagegen konnten Hoskinson et al. (72) dies in ihrer Studie nicht bestätigen, denn sie fanden keine erhöhte Erfolgsrate bei einer Aufbereitung mit einem größeren *Taper*. Viele Studien untersuchten die Formgebung nicht in Bezug auf die Erfolgsquote, sondern beschäftigten sich entweder mit der Entfernung von *Debris* oder der Desinfektionsleistung. Den Stellenwert der Formgebung betonten Huang et al. (73). Sie untersuchten *in vitro* den Unterschied zwischen einer statischen Spülung und einer dynamischen Spülung. Bei der dynamischen Spülung wurde die Spüllösung mit Guttaperchapoints aktiviert. In ihrem Versuchsaufbau wurden Zähne mit 20.04, 20.08, 40.04 und 40.08 aufbereitet. Außerdem wurden die Kanäle mit unterschiedlichen Mengen an Spülflüssigkeit gespült. Nach ihren Ergebnissen kommen Huang et al. (73) zu dem Schluss, dass die Aufbereitungsgröße bzw. der *Taper* zur Beseitigung eines Biofilms wichtiger waren als die Faktoren, ob die Spüllösung durch Guttapercha aktiviert wurde oder mit welcher Menge gespült wurde. Auch in der Studie von Dalton et al. (74) kommen die Autoren zu dem Schluss, dass bei einer großen Aufbereitung die Bakterienzahl signifikant besser reduziert wird als bei einer kleinen Aufbereitung. Usman et al. (75) stellten fest, dass eine Aufbereitung mit GreaterTaper-Feilen bei Größe 40 mehr *Debris* im Kanal beseitigt als nach einer Aufbereitung mit Größe 20. Rodrigues et al. (76) führten eine Studie an revisionsbedürftigen Zähnen mit einer apikalen Parodontitis durch. Eine Aufbereitung mit der ersten Feile führte zu einer Bakterienreduktion, allerdings gab es keinen signifikanten Unterschied bei der Spülung zwischen Natriumhypochlorit 1 % und Kochsalzlösung. Wurden die Kanäle weiter aufbereitet, konnte die Bakterienzahl noch mehr verringert werden. Bei einer zusätzlichen Spülung mit Natriumhypochlorit statt

Kochsalzlösung konnte nun eine signifikant bessere Desinfektionswirkung festgestellt werden. Die Autoren schlossen für ihre Studie daraus, dass eine große Aufbereitung auch Voraussetzung für einen besseren Zugang der Desinfektionslösung ist. Shuping et al. (77) kamen in ihrer Studie zu einem ähnlichen Schluss und stellten fest, dass eine stärkere Aufbereitung zu einer Bakterienreduktion führt, Natriumhypochlorit ebenfalls desinfiziert, es aber eine gewisse Aufbereitungsgröße benötigt. Die Studie von Yared und Bou Dagher (78) steht jedoch im Gegensatz dazu. Die beiden Autoren verglichen die Bakterienreduktion bei einer apikalen Aufbereitung der Größen 25 und 40. Sie konnten in ihrer Untersuchung keinen signifikanten Unterschied feststellen. In der Summe kommt jedoch eine Mehrzahl der Studien (73,74,76,77,79–82) zu dem Schluss, dass eine größere apikale Aufbereitung zu einer besseren Desinfektion führt. Der *Taper* wurde in diesen Studien jedoch nicht isoliert betrachtet. Khabbaz war an zwei Studien beteiligt, die sich mit unterschiedlichen *Tapern* bei der Aufbereitungsgröße 30 beschäftigten. Im Jahr 2011 konnten Arvaniti und Khabbaz (83) bei den *Tapern* .04, .06 und .08 keinen Unterschied in der Entfernung des Debris feststellen. Paraskevopoulou und Khabbaz (84) stellten 2016 dagegen heraus, dass es zu einer Bakterienreduktion von *E. Faecalis* kommt, wenn bei einer chemo-mechanischen Aufbereitung mit Natriumhypochlorit und einer apikalen Aufbereitungsgröße 30 allein der *Taper* von .04 auf .08 erhöht wird. Die bessere Bakterienreduktion bei größerem *Taper* erklären die Autoren mit einem vermehrten Abtrag von infiziertem Dentin und, ähnlich wie Rodrigues et al. (76), mit einem größeren Volumen der Desinfektionsflüssigkeit im Kanal.

### **1.3.2 Auswirkungen auf den Spülvorgang**

Brunson et al. (85) konnten bei einem Versuchsaufbau mit einer negativen Druckspülung zeigen, dass eine stärkere apikale Aufbereitung und ein größerer *Taper* zu einem größeren Durchfluss von Volumen pro Zeit beim Spülvorgang führt. Bei einem ähnlichen Versuchsaufbau konnten De Gregorio et al. (86) auch für gekrümmte Wurzeln bestätigen, dass eine größere apikale Aufbereitung und ein weiterer *Taper* bis 40.06 einen signifikant besseren Austausch der Spülflüssigkeit bewirkt. Die Aufbereitungsgröße und der *Taper*

haben auch Auswirkung auf die Eindringtiefe der Spülkanüle. So konnten Albrecht et al. (87) bei einer größeren apikalen Aufbereitung und einem weiteren *Taper* apikal sauberere Kanäle finden. Bei einer apikalen Aufbereitung mit Größe 20 (unabhängig vom *Taper*) und bei 40.04 konnte die Spülkanüle jedoch nicht bis 1 mm vor Arbeitslänge geschoben werden. Auch aus der Veröffentlichung von Chow et al. (88) ist schon länger bekannt, dass eine bessere apikale Reinigungswirkung durch Spülung erfolgt, wenn die Spülkanüle näher zum Apex vordringt. Khademi et al. (89) postulierten eine minimale apikale Aufbereitungsgröße von ISO 30, um das apikale Drittel gut mit der Spüllösung zu erreichen. In ihrer Studie verwendeten sie eine Spülkanüle mit einem Durchmesser von 0,413 mm (Gauge 27).

### **1.3.3 Auswirkungen auf die Fließrate**

Eine dünnere Spülkanüle führt zu einer geringeren Fließrate als eine dickere Spülkanüle (90). Macedo et al. (64) stellten bei ihrer Untersuchung mit erwärmten Spülflüssigkeiten fest, dass eine langsame Fließrate von 0,02 ml/s verglichen mit 0,2 ml/s zu einer geringeren Durchschnittstemperatur im Wurzelkanal führte. Laut Park et al. (91) erzielt eine Fließrate von 4 ml/min die effektivste Reinigung. Weiterhin bewirken offene Spülkanülen, insbesondere mit einem flachen oder abgeschrägten Ende, einen effizienteren Austausch der Spülflüssigkeit als Spülkanülen mit seitlicher Öffnung (92). Spülkanülen mit seitlicher Öffnung erreichen 3 mm vor der Aufbereitungslänge selbst bei großer Aufbereitung keinen Austausch der Desinfektionslösung bis zum Apex. Dagegen benötigen Spülkanülen mit einem offenen und flachen Ende nur eine Aufbereitungsgröße von 35.06, um bei dieser Eindringtiefe einen Austausch der Spülflüssigkeit am Apex zu bewirken (93). Spülkanülen mit seitlicher Öffnung sollten deshalb bis 1 mm vor den Endpunkt der Aufbereitung eingeführt werden (94), auch weil nur auf Höhe der seitlichen Öffnung eine Wirkung auf die Kanalwand durch Scherspannung erwartet werden kann (95). Laut Boutsoukis et al. (96) verbessert ein minimal konisch geformter Kanal mit einer großen

apikalen Aufbereitung den Flüssigkeitsaustausch und besitzt eine bessere Reinigungswirkung durch eine größere Scherspannung auf die Kanalwand. Diese Aufbereitungsform reduziert außerdem das Risiko einer Überpressung der Spüllösung.

### **1.3.4 Auswirkungen auf die Wurzelkanalfüllung und das Wurzelfrakturrisiko**

Aus einer Aufbereitung mit einem größeren *Taper* resultiert auch eine dichtere Wurzelkanalfüllung, wie Allison et al. (97) anhand einer Gegenüberstellung von standardisierter Aufbereitung mit *Taper* .02 und nach *step-back* mit einem *Taper* von .10 zeigten. Jedoch ist jede stärkere Aufbereitung mit einem Substanzverlust verbunden. So konnte Zandbiglari et al. (98) zeigen, dass eine Aufbereitung mit einem größeren *Taper* zu einer Schwächung des Zahnes und einer höheren Frakturgefahr führt.

## 1.4 Ziele der Arbeit

Die mechanische Aufbereitung mit der Erweiterung des Wurzelkanalsystems hat nicht nur die Aufgabe, den Wurzelkanal durch die Entfernung des infizierten Dentins zu reinigen, sondern es wird auch ein ausreichender Raum für den Spülvorgang und die spätere Obturation geschaffen. Auch die Aufbereitungsform hat Konsequenzen für den Spülvorgang. Hohe Aufbereitungsgrößen werden unter anderem damit begründet, um die Spülkanüle möglichst tief in den Kanal einführen zu können und um ein möglichst großes Reservoir der Spülflüssigkeit im Kanal nutzen zu können oder auch um ein besseres Strömungsverhalten bis zur Aufbereitungslänge zu erreichen. Natriumhypochlorit besitzt nicht nur gute desinfizierende Eigenschaften, sondern löst auch verbliebenes Gewebe auf. Diese beiden Eigenschaften machen Natriumhypochlorit zu einer sehr erfolgreichen Spüllösung bei der Wurzelkanalbehandlung. Diese Wirkungen lassen sich mit zunehmender Konzentration steigern, jedoch wird dabei auch die Toxizität verstärkt. Da Natriumhypochlorit bei höheren Temperaturen eine stärkere bakterizide Wirkung und bessere Gewebeauflösung besitzt, wird auch die Erwärmung dieser Flüssigkeit für den Spülvorgang propagiert. Eine Übertragung der biochemischen Effekte von erwärmten Spülflüssigkeiten auf die endodontische Behandlung setzt allerdings voraus, dass diese Temperaturveränderungen im Wurzelkanal ausreichend vorhanden sind. Im Wurzelkanal herrschen in etwa 37 °C, die auch konstant gehalten werden. Es gibt nur wenige Untersuchungen, die sich mit den Temperaturen im Wurzelkanal beim Spülvorgang mit erwärmter Flüssigkeit beschäftigen. Die Auswirkungen der Aufbereitungsform auf die Temperaturen im Wurzelkanal sind bisher jedoch noch nicht untersucht worden. Die vorliegende Studie untersuchte das Temperaturverhalten im Wurzelkanal während des Spülvorganges unter Berücksichtigung unterschiedlicher Aufbereitungsgrößen und Aufbereitungskonizitäten.

Ziel der Arbeit ist es, die Temperaturveränderungen im apikalen Kanalanteil bei Verwendung von Spülflüssigkeiten mit unterschiedlichen Temperaturen zu messen. Weiterhin wird untersucht, ob die Aufbereitungsgröße und die Konizität

der Aufbereitung einen signifikanten Einfluss auf die Temperaturveränderungen im Kanal haben.

**Folgende Hypothesen wurden untersucht:**

1. Die Aufbereitungsgröße und die Konizität der Aufbereitung haben keinen Einfluss auf die erreichten Maximaltemperaturen oder Minimaltemperaturen.
2. Die Aufbereitungsgröße und die Konizität der Aufbereitung haben keinen Einfluss auf die Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperaturen oder Minimaltemperaturen.
3. Die Aufbereitungsgröße und die Konizität der Aufbereitung haben keinen Einfluss auf die Zeiten, über welche die erreichten Maximaltemperaturen bzw. Minimaltemperaturen gehalten werden.
4. Die Aufbereitungsgröße und die Konizität der Aufbereitung haben keinen Einfluss auf die Temperatur 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende.
5. Die Aufbereitungsgröße und die Konizität der Aufbereitung haben keinen Einfluss auf die Häufigkeit der erreichten Maximaltemperaturen oder Minimaltemperaturen.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Vorbereitung und Ethikvotum**

Der Versuchsaufbau der vorliegenden Studie wurde in einer früheren Arbeit (99) entwickelt, die als Pilotstudie publiziert wurde (62). In der Untersuchung von 2012 wurde ein mittlerer Oberkieferfrontzahn gewählt. Da in der vorliegenden Studie die Wurzelkanäle mit unterschiedlichem *Taper* und unterschiedlicher Größe aufbereitet wurden, wurden die mittleren und seitlichen Unterkieferincisivi als Zahngruppe für den Versuchsaufbau gewählt. Für den Versuch erfolgte die Zustimmung der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität mit der Studiennummer 4596.

### **2.2 Zahnauswahl**

Für den Versuchsaufbau wurden aus gesammelten Unterkieferfrontzähnen 31 Zähne ausgewählt, die nach visueller Beurteilung etwa eine ähnliche Länge und Form aufwiesen. Diese Zähne wurden anschließend in zwei Ebenen geröntgt (Beispiel Abb. 1 und Abb. 2). Hierbei wurde auch untersucht, ob nur ein Kanal oder ob zwei Kanäle vorlagen. Aus den 31 Zähnen mit nur einem Kanal wurden 24 Zähne für die Versuchsdurchführung verwendet. Diese wurden auf vier Gruppen mit jeweils 6 Zähnen aufgeteilt. Zwei Zähne wurden verworfen und ersetzt, da der Messfühler nicht optimal befestigt werden konnte. Bei einem Zahn kam es nach der Aufbereitung zu einer Absprengung am Apex, so dass dieser Zahn ebenfalls verworfen und ersetzt wurde. Vier Zähne blieben als Ersatzzähne ungenutzt.



**Abb. 1: Röntgenbild frontal Zahn Nr. 2**



**Abb. 2: Röntgenbild seitlich Zahn Nr. 2**

## **2.3 Versuchsaufbau**

Die Kanäle der Unterkieferfrontzähne wurden mit Flexmaster-Instrumenten (VDW, München, Deutschland) für die einzelnen Gruppen auf 30.04, 30.06, 40.04 und 40.06 unter einem Operationsmikroskop aufbereitet. Die Feilen wurden mit dem spezialisierten Endodontiemotor Endo IT Control (VDW, München, Deutschland) angetrieben. Die Zähne wurden jeweils in einer eigenen Plastikform mit Dentalgips fixiert, wobei die Wurzelspitze circa 1 mm aus dem Boden der Plastikform herausragte. Zusätzlich wurde der Zahn mit einem Kofferdam isoliert. Die Wurzelkanäle der Zähne hatten im Durchschnitt eine Länge von 22,73 mm. Der apikale Wurzelkanalanteil der Zähne wurde jeweils 1 mm von retrograd mit einer K-Feile Größe 50 für die Aufnahme des Messfühlers aufbereitet. Der Tauchfühler Typ K Durchmesser 0,5 mm (Fa. Dostmann electronic, Wertheim-Reicholzheim, Deutschland) wurde von apikal 1 mm im Kanal mit Composite Tetric Flow (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Fürstentum Liechtenstein) befestigt. Dieser Tauchfühler wurde von der Firma

Dostmann electronic auf den Temperaturbereich 0 °C bis 70 °C justiert und an das Messgerät P600 (Fa. Dostmann electronic, Wertheim-Reicholzheim, Deutschland) angeschlossen. Über ein Datenkabel und mit Hilfe der Software DE-Graph (Version 1.3.3.118, Fa. Dostmann electronic, Wertheim-Reicholzheim, Deutschland) wurden die Temperaturen am Computer (eine Temperaturmessung pro Sekunde) mitgeloggt. Alles zusammen wurde in dem Inkubator INCUBAT 80 (MELAG Medizintechnik oHG, Berlin, Deutschland) installiert. Aus der Tür des Inkubators wurde eine runde Öffnung mit einem Durchmesser von 25 mm herausgebohrt (Abb. 3). Diese Öffnung diente als Zugang zum Zahn beim Spülvorgang.



**Abb. 3: Vorbereiteter Zahn im Inkubator**

## **2.4 Versuchsablauf**

Der Inkubator wurde auf eine Temperatur von 37 °C eingestellt. Bevor jedoch mit einem Spülvorgang begonnen wurde, wurde gewartet bis auch intrakanalär das Messgerät P600 über einen Zeitraum von 3 Sekunden eine Temperatur von 37 °C  $\pm$ 0,5 °C anzeigte.

Aus 24 aufbereiteten Zähnen wurden vier Gruppen gebildet:

- I. Aufbereitung mit 30.04 n=6
- II. Aufbereitung mit 30.06 n=6
- III. Aufbereitung mit 40.04 n=6
- IV. Aufbereitung mit 40.06 n=6

Bei jedem der Zähne erfolgten Spülungen mit Wasser der Temperatur

- 1) 10 °C (Kühlschranktemperatur)
- 2) 21 °C (Zimmertemperatur)
- 3) 37 °C (Körpertemperatur-Kontrollgruppe)
- 4) 45 °C (leicht erwärmte Spülflüssigkeit)
- 5) 60 °C (erwärmte Spülflüssigkeit)

Für das Erwärmen der Spülflüssigkeiten 37 °C, 45 °C und 60 °C wurde ein Mini Wasserbad (JULABO Labortechnik GmbH, Seelbach, Deutschland) verwendet. Das erwärmte Wasser wurde mit einem Glas entnommen. Unter Kontrolle mit dem Taschenthermometer Labtterm (Fa. Wostmann electronic, Wertheim-Reicholzheim, Deutschland) wurde gewartet, bis die gewünschte Temperatur erreicht war. Für die Spülflüssigkeiten der Temperaturen 10 °C und 21 °C wurde Wasser in einem Glas mit Hilfe eines Eiswasserbades abgekühlt und ebenfalls unter Kontrolle mit dem Taschenthermometer Labtterm (Fa. Dostmann electronic, Wertheim-Reicholzheim, Deutschland) gewartet, bis die gewünschte Temperatur erreicht war. Sowohl im Warmwasserbad als auch im Eiswasserbad wurde bei der Kontrolle mit dem Taschenthermometer das Wasser ständig in Bewegung gehalten, damit eine gleichmäßige Temperatur über die gesamte Flüssigkeit gewährleistet war. Erst beim Erreichen der angestrebten Temperatur wurde das Wasser als Spülflüssigkeit in die Spritze aufgezogen. Jeder Zahn wurde zehn Mal mit den Temperaturen 10 °C, 21 °C, 37 °C, 45 °C und 60 °C für 1 Minute gespült. Alle Messungen und Spülvorgänge wurden von einer Person durchgeführt. Für die Spülung wurden 5 ml Wasser der entsprechenden Temperatur in eine Einmalspritze LuerLock

Omnifix 5 ml (Braun Petzold, Melsungen, Deutschland) aufgezogen. Als Spülkanülen wurden NaviTips 30 Gauge/27 mm UP1424 (Ultradent Products Inc., South Jordan, USA) benutzt. Die Spülkanüle wurde auf 1 mm vor den Messfühler in den Kanal eingeführt und der Kanal für 60 Sekunden gespült. Die Temperatur wurde nach Spülende noch für 2 Minuten mitgeloggt (Abb. 4 und 5). Nach Ende des Spülvorganges wurde die Restmenge in der Spritze notiert, so dass der Flow ml/min berechnet werden konnte.

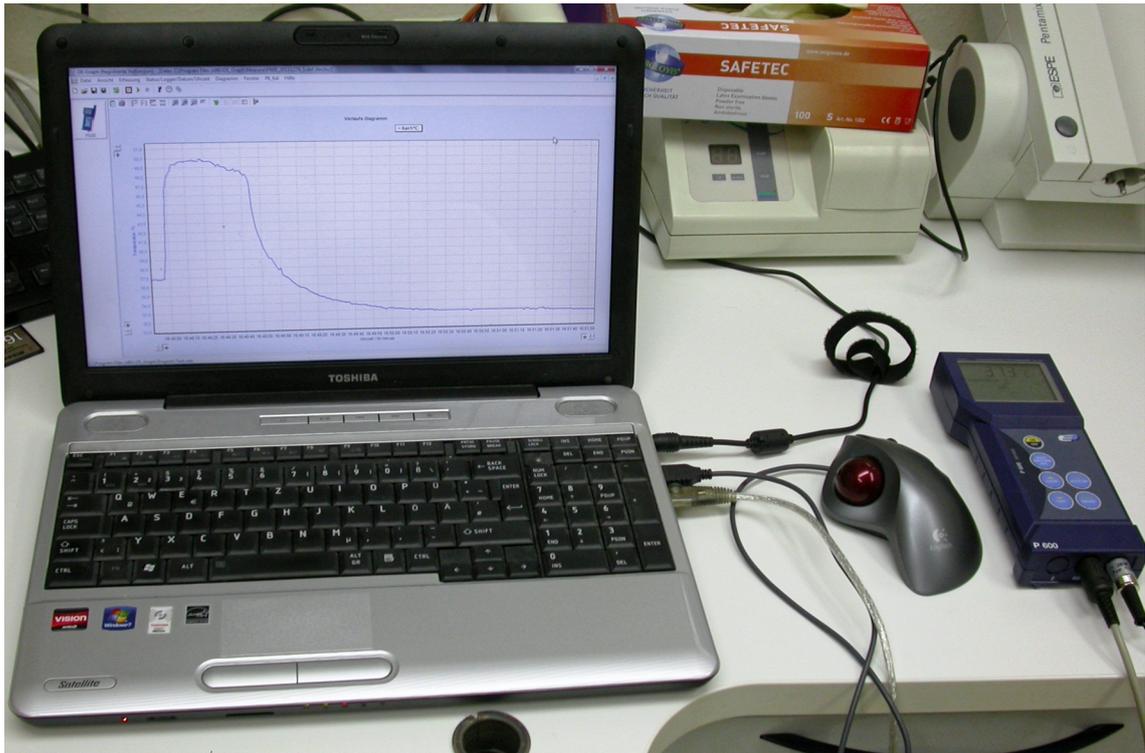
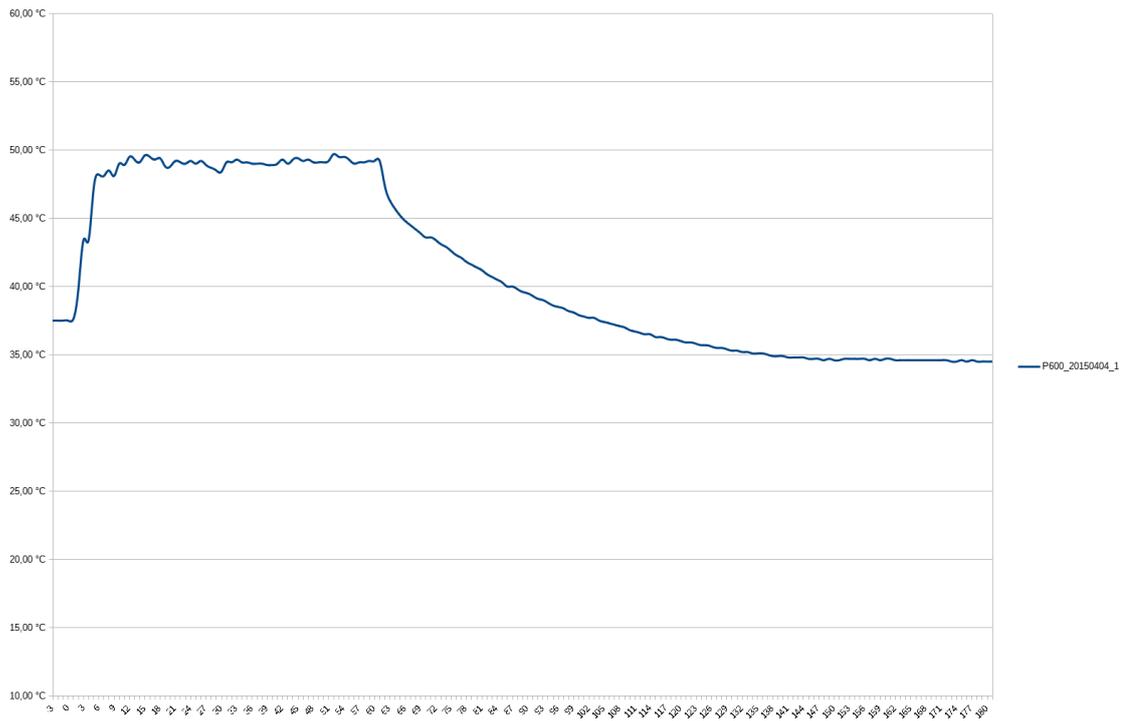


Abb. 4: Übertragung und Darstellung der Messdaten am Computer



**Abb. 5: Beispiel Kurvenverlauf Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 bei einer 60°C Spülung**  
X-Achse: Zeit in Sekunden; Y-Achse: Temperatur in °C

## 2.5 Untersuchungsparameter

1. Welche Maximaltemperaturen bzw. Minimaltemperaturen stellen sich beim Spülvorgang in der apikalen Region ein?
2. In welcher Zeit nach Spülbeginn wird die Maximaltemperatur minus 1 °C bzw. Minimaltemperatur plus 1 °C erreicht?

**Definition:**

Gewertet wird der Zeitpunkt, bei dem die Maximaltemperatur minus 1 °C bzw. Minimaltemperatur plus 1 °C zum ersten Mal erreicht wird und danach die Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur exakt erreicht wird, ohne dass der Korridor von minus 1 °C der Maximaltemperatur bzw. plus 1 °C der Minimaltemperatur verlassen wird. Ein Wert, bei dem nur der Korridor von minus 1 °C der Maximaltemperatur bzw. plus 1 °C der Minimaltemperatur erreicht wird und in der weiteren Messfolge dieser Korridor verlassen wird, ohne dass die exakte Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur erreicht wird, wird nicht gewertet.

3. Über welchen Zeitraum wird die ermittelte Maximaltemperatur minus 1 °C bzw. Minimaltemperatur plus 1 °C gehalten?

**Definition:**

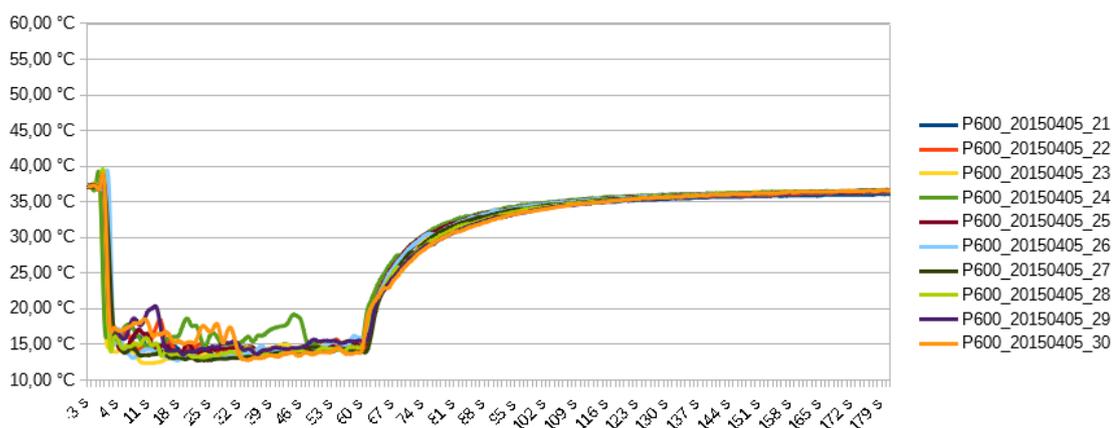
Es zählt die Zeit vom Eintritt bis zum Verlassen des Korridors minus 1 °C der Maximaltemperatur bzw. plus 1 °C der Minimaltemperatur. Wobei in diesem Zeitraum auch die Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur exakt erreicht wird. Eine Messfolge ohne Erreichen der exakten Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur wird nicht gewertet. Wird nach Verlassen und erneutem Eintritt des Korridors die Bedingung wieder vollständig erfüllt, wird dieser Zeitraum als zusätzliches Ereignis notiert. Es wird jedoch nur der längste Zeitraum gewertet.

4. Welche Temperaturen sind 1 Minute und 2 Minuten nach Ende des Spülvorgangs im Wurzelkanal noch vorhanden?
5. Wie häufig wurde die Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur erreicht?

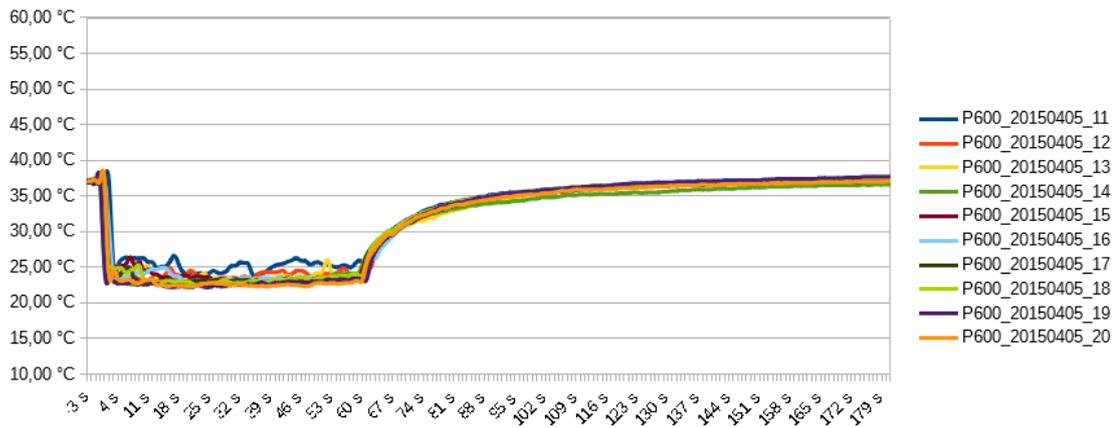
## 2.6 Statistische Auswertung

### 2.6.1 Zusammenführung der Daten

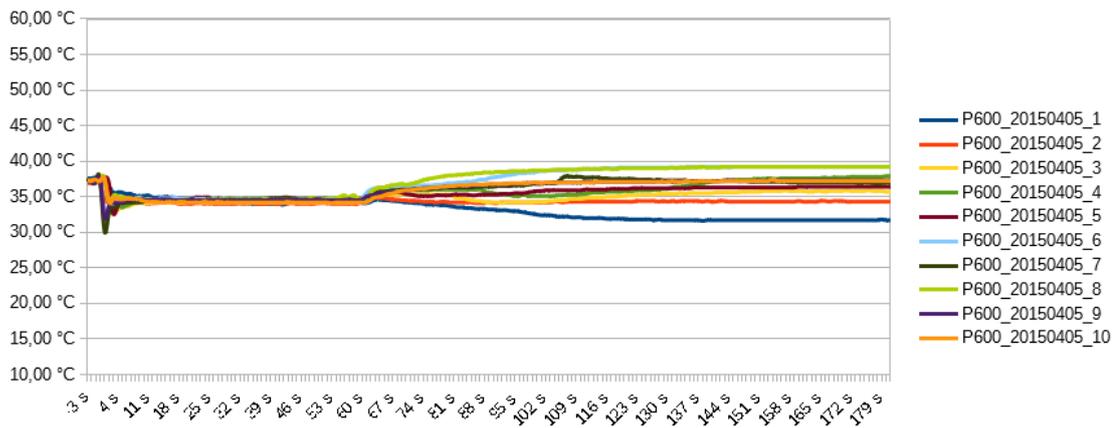
Die Software DE-Graph erzeugt für jede Messung eine Tabelle im dBase-Format. Die gesammelten Messdaten für den einminütigen Spülvorgang und bis 2 Minuten nach Spülende wurden als komplette Datenreihe kopiert. Die zehn Messreihen, jeweils für einen Zahn und für eine Spültemperatur, wurden mit LibreOffice Calc (LibreOffice Version: 5.3.7.2 (x64)) in einer Open Document-Tabelle zusammengefasst. In diesen Tabellen erfolgte eine erste Auswertung zur Übersicht der zehn Messreihen. Dabei wurde der Maximalwert und der Minimalwert, die Temperatur 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende sowie die Häufigkeit des Maximalwerts bzw. Minimalwerts durch Programmfunktionen bestimmt. Die Auswertung der Zeit bis zum Erreichen des Maximalwerts bzw. Minimalwerts und der Häufigkeit wurden aufgrund der komplexen Definition des Korridors manuell durchgeführt. Des Weiteren wurde die Restmenge in der Spritze notiert und daraus die Fließrate errechnet. Aus den genannten Daten wurde der Mittelwert, die Standardabweichung und der Median mit der Programmfunktion von LibreOffice errechnet. Die Temperaturverläufe der zehn Messungen wurden jeweils zur Übersicht in einem überlagerten Kurvendiagramm (siehe Beispiele Abb. 6-10) dargestellt.



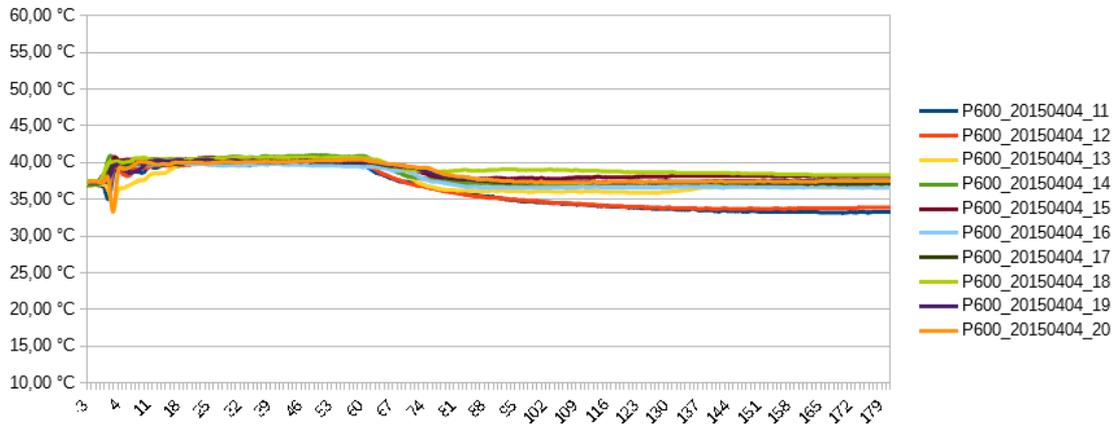
**Abb. 6: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 10 °C Spülung**  
X-Achse: Zeit in Sekunden; Y-Achse: Temperatur in °C



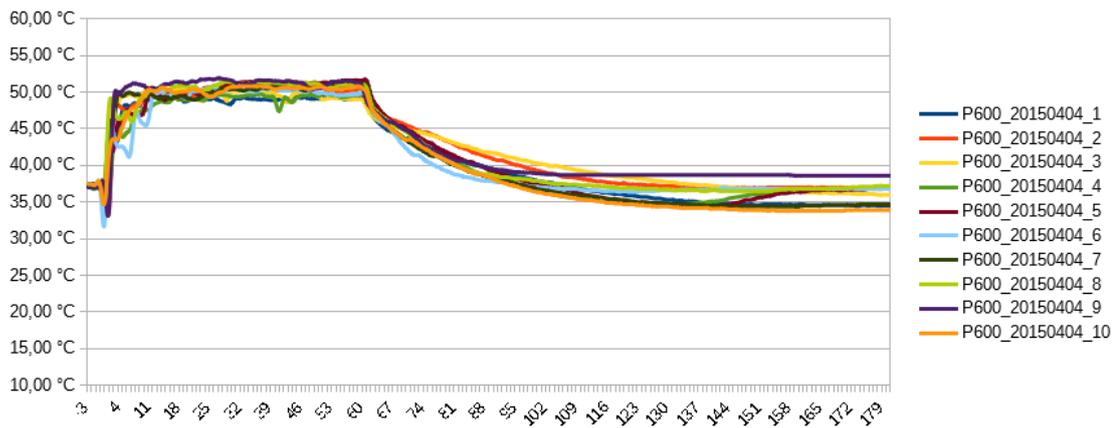
**Abb. 7: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 21 °C Spülung**  
 X-Achse: Zeit in Sekunden; Y-Achse: Temperatur in °C



**Abb. 8: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 37 °C Spülung**  
 X-Achse: Zeit in Sekunden; Y-Achse: Temperatur in °C



**Abb. 9: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 45 °C Spülung**  
 X-Achse: Zeit in Sekunden; Y-Achse: Temperatur in °C



**Abb. 10: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 60 °C Spülung**  
 X-Achse: Zeit in Sekunden; Y-Achse: Temperatur in °C

Die endgültige statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe der Statistiksoftware SPSS (IBM Corp. Released 2018. IBM SPSS Statistics Subscription for Macintosh, Build 1.0.0.1213. Armonk, NY: IBM Corp.).

## **2.6.2 Prüfung auf Normalverteilung**

Zur Auswahl eines adäquaten statischen Tests wurden die Daten auf Normalverteilung geprüft. Dazu erfolgte mit der Statistiksoftware SPSS (IBM Corp. Released 2018. IBM SPSS Statistics Subscription for Macintosh, Build 1.0.0.1213. Armonk, NY: IBM Corp.) die Testung nach Kolmogorov-Smirnov und Shapiro-Wilk (Tabelle 1).

## **2.6.3 Gruppenaufteilung**

Zur Auswertung wurden die Zähne zweimal zu je zwei Gruppen aufgeteilt:

In der ersten Aufteilung wurden die Gruppen nach der apikalen Aufbereitungsgröße gebildet. Somit bestand hier die erste Gruppe aus den Zähnen mit der Aufbereitung 30.04 und 30.06, die zweite Gruppe bestand aus den Zähnen mit der Aufbereitung 40.04 und 40.06. Diese beiden Gruppen wurden jeweils bei den Spültemperaturen 10 °C, 21 °C, 45 °C und 60 °C miteinander verglichen.

In der zweiten Aufteilung erfolgte die Gruppenbildung nach der Aufbereitungskonizität, so dass die Zähne mit der Aufbereitung 30.04 und 40.04 mit den Zähnen der Aufbereitung 30.06 und 40.06 verglichen werden konnten. Auch hier erfolgte der Vergleich jeweils bei den Spültemperaturen 10 °C, 21 °C, 45 °C und 60 °C.

## **2.6.4 Kontrollgruppe**

Von allen Zähnen wurden als Kontrolle sowohl die Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur als auch die Temperaturen 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende bei der Spültemperatur 37 °C jeweils einzeln mit den Spültemperaturen 10 °C, 21 °C, 45 °C und 60 °C verglichen.

## **2.7 Testauswahl**

Sowohl der Kolmogorov-Smirnov Test als auch der Shapiro-Wilk Test zeigten, dass nur beim Maximalwert in der 45 °C Gruppe und bei der Temperatur 2 Minuten nach Spülende in der 21 °C Gruppe kein signifikanter Unterschied ( $p > 0,05$ ) vorlag und die Hypothese einer Normalverteilung, bis auf diese zwei

Ausnahmen, verworfen werden musste (Tabelle 1). Auch die visuelle Beurteilung der Ergebnisse anhand der Histogramme bestätigte keine durchgehende Normalverteilung. Aus diesem Grund wurde zur Auswertung mit dem Mann-Whitney-U-Test ein nicht-parametrischer Test gewählt.

Im Gegensatz zum t-Test, der die Mittelwerte zwischen zwei Gruppen vergleicht, erfolgt beim Mann-Whitney-U-Test die Auswertung durch den Vergleich der Rangsummen zweier Gruppen. Die gemessenen Werte werden aufsteigend sortiert und dadurch Ränge gebildet. Der kleinste Wert erhält den Rang 1. Die Ränge werden danach wieder den beiden Gruppen zugewiesen. Anschließend werden für jede Gruppe die Rangsummen ermittelt. In einer Gruppe mit einer größeren Rangsumme sind somit die höheren Ränge vorhanden, was auch höhere Werte bedeutet. Anhand der Rangsumme werden die beiden Gruppen statistisch verglichen.

Hypothese: Es liegt eine Normalverteilung vor.			
Alternativhypothese: Es liegt keine Normalverteilung vor.			
		Signifikanz	
Temperatur der Spülflüssigkeit in °C		Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>	Shapiro-Wilk
Minimal-/Maximaltemperatur in °C beim Spülvorgang (1-60s)	10 °C	0,000	0,000
	21 °C	0,013	0,000
	45 °C	0,200*	0,274
	60 °C	0,000	0,000
Zeit zum Erreichen der Minimal-/Maximaltemperatur +/- 1 °C	10 °C	0,000	0,000
	21 °C	0,000	0,000
	45 °C	0,000	0,000
	60 °C	0,000	0,000
Anzahl der Zeitpunkte mit einer Temperatur von Minimum/Maximum +/- 1 °C	10 °C	0,001	0,000
	21 °C	0,000	0,000
	45 °C	0,000	0,000
	60 °C	0,000	0,000
Temperatur der Kanalwurzel in °C 1 Minute nach Spülende (120s)	10 °C	0,000	0,000
	21 °C	0,018	0,050
	45 °C	0,000	0,000
	60 °C	0,001	0,000
Temperatur der Kanalwurzel in °C 2 Minuten nach Spülende (180s)	10 °C	0,008	0,000
	21 °C	0,051	0,224
	45 °C	0,000	0,000
	60 °C	0,004	0,000
Häufigkeit der erreichten Maximal- oder Minimaltemperaturen	10 °C	0,000	0,000
	21 °C	0,000	0,000
	45 °C	0,000	0,000
	60 °C	0,000	0,000
*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.			
a. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors			

**Tabelle 1: Test auf Normalverteilung**

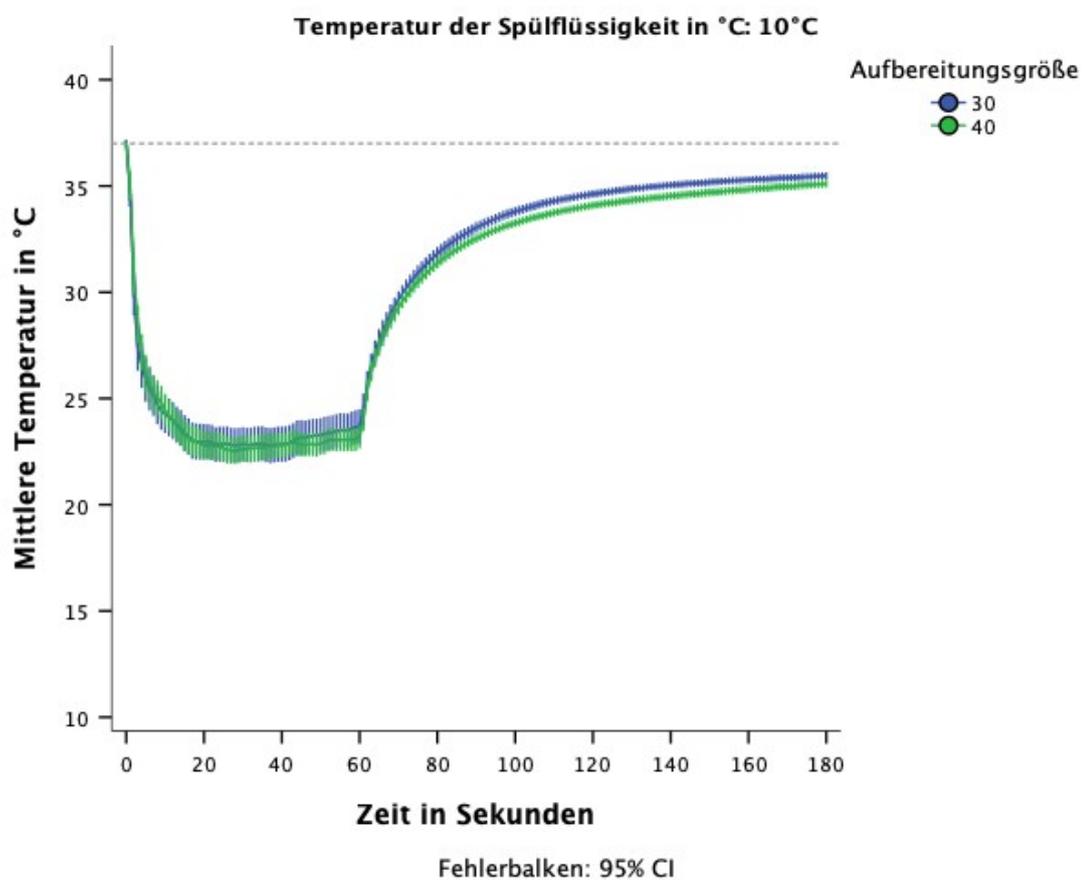
Signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ); nicht signifikante Unterschiede grau hinterlegt

## 3 Ergebnisse

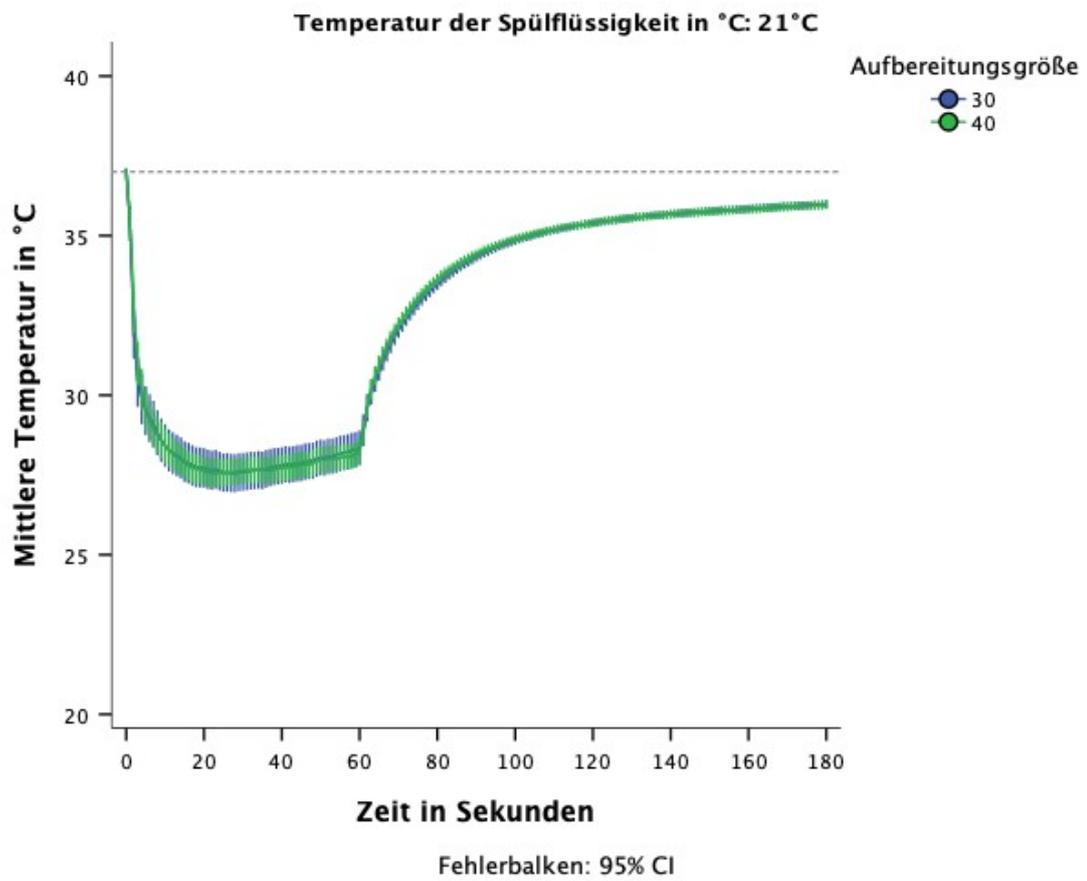
### 3.1 Temperaturverlauf der Gruppen

#### 3.1.1 Temperaturverlauf nach apikaler Aufbereitungsgröße

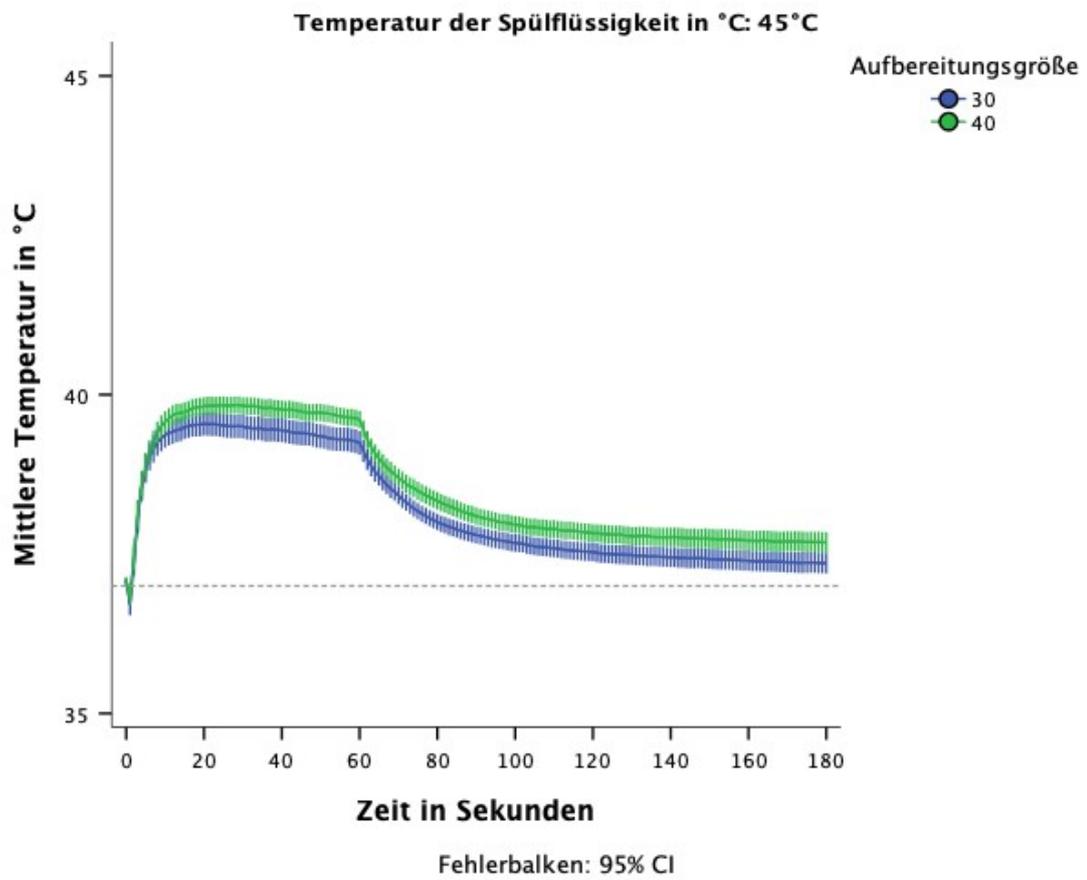
Die Temperaturverläufe der Gruppen mit den apikalen Aufbereitungsgrößen 30 und 40 sind in den folgenden Abbildungen 11 bis 14 dargestellt.



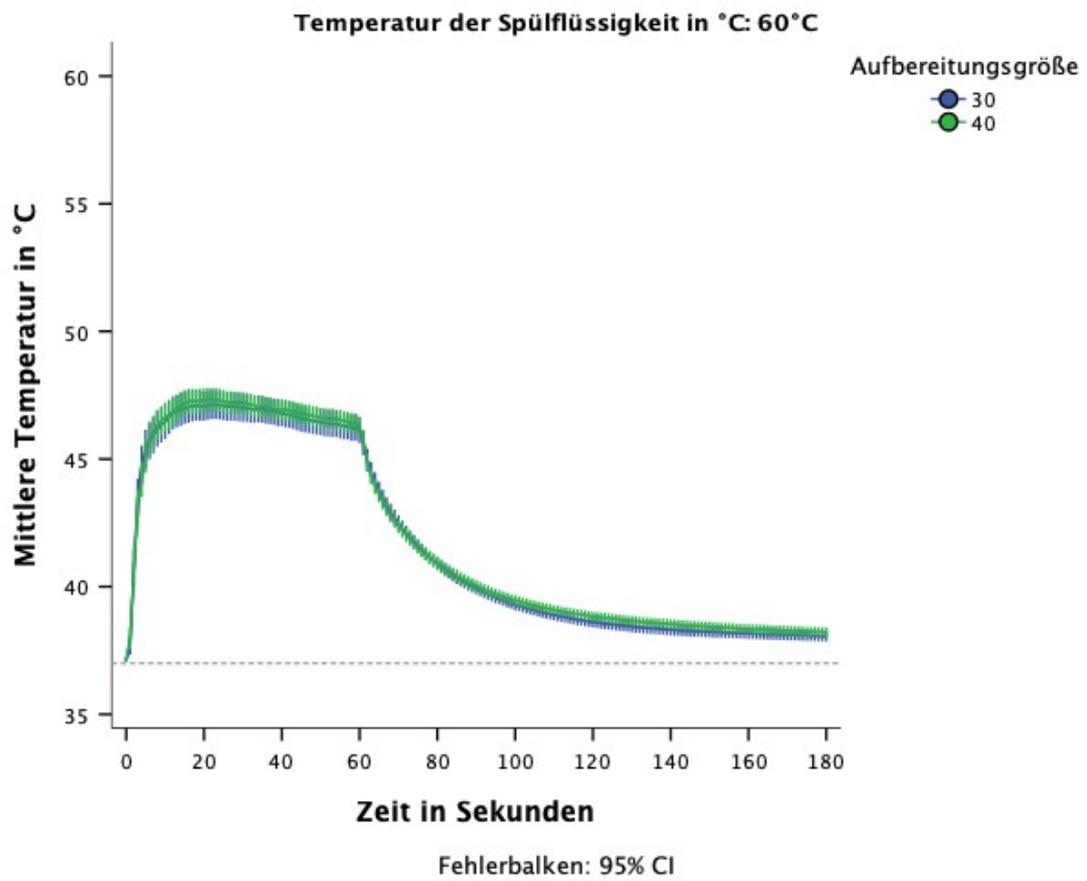
**Abb. 11: Vergleich der apikalen Aufbereitungsgrößen - Temperaturverlauf bei 10 °C Spülung**



**Abb. 12: Vergleich der apikalen Aufbereitungsgrößen - Temperaturverlauf bei 21 °C Spülung**



**Abb. 13: Vergleich der apikalen Aufbereitungsgrößen - Temperaturverlauf bei 45 °C Spülung**



**Abb. 14: Vergleich der apikalen Aufbereitungsgrößen - Temperaturverlauf bei 60 °C Spülung**

### 3.1.2 Temperaturverlauf nach Aufbereitungskonizität

Die Temperaturverläufe der Gruppen mit den Aufbereitungskonizitäten .04 und .06 sind in den folgenden Abbildungen 15 bis 18 dargestellt.

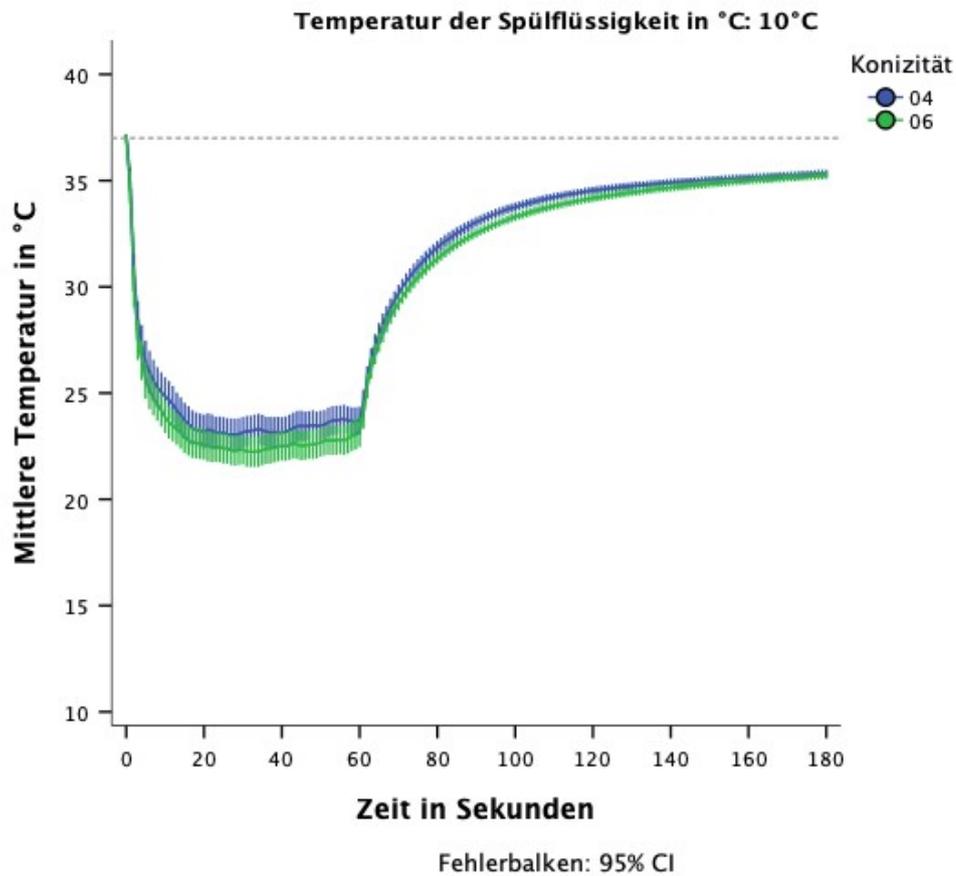
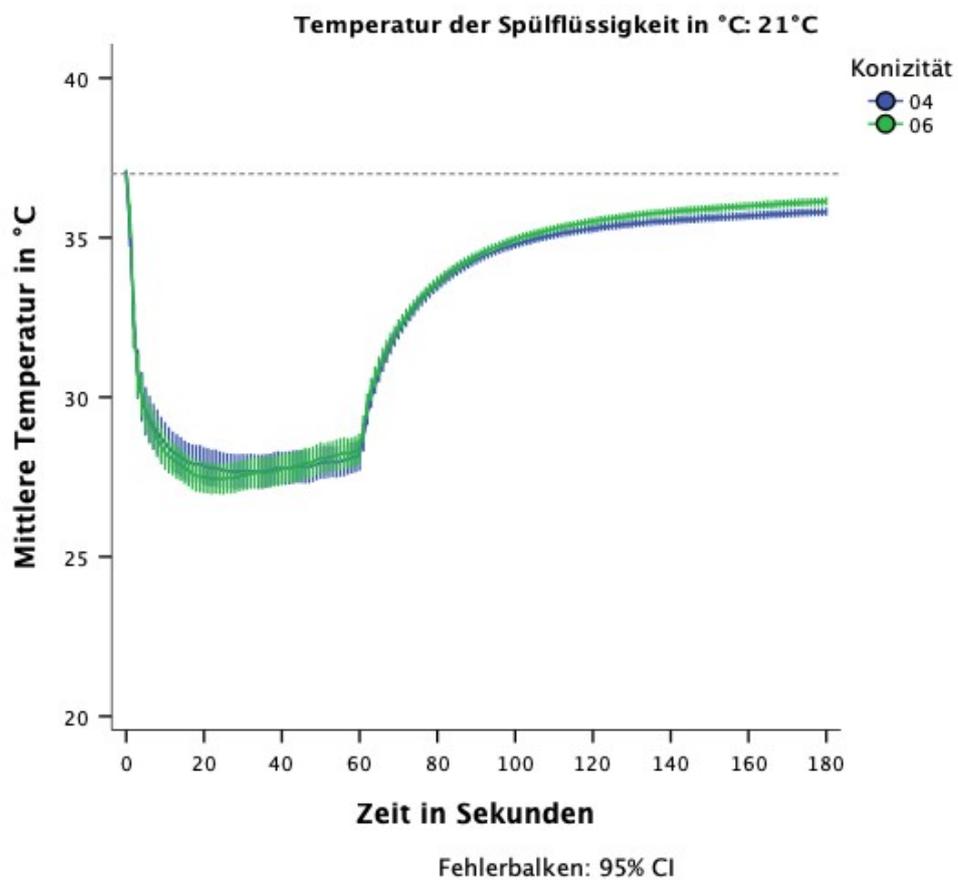
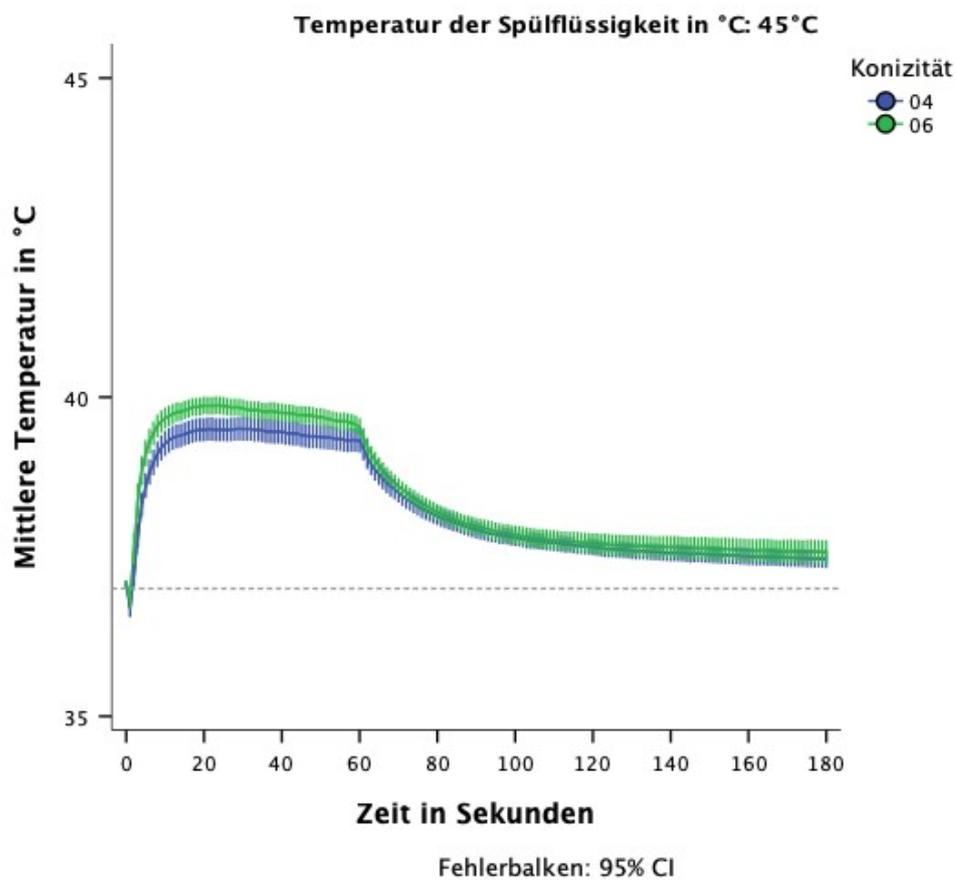


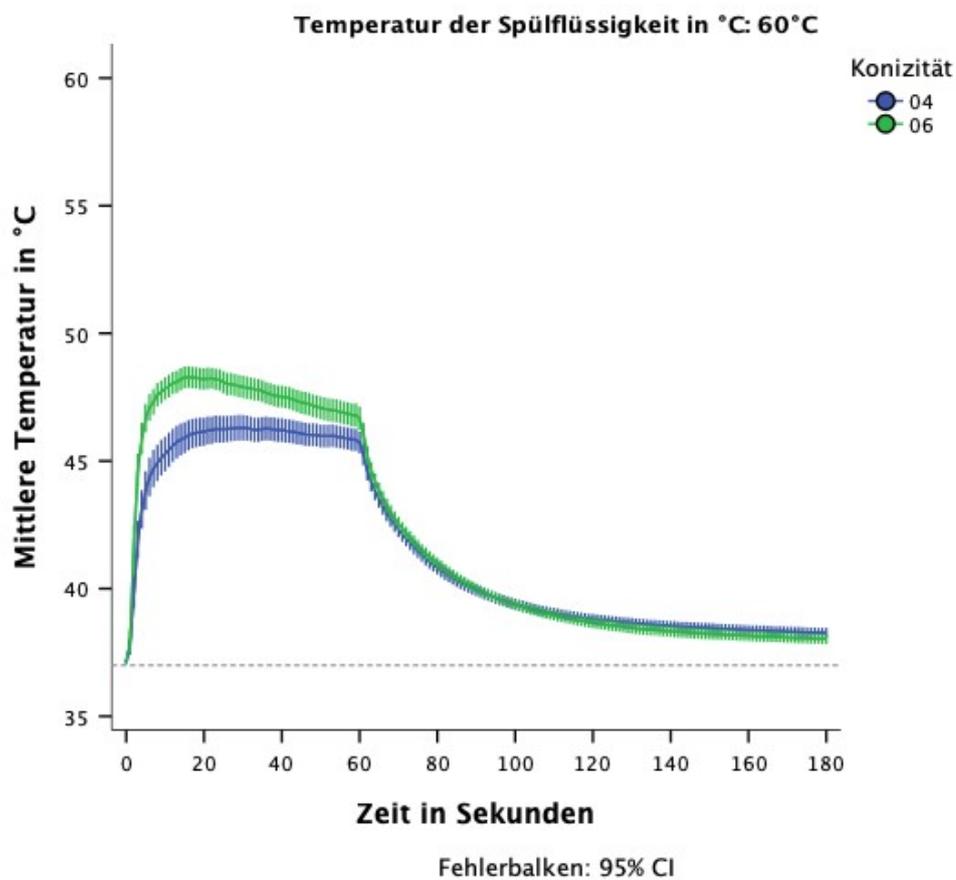
Abb. 15: Vergleich der Aufbereitungskonizitäten - Temperaturverlauf bei 10 °C Spülung



**Abb. 16: Vergleich der Aufbereitungskonizitäten - Temperaturverlauf bei 21 °C Spülung**



**Abb. 17: Vergleich der Aufbereitungskonizitäten - Temperaturverlauf bei 45 °C Spülung**



**Abb. 18: Vergleich der Aufbereitungskonizitäten - Temperaturverlauf bei 60 °C Spülung**

### 3.2 Maximaltemperatur/Minimaltemperatur

Während des Spülvorganges stellte sich bei einer Spülflüssigkeit von 10 °C eine Minimaltemperatur im Mittelwert von 21,12 °C im apikalen Teil des Wurzelkanals ein. Wurde mit einer 21 °C Flüssigkeit gespült, lag die Minimaltemperatur bei 26,82 °C. Es zeigte sich bei Spülung mit gekühlten Flüssigkeiten, dass apikal stärker aufbereitete Zähne mit der Aufbereitungsgröße 40 weniger Temperaturunterschiede zur Anfangstemperatur 37 °C aufwiesen als bei Größe 30. Der Unterschied war bei einer 10 °C Spülflüssigkeit signifikant, bei 21 °C war der Unterschied nicht signifikant. Beim *Taper* wiederum führte eine starke konische Aufbereitung mit .06 auch zu einem größeren Temperaturabfall, der jedoch nicht signifikant war.

Bei Spülung mit erwärmten Flüssigkeiten von 45 °C bzw. 60 °C waren die Mittelwerte der Temperaturen apikal 39,95 °C bzw. 48,00 °C. Bei den erwärmten Spülflüssigkeiten mit 45 °C zeigte sich durchgehend eine signifikant höhere Temperatur am Apex, wenn die Kanäle mit einem *Taper* von .06 oder apikal bis Größe 40 aufbereitet wurden. Bei einer Spülung mit 60 °C stellte sich ebenfalls eine signifikant höhere Temperatur ein, wenn die Kanäle mit einem *Taper* von .06 aufbereitet wurden. Eine größere Aufbereitung führte bei einer 60 °C Spülung zwar auch zu einer Temperatursteigerung am Apex, dieser Unterschied war jedoch nicht signifikant.

Minimaltemperatur/ Maximaltemperatur	Einheit	10 °C		21 °C		45 °C		60 °C	
		Spülflüssigkeit		Spülflüssigkeit		Spülflüssigkeit		Spülflüssigkeit	
			SD		SD		SD		SD
Mittelwert gesamt <sup>a</sup>	[°C]	21,12		26,82		39,95		48,00	

Mittelwert ISO30 <sup>b</sup>	[°C]	20,84	±4,35	26,78	±3,20	39,80	±1,01	47,96	±2,87
Mittelwert ISO40 <sup>b</sup>	[°C]	21,39	±3,47	26,87	±2,36	40,11	±0,77	48,04	±2,32
p bei ISO30/ISO40 <sup>b</sup>		0,007		0,302		0,008		0,907	

Mittelwert <i>Taper</i> .04 <sup>c</sup>	[°C]	21,13	±4,35	26,85	±3,05	39,78	±1,00	47,17	±2,72
Mittelwert <i>Taper</i> .06 <sup>c</sup>	[°C]	21,10	±3,78	26,79	±2,56	40,13	±0,77	48,82	±2,21
p bei <i>Taper</i> .04/.06 <sup>c</sup>		0,445		0,888		0,004		0,000	

**Tabelle 2: Minimaltemperatur/Maximaltemperatur**

SD = Standardabweichung; signifikante Unterschiede (p<0,05) grau hinterlegt

<sup>a</sup> Es wurden die Mittelwerte aus der Gesamtzahl der Zähne (n=24) mit den jeweils zehn Spülungen pro Zahn gebildet.

<sup>b</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit der apikalen Aufbereitung ISO 30 (n=12) und ISO 40 (n=12) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

<sup>c</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit Aufbereitung *Taper* .04 (n=12) und *Taper* .06 (n=12) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

### 3.3 Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur/ Minimaltemperatur

Bei den Zeiten bis zum Eintritt des Korridors bei der Minimaltemperatur plus 1 °C bzw. bei der Maximaltemperatur minus 1 °C konnten signifikante Unterschiede zwischen den Aufbereitungsformen nur in der 45 °C-Gruppe beim Vergleich der Aufbereitungsgrößen und in der 60 °C-Gruppe beim Vergleich der *Taper* festgestellt werden. In allen anderen Gruppen gab es keinen signifikanten Unterschied in Bezug auf die Aufbereitungsgröße oder dem *Taper*. Allgemein wurde beobachtet, dass bei leicht abgekühlten bzw. leicht erwärmten Spülflüssigkeiten der Korridor klinisch signifikant schneller erreicht wurde als bei stark abgekühlten bzw. stark erwärmten Spülflüssigkeiten.

Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur/ Minimaltemperatur	Einheit	10 °C Spülflüssigkeit		21 °C Spülflüssigkeit		45 °C Spülflüssigkeit		60 °C Spülflüssigkeit	
			SD		SD		SD		SD
Mittelwert gesamt <sup>a</sup>	[s]	24,73		16,63		6,15		14,75	

Mittelwert ISO30 <sup>b</sup>	[s]	24,93	±13,60	16,63	±11,96	5,72	±6,45	14,93	±11,42
Mittelwert ISO40 <sup>b</sup>	[s]	24,53	±13,70	16,62	±12,12	6,58	±3,59	14,57	±11,20
p bei ISO30/ISO40 <sup>b</sup>		0,726		0,871		0,001		0,838	

Mittelwert <i>Taper</i> .04 <sup>c</sup>	[s]	24,51	±13,92	17,56	±13,36	6,45	±6,02	17,93	±12,72
Mittelwert <i>Taper</i> .06 <sup>c</sup>	[s]	24,95	±13,37	15,69	±10,47	5,85	±4,29	11,56	±8,58
p bei <i>Taper</i> .04/.06 <sup>c</sup>		0,743		0,719		0,340		0,000	

**Tabelle 3: Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur/Minimaltemperatur**

SD = Standardabweichung; signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) grau hinterlegt

<sup>a</sup> Es wurden die Mittelwerte aus der Gesamtzahl der Zähne ( $n=24$ ) mit den jeweils zehn Spülungen pro Zahn gebildet.

<sup>b</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit der apikalen Aufbereitung ISO 30 ( $n=12$ ) und ISO 40 ( $n=12$ ) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

<sup>c</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit Aufbereitung *Taper* .04 ( $n=12$ ) und *Taper* .06 ( $n=12$ ) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

### 3.4 Haltezeit

Die Größe und der *Taper* der Aufbereitung hatten bis auf zwei Ausnahmen keinen signifikanten Einfluss auf die Haltezeit im 1 °C Korridor um den Maximalwert bzw. Minimalwert. Die signifikanten Unterschiede stellten sich beim Vergleich der Aufbereitungsgrößen bei einer Spültemperatur von 10 °C und im Vergleich der *Taper* bei 45 °C Spültemperatur dar.

Allgemein wurde beobachtet, dass bei leicht abgekühlten bzw. leicht erwärmten Spülflüssigkeiten die Temperatur klinisch signifikant länger im 1 °C Korridor gehalten wurde als bei stark abgekühlten bzw. stark erwärmten Spülflüssigkeiten.

Haltezeit	Einheit	10 °C		21 °C		45 °C		60 °C	
		Spülflüssigkeit	SD	Spülflüssigkeit	SD	Spülflüssigkeit	SD	Spülflüssigkeit	SD
Mittelwert gesamt <sup>a</sup>	[s]	22,62		35,16		71,50		32,76	

Mittelwert ISO30 <sup>b</sup>	[s]	20,64	±13,10	33,31	±14,74	76,99	±40,92	31,98	±13,38
Mittelwert ISO40 <sup>b</sup>	[s]	24,59	±11,63	37,02	±13,19	66,01	±22,76	33,54	±13,19
p bei ISO30/ISO40 <sup>b</sup>		0,010		0,057		0,652		0,404	

Mittelwert Taper .04 <sup>c</sup>	[s]	21,74	±13,40	34,93	±13,65	78,48	±40,62	33,53	±13,32
Mittelwert Taper .06 <sup>c</sup>	[s]	23,49	±11,55	35,39	±14,55	64,53	±22,47	31,98	±13,26
p bei Taper .04/.06 <sup>c</sup>		0,229		0,615		0,002		0,396	

**Tabelle 4: Haltezeit**

SD = Standardabweichung; signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) grau hinterlegt

<sup>a</sup> Es wurden die Mittelwerte aus der Gesamtzahl der Zähne ( $n=24$ ) mit den jeweils zehn Spülungen pro Zahn gebildet.

<sup>b</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit der apikalen Aufbereitung ISO 30 ( $n=12$ ) und ISO 40 ( $n=12$ ) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

<sup>c</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit Aufbereitung Taper .04 ( $n=12$ ) und Taper .06 ( $n=12$ ) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

### 3.5 Temperatur 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende

Nach den Spülvorgängen mit 10 °C; 21 °C; 45 °C und 60 °C zeigten sich 1 Minute nach Spülende Temperaturen im Mittelwert von 34,35 °C; 35,40 °C; 37,68 °C und 38,73 °C. Nach 2 Minuten lagen die Temperaturen bei 35,29 °C; 35,98 °C; 37,52 °C und 38,14 °C. Die Mittelwerte der Temperaturen bei den verschiedenen Aufbereitungsformen 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende lagen mit einer maximalen Differenz von 0,53 °C jeweils recht eng beieinander. Den größten Unterschied gab es 1 Minute nach Spülende bei 10 °C Spültemperatur zwischen der Aufbereitungsgröße 30 mit 34,62 °C und der Aufbereitungsgröße 40 mit 34,09 °C.

Im Gegensatz zu der reinen Betrachtung der Mittelwerte zeigte die statistische Auswertung mehrere signifikante Unterschiede. Insbesondere bei den

abgekühlten Spülflüssigkeiten stellten sich überwiegende statistisch signifikante Unterschiede dar. Nur bei 21 °C konnte 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende kein signifikanter Unterschied zwischen den Aufbereitungsgrößen festgestellt werden. Außerdem war bei 10 °C 2 Minuten nach Spülende der Unterschied zwischen den *Tapern* nicht signifikant.

Bei Spülung mit erwärmten Spülflüssigkeiten dagegen war der Unterschied beim Vergleich der Aufbereitungsgrößen und der *Taper* bis auf eine Ausnahme nicht signifikant. Nur in der 45 °C Gruppe beim Vergleich der Aufbereitungsgrößen gab es einen signifikanten Unterschied im Abkühlverhalten der erwärmten Spülflüssigkeiten.

Temperatur 1 Minute nach Spülende	Einheit	10 °C Spülflüssigkeit		21 °C Spülflüssigkeit		45 °C Spülflüssigkeit		60 °C Spülflüssigkeit	
			SD		SD		SD		SD
Mittelwert gesamt <sup>a</sup>	[°C]	34,35		35,40		37,68		38,73	

Mittelwert ISO30 <sup>b</sup>	[°C]	34,62	±1,00	35,40	±0,68	37,53	±0,80	38,62	±1,20
Mittelwert ISO40 <sup>b</sup>	[°C]	34,09	±0,99	35,40	±0,72	37,83	±0,78	38,84	±0,99
p bei ISO30/ISO40 <sup>b</sup>		0,000		0,904		0,001		0,316	

Mittelwert <i>Taper</i> .04 <sup>c</sup>	[°C]	34,53	±1,00	35,28	±0,70	37,65	±0,71	38,81	±1,08
Mittelwert <i>Taper</i> .06 <sup>c</sup>	[°C]	34,18	±1,03	35,51	±0,68	37,71	±0,89	38,65	±1,13
p bei <i>Taper</i> .04/.06 <sup>c</sup>		0,011		0,024		0,120		0,359	

**Tabelle 5: Temperatur 1 Minute nach Spülende**

SD = Standardabweichung; signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) grau hinterlegt

<sup>a</sup> Es wurden die Mittelwerte aus der Gesamtzahl der Zähne ( $n=24$ ) mit den jeweils zehn Spülungen pro Zahn gebildet.

<sup>b</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit der apikalen Aufbereitung ISO 30 ( $n=12$ ) und ISO 40 ( $n=12$ ) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

<sup>c</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit Aufbereitung *Taper* .04 ( $n=12$ ) und *Taper* .06 ( $n=12$ ) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

Temperatur 2 Minuten nach Spülende	Einheit	10 °C Spülflüssigkeit		21 °C Spülflüssigkeit		45 °C Spülflüssigkeit		60 °C Spülflüssigkeit	
			SD		SD		SD		SD
Mittelwert gesamt <sup>a</sup>	[°C]	35,29		35,98		37,52		38,14	

Mittelwert ISO30 <sup>b</sup>	[°C]	35,48	±0,94	35,98	±0,72	37,36	±0,89	38,07	±1,17
Mittelwert ISO40 <sup>b</sup>	[°C]	35,10	±1,01	35,97	±0,75	37,68	±0,91	38,22	±1,04
p bei ISO30/ISO40 <sup>b</sup>		0,002		0,994		0,001		0,408	

Mittelwert <i>Taper</i> .04 <sup>c</sup>	[°C]	35,33	±0,99	35,81	±0,72	37,46	±0,78	38,26	±1,11
Mittelwert <i>Taper</i> .06 <sup>c</sup>	[°C]	35,25	±1,00	36,14	±0,72	37,57	±1,03	38,02	±1,09
p bei <i>Taper</i> .04/.06 <sup>c</sup>		0,462		0,004		0,098		0,087	

**Tabelle 6: Temperatur 2 Minuten nach Spülende**

SD = Standardabweichung; signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) grau hinterlegt

<sup>a</sup> Es wurden die Mittelwerte aus der Gesamtzahl der Zähne ( $n=24$ ) mit den jeweils zehn Spülungen pro Zahn gebildet.

<sup>b</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit der apikalen Aufbereitung ISO 30 ( $n=12$ ) und ISO 40 ( $n=12$ ) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

<sup>c</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit Aufbereitung *Taper* .04 ( $n=12$ ) und *Taper* .06 ( $n=12$ ) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

### 3.6 Häufigkeit der Maximaltemperatur/Minimaltemperatur

Insgesamt wurde die Minimaltemperatur bzw. die Maximaltemperatur circa zwei Mal (Mittelwert = 2,159 Mal) während des Spülvorganges erreicht.

Durchgehend stellte sich bei den Mittelwerten dar, dass der Minimalwert bzw. Maximalwert häufiger erreicht wurde, wenn die Zähne mit einer apikalen Größe 40 oder einem *Taper* .06 aufbereitet wurden als mit einer apikalen Größe 30 oder mit einem *Taper* .04. Statistisch war dieser Unterschied bei den erwärmten Spülflüssigkeiten nicht signifikant. Bei den abgekühlten Spülflüssigkeiten zeigte sich im Vergleich der *Taper* ein signifikanter Unterschied. Beim Vergleich der Aufbereitungsgrößen gab es dagegen nur einen signifikanten Unterschied bei 10 °C Spültemperatur.

Häufigkeit Maximal-/ Minimaltemperatur	Einheit	10 °C		21 °C		45 °C		60 °C	
		Spülflüssigkeit	SD	Spülflüssigkeit	SD	Spülflüssigkeit	SD	Spülflüssigkeit	SD
Mittelwert gesamt <sup>a</sup>		2,47		2,25		2,77		3,31	

Mittelwert ISO30 <sup>b</sup>		2,28	±1,33	2,08	±1,34	2,63	±1,57	3,27	±1,44
Mittelwert ISO40 <sup>b</sup>		2,66	±1,54	2,43	±1,61	2,91	±1,67	3,34	±1,46
p bei ISO30/ISO40 <sup>b</sup>		0,049		0,123		0,064		0,732	

Mittelwert <i>Taper</i> .04 <sup>c</sup>		2,22	±1,39	1,93	±1,32	2,75	±1,55	3,28	±1,43
Mittelwert <i>Taper</i> .06 <sup>c</sup>		2,72	±1,47	2,57	±1,58	2,79	±1,69	3,33	±1,47
p bei <i>Taper</i> .04/.06 <sup>c</sup>		0,002		0,000		0,806		0,858	

**Tabelle 7: Häufigkeit Maximaltemperatur/Minimaltemperatur**

SD = Standardabweichung; signifikante Unterschiede (p<0,05) grau hinterlegt

<sup>a</sup> Es wurden die Mittelwerte aus der Gesamtzahl der Zähne (n=24) mit den jeweils zehn Spülungen pro Zahn gebildet.

<sup>b</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit der apikalen Aufbereitung ISO 30 (n=12) und ISO 40 (n=12) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

<sup>c</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit Aufbereitung *Taper* .04 (n=12) und *Taper* .06 (n=12) die Mittelwerte gebildet. Die beiden Gruppen wurden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen.

### 3.7 Kontrollgruppe

Die Kontrollgruppe mit 37 °C temperierter Flüssigkeit zeigte sowohl während als auch nach Ende des Spülvorganges signifikante Unterschiede (p<0,001) zu den Gruppen der restlichen temperierten Spülflüssigkeiten.

### 3.8 Fließrate

Über alle Zähne betrug der Mittelwert der Fließrate 2,78 ml/min. Bei den erwärmten Spülflüssigkeiten war die Fließrate mit 2,91 ml/min und 2,95 ml/min höher als bei den abgekühlten Flüssigkeiten und in der Kontrollgruppe. Die Unterschiede in der Fließrate waren zwischen den Aufbereitungsformen klinisch nicht signifikant.

Fließrate	Einheit	10 °C	21 °C	37 °C	45 °C	60 °C	Spülungen gesamt
Mittelwert gesamt <sup>a</sup>	[ml/min]	2,78	2,56	2,72	2,91	2,95	2,78
Mittelwert ISO30 <sup>b</sup>	[ml/min]	2,70	2,42	2,59	3,03	2,95	2,74
Mittelwert ISO40 <sup>b</sup>	[ml/min]	2,86	2,69	2,86	2,79	2,96	2,83
Mittelwert <i>Taper</i> .04 <sup>c</sup>	[ml/min]	2,77	2,56	2,78	3,12	3,07	2,86
Mittelwert <i>Taper</i> .06 <sup>c</sup>	[ml/min]	2,78	2,56	2,67	2,70	2,83	2,71

**Tabelle 8: Fließrate**

Die Fließrate wurde für jede Gruppe der Spültemperatur 10°C, 21°C, 37°C, 45°C, 60°C und für alle Spülungen der Temperaturgruppen zusammen bestimmt.

<sup>a</sup> Es wurden die Mittelwerte aus der Gesamtzahl der Zähne (n=24) mit den jeweils zehn Spülungen pro Zahn gebildet.

<sup>b</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit der apikalen Aufbereitung ISO 30 (n=12) und ISO 40 (n=12) die Mittelwerte gebildet.

<sup>c</sup> Es wurden jeweils für die Gruppen mit Aufbereitung *Taper* .04 (n=12) und *Taper* .06 (n=12) die Mittelwerte gebildet.

### 3.9 Zusammenfassung der Unterschiede im Temperaturverlauf

Die statistischen Unterschiede während des Spülvorganges aus Kapitel 3.2 und nach dem Spülvorgang aus Kapitel 3.5 wurden zur besseren Übersicht in den folgenden Unterkapiteln zusammengefasst. Es zeigte sich für die Gruppeneinteilung nach Aufbereitungsgröße ein anderes Muster als bei der Aufbereitungskonizität. Bei der Betrachtung der Aufbereitungskonizität erfolgte eine Darstellung für die Abkühlphasen und eine Darstellung für die Aufwärmphasen. Zu den Abkühlphasen gehört sowohl die Spülung mit abgekühlten Spülflüssigkeiten als auch die Zeit nach der Spülung mit erwärmter Flüssigkeit, in der die Temperatur im Wurzelkanal durch die Umgebung auf die Ausgangstemperatur wieder herunter gekühlt wird. Dementsprechend umfasst die Aufwärmphase den Spülvorgang mit erwärmter Lösung und die Erwärmung durch Umgebungstemperatur nach einer Spülung mit abgekühlter Flüssigkeit.

### 3.9.1 Isolierte Darstellung der apikalen Aufbereitungsgröße

Betrachtet man die Gruppen nach ihrer apikalen Aufbereitungsgröße, stellt sich durchgehend für 10 °C und 45 °C ein signifikanter Unterschied zwischen Größe 30 und 40 sowohl bei der Minimaltemperatur bzw. Maximaltemperatur während des Spülvorganges als auch in der Zeit nach Spülende dar. Bei Spültemperaturen von 21 °C und 60 °C waren diese Unterschiede dagegen durchgehend nicht signifikant.

		10 °C	21 °C	45 °C	60 °C
Minimaltemperatur/ Maximaltemperatur	Größe 30/40	0,007	0,302	0,008	0,907
	<i>Taper</i> .04/.06				
Temperatur 1 Minute nach Spülende	Größe 30/40	0,000	0,904	0,001	0,316
	<i>Taper</i> .04/.06				
Temperatur 2 Minuten nach Spülende	Größe 30/40	0,002	0,994	0,001	0,408
	<i>Taper</i> .04/.06				

**Tabelle 9: Isolierte Darstellung der Unterschiede bei den apikalen Aufbereitungsgrößen**

Signifikanz.  $p < 0,05$  Signifikanter Unterschied grün hinterlegt;  $p > 0,05$  kein signifikanter Unterschied in rot hinterlegt

### 3.9.2 Isolierte Darstellung der Aufbereitungskonizität

Beim Vergleich der *Taper* stellten sich die Unterschiede im Temperaturverlauf einer Spültemperatur uneinheitlich dar. Betrachtet man die oben beschriebene Abkühlphase, so waren die Unterschiede durchgehend nicht signifikant. In der Aufwärmphase waren die Unterschiede dagegen, bis auf eine Ausnahme bei 10 °C 2 Minuten nach Spülende, signifikant.

		10 °C	21 °C	45 °C	60 °C
Minimaltemperatur/ Maximaltemperatur	Größe 30/40				
	<i>Taper</i> .04/.06	0,445	0,888		
Temperatur 1 Minute nach Spülende	Größe 30/40				
	<i>Taper</i> .04/.06			0,120	0,359
Temperatur 2 Minuten nach Spülende	Größe 30/40				
	<i>Taper</i> .04/.06			0,098	0,087

**Tabelle 10: Isolierte Darstellung der Unterschiede bei den Aufbereitungskonizitäten in der Abkühlphase**

Signifikanz.  $p < 0,05$  Signifikanter Unterschied grün hinterlegt;  $p > 0,05$  kein signifikanter Unterschied in rot hinterlegt

		10 °C	21 °C	45 °C	60 °C
Minimaltemperatur/ Maximaltemperatur	Größe 30/40				
	<i>Taper</i> .04/.06			0,004	0,000
Temperatur 1 Minute nach Spülende	Größe 30/40				
	<i>Taper</i> .04/.06	0,011	0,024		
Temperatur 2 Minuten nach Spülende	Größe 30/40				
	<i>Taper</i> .04/.06	0,462	0,004		

**Tabelle 11: Isolierte Darstellung der Unterschiede bei den Aufbereitungskonizitäten in der Aufwärmphase**

Signifikanz.  $p < 0,05$  Signifikanter Unterschied grün hinterlegt;  $p > 0,05$  kein signifikanter Unterschied in rot hinterlegt

## 4 Diskussion

Die Spüllösung Natriumhypochlorit hat sich aufgrund ihrer desinfizierenden und gewebeauflösenden Eigenschaften etabliert (7). Diese beiden Eigenschaften lassen sich durch Erwärmung verstärken. Welche Auswirkungen die Spülung mit erwärmter Flüssigkeit auf die Temperatur im Wurzelkanal hat, ist wenig untersucht (62–64). Der Einfluss der Aufbereitungsform auf das Temperaturverhalten des Spülprozesses im Wurzelkanal wurde bisher noch nicht beachtet. Es ist bekannt, dass die Aufbereitung einen Einfluss auf die Desinfektion des Wurzelkanalsystems hat (73,74,76,77,79–82). Dies rührt zum einen daher, dass durch die mechanische Bearbeitung selbst schon Bakterien entfernt werden (74,76,77). Zum anderen beeinflusst die Aufbereitung den Spülprozess, so dass die Kanüle tiefer eingeführt werden kann und ein besserer Flüssigkeitsaustausch erfolgt (85,86). Mit der vorliegenden Studie sollte untersucht werden, ob die Aufbereitungsform auch Einfluss auf das Temperaturverhalten im Wurzelkanal hat und damit die positiven Eigenschaften von erwärmtem Natriumhypochlorit verstärkt werden können.

### 4.1 Versuchsaufbau

Es wurden von 24 natürlichen Unterkieferfrontzähnen die Wurzelkanäle in vier Gruppen mit 30.04, 30.06, 40.04 und 40.06 aufbereitet und mit Wasser unterschiedlicher Temperatur gespült. Nach einer Pilotstudie von Macedo et al. (64) besteht dabei kein Unterschied zwischen Wasser und 2-prozentigem Natriumhypochlorit. Die konstante Körpertemperatur wurde mit einem Inkubator bei 37 °C simuliert. Luft hat mit  $\lambda=0,0261 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  eine geringe Wärmeleitfähigkeit, die sich vom menschlichen Gewebe stark unterscheidet [kortikaler Knochen  $\lambda=0,68 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (100); Knochenmark  $\lambda=0,42 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (100); Zahn  $\lambda=0,65 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (101); wasserhaltiges Weichgewebe  $\lambda=0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (101), Blut  $\lambda=0,62 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (101)]. Macedo et al. (64) benutzten ein Wasserbad und Donnermeyer et al. (102) betteten die Zähne in Alginat ein, um die Wärmeleitfähigkeit im Körper nachzubilden. In der vorliegenden Studie wurde Gips gewählt, Gips hat eine Wärmeleitfähigkeit [ $\lambda=0,51 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] (103), die ungefähr dem Mittelwert der Wärmeleitfähigkeiten der knöchernen Region eines

Zahnes entspricht. Der Zahn konnte damit auch sicher und wackelfrei für den Spülvorgang fixiert werden. Um den klinischen Spülablauf möglichst genau nachzustellen, wurde der Zahn mit einem Kofferdam isoliert und die austretende Flüssigkeit abgesaugt, so dass nichts an der Außenfläche herunterlaufen und dadurch die Temperatur am Messfühler verfälschen konnte. Zusätzlich wurde nur über eine kleine Öffnung in der Tür des Inkubators gespült, die damit die Mundöffnung nachahmte. Die Spülkanüle wurde 1 mm vor den Messfühler platziert. Dies entspricht der Forderung aus den Untersuchungen von Boutsoukis et al. (94) und Sedgley et al. (95). In der vorliegenden Studie wurden Unterkieferfrontzähne verwendet, da diese Zähne zu circa zwei Drittel einen geraden Kanalverlauf (104) und im Vergleich zu Oberkieferfrontzähnen einen kleineren Kanaldurchmesser (105) aufweisen. Somit sollte sichergestellt werden, dass die Aufbereitung in jeder Gruppe zu einem Substanzabtrag und entsprechender Ausformung führte. 40 % der mittleren und 37 % der seitlichen Unterkieferfrontzähne weisen einen zweiten Kanal in unterschiedlicher Konfiguration auf (104). Dies wurde durch Röntgenaufnahmen aus zwei Ebenen bei den verwendeten Zähnen möglichst ausgeschlossen. Ausgewählt wurden Zähne, die einen geraden Wurzelkanal aufwiesen. Bei gekrümmten Wurzelkanälen ist ein so tiefes Einführen der Spülkanüle unter Umständen nicht mehr immer möglich. Das Verschieben der Spülkanüle wird bei stark gekrümmten Kanälen erschwert, wenn die Aufbereitung kleiner und weniger konisch erfolgt. In diesen Fällen ist somit zu erwarten, dass die verschiedenen Aufbereitungsformen sich mit dieser Eindringtiefe 1 mm vor dem Messfühler nicht mehr vergleichen lassen. Da eine weiter koronal platzierte Spülkanüle zu einem geringem Flüssigkeitsdruck am Apex führt (94), kann auch davon ausgegangen werden, dass dies zu anderen Ergebnissen führen würde. Bei leicht gekrümmten Wurzelkanälen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Spülkanüle wie in der vorliegende Studie 1 mm vor dem Messfühler eingeführt werden kann und ähnliche Ergebnisse zu erwarten wären. Um Aussagen über die Temperaturveränderungen bei unterschiedlichen Kanalkrümmungen und Eindringtiefen der Spülkanüle treffen zu können, sind jedoch separate Untersuchungen notwendig.

## 4.2 Versuchsablauf

Die konstante Umgebungstemperatur wurde zwar mit einem Inkubator sichergestellt, jedoch erfolgte der Spülvorgang erst, wenn auch die intrakanaläre Messsonde eine Temperatur von  $37\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$  anzeigte. Um zu gewährleisten, dass diese Starttemperatur nicht gerade innerhalb eines Temperaturanstiegs oder Temperaturabfalls bestand, wurde auch die Zeit bis 3 Sekunden vor Spülbeginn beobachtet. Die Festlegung auf einen Spülbeginn bei genau  $37\text{ °C}$  ist aufgrund der üblichen Schwankungen auch in einem geschlossenen System nicht realistisch. Eine Starttemperatur von  $37\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$  stellte sich als praktikabel dar. Jedoch muss damit auch berücksichtigt werden, dass sich die Starttemperaturen im Extremfall um  $1\text{ °C}$  unterscheiden können, wenn in einem Fall bei  $36,5\text{ °C}$  und in einem anderen Fall bei  $37,5\text{ °C}$  mit dem Spülvorgang begonnen wurde.

Die Spülflüssigkeit wurde auf die entsprechende Temperatur mit einem Wasserbad erwärmt oder mit Hilfe eines Eiswasserbades abgekühlt. Die Kontrolle der Temperatur erfolgte mit einem geeichten Taschenthermometer. Erst dann wurde die Flüssigkeit in die Spritze aufgezogen und gespült. Macedo et al. (64) befestigten eine Messsonde in der Spritze, so dass sie auch dort die Temperatur beobachten konnten. In ihrer Veröffentlichung merkten sie an, dass die Temperatur innerhalb weniger Minuten von  $60\text{ °C}$  auf  $45\text{ °C}$  in der Spritze abkühlte. Eine konkrete Zeit geben sie nicht an, sondern nur eine exponentielle Funktion für den Temperaturabfall. Aus den Kurven der Veröffentlichung lässt sich ablesen, dass die Temperatur in der Spritze bei einer  $60\text{ °C}$  Spülung nach einer Minute noch  $55\text{ °C}$  betrug und bei einer  $45\text{ °C}$  Spülung können  $41\text{ °C}$  abgelesen werden. Die Temperaturveränderung in der Spritze wurden in der vorliegenden Studie nicht weiter verfolgt. Da immer sofort nach dem Aufziehen der Spritze gespült wurde, kann von einer gleichen Ausgangslage für jeden Spülvorgang ausgegangen werden. Die Ergebnisse von Macedo et al. (64) dürften sich auf diese Untersuchung jedoch übertragen lassen. Dies widerspricht auch nicht den Gegebenheiten am Patienten, denn ein Temperaturabfall in dieser Form liegt auch bei einer *in vivo* Behandlung vor. Allerdings ist hier dem Praktiker der Hinweis zu geben, dass der Spülprozess wirklich unmittelbar eingeleitet werden sollte, da eine Verzögerung bei

Raumtemperatur unter Umständen zu einer deutlich geringeren Spültemperatur führen kann. Für die Spülungen mit temperierten Flüssigkeiten kann man allerdings erwarten, dass die Maximalwerte und die Minimalwerte jeweils in der Anfangsphase nach Spülbeginn erreicht werden, da während des Spülvorganges die Temperatur in der Spritze sich der Raumtemperatur immer weiter nähert. Je länger der Spülprozess dauert, um so unwahrscheinlicher wird es, dass noch ein neuer Maximalwert oder Minimalwert erzeugt wird.

In den Untersuchungen von Macedo et al. (64) und de Hemptinne et al. (63) wurde die Spüllösung jeweils in der aufgezogenen Spritze in einem Wasserbad erwärmt. Dies entspricht auch dem empfohlenen und üblichen Vorgehen (106) für die Anwendung von erwärmtem Natriumhypochlorit als Spüllösung in der Praxis. Jedoch ist so keine Kontrolle über die Temperatur in der Spritze möglich, wenn nicht wie bei Macedo et al. (64) eine Messsonde in der Spritze befestigt ist. Außerdem kann so auch nicht gewährleistet werden, dass die Temperatur in der Spritze gleichmäßig vorliegt. Aus diesem Grund wurde das Wasser im Warmwasserbad und im Eiswasserbad vor der Entnahme ständig verrührt, damit eine gleichmäßige Temperatur vorhanden war. Dies sollte den Idealfall abbilden, dass die Spritze ausreichend lang erwärmt wurde und so die gewünschte Temperatur in der gesamten Spritze vorlag. Die Verzögerung durch die Notwendigkeit des Aufziehens kann dabei vernachlässigt werden, da dies sehr kurz ist und das Plastik der Spritze wärmeisolierende Eigenschaften besitzt.

### **4.3 Anzahl und Position der Messsonden im Kanal**

Die meisten Untersuchungen zu erwärmten Spüllösungen beschäftigen sich nur mit den biochemischen Eigenschaften von erwärmtem Natriumhypochlorit. Zusätzlich zu der Pilotstudie dieser Arbeit (62) finden sich in der Literatur insbesondere zwei Untersuchungen, die sich mit dem Temperaturverhalten im Wurzelkanal während des Spülvorganges beschäftigen.

Macedo et al. (64) hatten in ihrer Studie sehr umfangreich die Parameter einer Wurzelkanalspülung *in vitro* untersucht. Sie hatten sechs Temperaturmesssonden in ihrem Versuchsaufbau angebracht, so dass sie an drei Stellen im Kanal, an der Wurzeloberfläche, im Wasserbad und die Temperatur in der

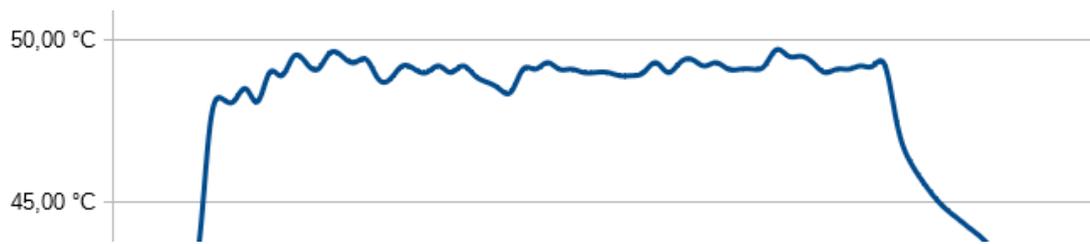
Spritze überwachen konnten. Macedo et al. (64) befestigten die Messsonden von lateral und die tiefste Position lag 2,7 mm vor dem Apex. Somit führte die Spülflüssigkeit in der Kanüle am Messfühler vorbei, um danach apikal auszutreten und nach koronal die Messsonde zu erreichen.

De Hemptinne et al. (63) hatten die Spülkanüle und die Messsonde nebeneinander im Kanal auf einer Höhe von 3 mm vor dem Apex platziert, so dass die Spülflüssigkeit sogar direkt neben der Messsonde austrat. Dies ist auch dem Umstand geschuldet, dass es sich um eine *in vivo* Untersuchung handelte.

In der vorliegenden Studie wurde die Temperatur der Spülflüssigkeit bei der Entnahme überprüft, aber dann nicht weiterverfolgt, weil sofort gespült wurde und dies nicht Ziel der Untersuchung war. Die konstante Umgebungstemperatur wurde durch einen Inkubator und Gips hergestellt und der Spülvorgang erst eingeleitet, wenn die erforderliche Temperatur im Wurzelkanal vorlag. Eine Untersuchung *in vivo*, wie bei de Hemptinne et al. (63), ist zwar anzustreben, aber dadurch wird die mögliche Lage der Messsonde stark limitiert. Der Bereich apikal der Kanüle ist beim Spülvorgang am schwierigsten zu erreichen (107), so dass in diesem Versuchsaufbau der Fokus auf eine Messung am Apex gelegt wurde und die Messsonde von apikal befestigt wurde.

#### **4.4 Fließgeschwindigkeit**

Auffällig war bei der vorliegenden Studie, dass es keine durchgängigen statistischen Unterschiede zwischen den Aufbereitungsformen gab. Die Daten zeigten auch, dass sich die Temperaturen während des Spülvorganges nicht auf einem Niveau einpendelten, sondern schwankten (Abb. 19).



**Abb. 19: Ausschnitt reiner Spülvorgang aus Abb. 5 - Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 bei einer 60 °C Spülung**

X-Achse: Zeit in Sekunden; Y-Achse: Temperatur in °C

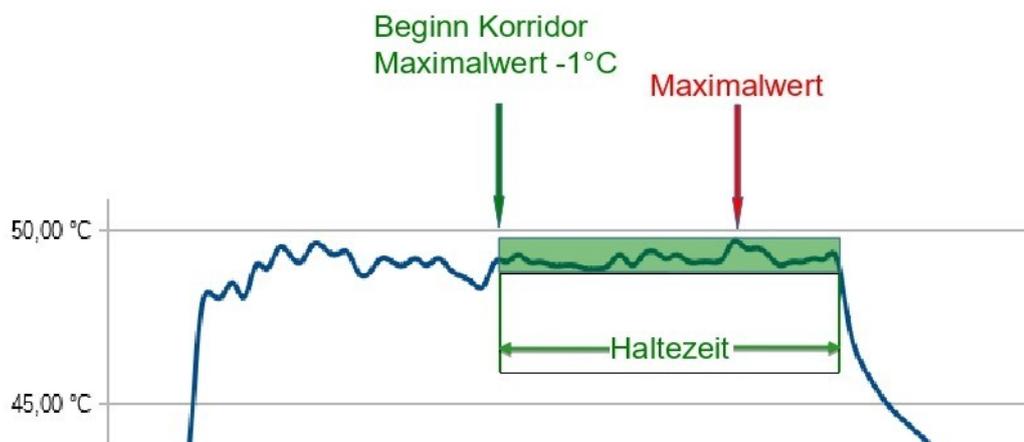
Dies könnte mit den Schwankungen der Fließgeschwindigkeiten zusammenhängen. Boutsioukis et al. (90) konnten zeigen, dass der Druck und die Fließrate bei einer Handspülung nicht konstant sind, sondern in unterschiedlichen Perioden abfallen. Dieses Absinken war bei 30 Gauge Spülkanülen, die auch hier verwendet wurden, häufiger als bei einem größeren Durchmesser der Spülkanüle. In der Untersuchung erwähnen Boutsioukis et al. (90) auch, dass der Druck in der Spülkanüle innerhalb der ersten Sekunden sehr stark anstieg. Sie erklären dies mit dem Umstand, dass die Plastikspritzen elastisch sind und zunächst nachgeben. Bei der vorliegenden Studie könnte dies auch eine Rolle gespielt haben. Zudem ist davon auszugehen, dass der Kunststoff und die gegeneinander gleitenden Teile aus Spritze und Kolben durch die verschiedenen Temperaturen unterschiedlich beeinflusst werden. Bei der Versuchsdurchführung wurde subjektiv beobachtet, dass bei einer Spülung mit 10 °C die Durchführung deutlich schwergängiger war als bei wärmeren Spülflüssigkeiten. Aus der Auflistung der Fließgeschwindigkeit geht hervor, dass diese im Mittelwert bei den erwärmten Spülflüssigkeiten höher waren als bei abgekühlten Spülflüssigkeiten. Auch führte eine apikale Aufbereitung auf ISO 40 bzw. ein *Taper* von .04 im Mittelwert über alle Temperaturen zu einer höheren Fließgeschwindigkeit als eine Aufbereitung auf ISO 30 bzw. ein *Taper* von .06. Dies scheint konform zu gehen mit der Aussage von Boutsioukis et al. (96), wonach ein minimal konisch geformter Kanal mit einer großen apikalen Aufbereitung den Flüssigkeitsaustausch verbessert. Betrachtet man die erwärmten Spülflüssigkeiten jedoch isoliert, so waren die Fließgeschwindigkeiten bei der apikalen Aufbereitung ISO 30 höher als bei ISO 40. Es war nicht Ziel dieser Studie, die Fließgeschwindigkeiten bei

unterschiedlichen Temperaturen oder Aufbereitungsformen zu untersuchen. Somit kann auch keine Aussage getroffen werden, ob die oben beschriebenen Unterschiede signifikant waren. Außerdem gelten die hier gelisteten Fließgeschwindigkeiten für den Ausstoß aus der Spritze. Folglich können daraus keine Informationen über die Fließgeschwindigkeit und den Flüssigkeitsaustausch in der apikalen Region geschlossen werden, wie es von Boutsoukis et al. (93,96) untersucht wurde. Trotzdem deuten die subjektiven Beobachtungen und die aufgelisteten Daten an, dass die Fließgeschwindigkeit und der Flüssigkeitsaustausch in der apikalen Region auch von der Temperatur der Spülflüssigkeit abhängig sein könnten. Hierzu wären jedoch zusätzliche Untersuchungen notwendig. Es ist aber nicht auszuschließen, dass die Temperatur der Spülflüssigkeit in der Spritze die Eigenschaften des Plastiks verändert. In der Folge könnte dies den Spülvorgang in Bezug auf Druck und Fließgeschwindigkeit in der apikalen Region selbst so beeinflussen, dass der Temperaturexaustausch im Kanal indirekt davon betroffen wäre. Boutsoukis et al. (90) postulierten, dass Spritzen aus Metall oder Glas zu direkten Druckveränderungen und einer gleichmäßigen Fließrate führen könnten. In der Vorplanung zu dieser Untersuchung wurde auch überlegt, den Spüldruck über einen Kraftmesser oder die Fließgeschwindigkeit mit Hilfe eines Schwebekörpers für den Behandler bei der Spülung anzuzeigen. So hätte man zwar den Spülvorgang standardisieren können, jedoch hätten diese Vorrichtungen den Ablauf des Spülvorganges oder die Temperaturveränderung in der Spritze beeinflusst. In dieser Studie sollte der Spülvorgang einer endodontischen Behandlung der täglichen Praxis abgebildet werden, so dass Veränderungen beim Spülablauf zu Verzerrungen geführt hätten. Durch die Mehrfachmessungen wurde den Schwankungen der manuellen Spülungen Rechnung getragen.

#### **4.5 Untersuchungsparameter**

Zur Auswertung dieser Untersuchung wurde die Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur ermittelt. Somit wurde nur ein Spitzenwert aus dem einminütigen Spülvorgang bestimmt. Dies allein sagt jedoch noch nichts über die Temperaturentwicklung über die gesamte Zeit des Spülvorganges aus. Es

kann aber die Frage beantworten, welche Temperaturen während einer Spülung überhaupt erzielt werden können. Wie schon erwähnt, kommt es bei Handspülungen zu Schwankungen. Dies könnte dazu führen, dass bei einer Spülung zwar ein sehr hoher Maximalwert oder sehr niedriger Minimalwert gemessen wird, im Gesamtverlauf die Temperaturen aber deutlich von diesen Werten entfernt liegen. Auf der anderen Seite könnte eine Spülung in der Summe größere Temperaturunterschiede aufweisen, wenn sie zwar kleinere Spitzenwerte hat, diese aber gleichmäßiger auf diesem Niveau hält. Aus diesem Grund wurde noch untersucht, wie lange die Temperatur während der Spülung um diese Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur gehalten werden kann. Dazu wurde ein Messkorridor von Minimaltemperatur plus 1 °C bis Minimaltemperatur bzw. von Maximaltemperatur minus 1 °C bis Maximaltemperatur definiert (Abb. 20). Diese Definition ergab sich aus der Probeauswertung von einer 10 °C Spülreihe bei Zahn Nr.1. Hier zeigte sich, dass bei einer Definition des Korridors mit 0,2 °C und mit 0,5 °C sehr selten eine Haltezeit messbar gewesen wäre.



**Abb. 20: Korridor in Abb. 19 eingezeichnet**

X-Achse: Zeit in Sekunden; Y-Achse: Temperatur in °C

Ausschnitt reiner Spülvorgang aus Abb. 5 mit Korridor grün hinterlegt - Zahn Nr. 2

Aufbereitung 30.06 bei einer 60 °C Spülung

Alternativ hätte man auch den Mittelwert über die Spüldauer betrachten können. Damit hätte man die Schwankungen nicht mehr so stark gewichtet, aber unter dem Aspekt der Wirkungssteigerung von Natriumhypochlorit durch Erwärmung sind sowohl die Maximaltemperaturen als auch die Minimaltemperaturen

beachtenswert. Ein Mittelwert wäre nur interessant, wenn die Wirkung proportional zu der Temperatur wäre. Dazu liegen jedoch keine Hinweise vor. Der definierte Korridor wurde auch für die Bestimmung der Zeit genutzt, wann die Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur erreicht wurde. Dies erschien sinnvoll, denn innerhalb des Korridors kann der Spitzenwert gleich am Anfang oder erst am Ende erreicht werden. Bei der Häufigkeit wurde aber nur die exakte Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur gewertet, weil hier nicht die Zeit, sondern die Anzahl betrachtet wurde. Um den Effekt über die Spüldauer hinaus beurteilen zu können, wurden noch die Temperaturen 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende betrachtet.

## **4.6 Statistik**

### **4.6.1 Testauswahl**

Die Werte wurden mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test und Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. Der Shapiro-Wilk-Test besitzt dabei eine höhere Güte. Nach beiden Testverfahren gab es bis auf zwei Ausnahmen einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ) und die Hypothese der Normalverteilung musste verworfen werden. Jedoch bietet auch diese Analyse keine absolute Sicherheit, da Ausreißer insbesondere beim Shapiro-Wilk-Test fälschlicherweise zu einer Ablehnung führen können. Die Verteilung der Ergebnisse wurde deswegen zusätzlich anhand der Histogramme beurteilt. In einigen Fällen war die Abweichung von der Normalverteilung nur sehr gering. In vielen Fällen zeigten sich jedoch Verzerrungen, unsymmetrische Verteilungen und/oder schlagartig abgeschnittene Teile bei hohen oder tiefen Werten. Somit konnte auch nach der visuellen Beurteilung der Histogramme eine durchgehende Normalverteilung nicht bejaht werden. Dies hatte in der Testauswahl zur Folge, dass parametrische Verfahren, wie der t-Test, nicht zur Verfügung standen, da diese eine Normalverteilung voraussetzen. Parametrische Testverfahren gelten zwar auch bei kleinen Abweichungen als relativ robust und sie sind bei einer Normalverteilung etwas teststärker als parameterfreie Tests. Jedoch ist beim parametrischen Test mit einem großen Verlust der Teststärke zu rechnen, wenn die Daten stark verzerrt oder anderweitig nicht normalverteilt sind. Umgekehrt

können nicht parametrische Verfahren auch auf normalverteilte Daten angewandt werden. Die Teststärke ist zwar etwas geringer als bei parametrischen Verfahren, führt aber in jedem Fall zu verwertbaren Ergebnissen. Es handelte sich um zwei unabhängige Gruppen. Statt dem doppelten t-Test wurde aus den oben genannten Gründen der nicht parametrische Mann-Whitney-U-Test zur Überprüfung der Hypothesen angewendet. Im Gegensatz zum t-Test, bei dem die Mittelwerte verglichen werden, werden beim Mann-Whitney-U-Test die Werte nach Rängen sortiert und die beiden Gruppen anhand der Rangsumme verglichen. Die Mittelwerte wurden mit den Ergebnissen aufgeführt, um dem Praktiker einen Hinweis zu geben, welche Temperaturen er beim Spülvorgang erwarten kann. Es kann jedoch keine statistische Angabe gemacht werden, wie sich die Mittelwerte der beiden Gruppen zueinander verhalten, da die Mittelwerte nicht beim Mann-Whitney-U-Test mit einfließen.

#### **4.6.2 Ergebnisse**

Zu dieser Studie wurden Hypothesen aufgestellt, die keinen signifikanten Unterschied beim Temperaturverhalten zwischen den Aufbereitungsgrößen und zwischen den Aufbereitungskonizitäten annahmen. Diese Hypothesen konnten teilweise angenommen werden, teilweise mussten sie verworfen werden. In der allgemeinen Übersicht ergibt sich dadurch kein einheitliches Bild, bei welchen Aufbereitungsformen ein signifikanter Unterschied beim Temperaturverlauf im Wurzelkanal zu erwarten ist. So musste bei den Maximaltemperaturen der erwärmten Spülflüssigkeiten in drei von vier Vergleichen die Hypothese verworfen werden, da sich ein signifikanter Unterschied ( $p < 0,05$ ) darstellte. Bei den Minimaltemperaturen der abgekühlten Spülflüssigkeiten stellte sich dagegen nur in einem von vier Vergleichen ein signifikanter Unterschied dar. Bei der Betrachtung der Temperaturen 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende zeigte sich ein umgekehrtes Muster. Nach Spülende zeigte sich bei den erwärmten Spülflüssigkeiten mehrheitlich kein signifikanter Unterschied und bei den abgekühlten Spülflüssigkeiten stellte sich in der Mehrzahl der Fälle ein signifikanter Unterschied ein. Es gab einzelne Ausreißer, die sich immer im Vergleich der Aufbereitungsgrößen darstellten, außer bei 2 Minuten nach

Spülende bei 10 °C Spültemperatur, wo sich auch zwischen den Aufbereitungskonizitäten kein signifikanter Unterschied darstellte. Da sich kein durchgängiges einheitliches Muster im Temperaturunterschied darstellte, wurden die Temperaturveränderungen für die apikale Aufbereitungsgröße und die Aufbereitungskonizität getrennt betrachtet. Bei der Aufbereitungskonizität erfolgte zudem eine separate Betrachtung der Abkühlphase und der Aufwärmphase.

### **4.6.3 Apikale Aufbereitungsgröße**

Bei einer Spültemperatur von 21 °C und 60 °C stellte sich sowohl bei der Minimaltemperatur bzw. Maximaltemperatur während des Spülvorganges als auch bei der Temperatur 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende kein signifikanter Unterschied zwischen den Aufbereitungsgrößen dar. Wurden die Spülflüssigkeiten auf 10 °C oder 45 °C temperiert, waren die Unterschiede jedoch durchgehend signifikant (Tabelle 9). Für die Spültemperatur von 10 °C wurde schon erwähnt, dass subjektiv schwerer gespült werden konnte als bei wärmeren Spültemperaturen. Ein solcher Effekt könnte das Strömungsverhalten entscheidend beeinflussen, so dass auch der Temperatureaustausch davon betroffen wäre. In der Annahme, dass unterschiedliche Spültemperaturen zu verschiedenen Strömungsverhalten führen können, könnte damit erklärt werden, warum die apikale Aufbereitungsgröße nur bei einem Teil der Spültemperaturen einen signifikanten Einfluss auf die apikale Temperaturentwicklung hat.

### **4.6.4 Aufbereitungskonizität**

Es zeigte sich, dass bei einer Abkühlphase die Aufbereitungskonizität keinen signifikanten Einfluss auf die Minimaltemperatur während des Spülvorgangs und auf die Temperatur 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende hatte (Tabelle 10). Dagegen stellte sich in der Aufwärmphase bis auf eine Ausnahme durchgehend ein signifikanter Unterschied zwischen *Tapern* .04 und .06 dar (Tabelle 11). In der Aufwärmphase befindet sich der warme Flüssigkeitsanteil apikal und der kalte Anteil koronal im Wurzelkanal. Da kalte Spülflüssigkeit schwerer als warme Spülflüssigkeit ist, kommt es zu einem Austausch durch

das Absinken der koronalen Flüssigkeit nach apikal. Bei einem größeren *Taper* befindet sich mehr Flüssigkeit koronal als bei einem schmaleren *Taper*. Somit sinkt bei einem größeren *Taper* auch mehr Masse durch die Schwerkraft nach apikal als bei einem schmaleren *Taper*. In der Abkühlphase ist die Temperatur im apikalen Teil dagegen niedriger als im koronalen Teil. Es entsteht also kein zusätzlicher Effekt durch die Schwerkraft. Diese Umstände können die unterschiedlichen Einflüsse der Aufbereitungskonizität in der Abkühlphase und in der Aufwärmphase erklären. Der nicht signifikante Unterschied bei 10 °C 2 Minuten nach Spülende stellte sich dabei als Ausreißer von diesem dargestellten Muster dar. Es könnte sich dabei um eine falsche Annahme der Hypothese (Fehler 1. Art) handeln oder bedeuten, dass 2 Minuten nach Spülende bei starker Abkühlung dieses Muster nicht mehr vorhanden ist. Beides würde den oben beschriebenen Aussagen jedoch nicht grundsätzlich widersprechen. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass in dieser *in vitro* Untersuchung der Zahn exakt senkrecht ausgerichtet wurde. Bei einer Behandlung wird durch die Patientenlagerung jedoch in unterschiedlichem Ausmaß von einer senkrechten Ausrichtung abgewichen. In wieweit der oben beschriebene Effekt bei der Aufwärmphase nach Patientenlagerung noch zum Tragen kommt, kann nur durch eine entsprechende Studie beantwortet werden.

#### **4.6.5 Bewertung der statistischen Ergebnisse**

Auch die übrigen statistischen Auswertungen zeigten uneinheitliche Ergebnisse beim Vergleich der Aufbereitungsformen. Bei der Haltezeit sowie bei der Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur zeigten jeweils sechs von acht Ergebnissen keinen signifikanten Unterschied. Bei der Anzahl der Häufigkeit der Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur dagegen stellte sich bei fünf von den acht Ergebnissen ein signifikanter Unterschied dar. Bei den Fragestellungen zu dieser Studie stellte man die Hypothesen auf, dass sich das Temperaturverhalten zwischen den Aufbereitungsformen nicht signifikant unterscheidet. Da dies für vier Spültemperaturen untersucht wurde und für alle vier gleich formuliert wurde, bestand auch die Erwartung, dass die Hypothesen durchgehend angenommen oder verworfen würden. Wenn diese Erwartung der Realität entspricht, liegen vereinzelt Fehler der 1. oder 2. Art vor.

Dabei ist es jedoch nicht legitim, die Mehrheit als unumstößlich richtig anzuerkennen und die übrigen einfach als Fehler zu kennzeichnen. Genauso könnte die Mehrheit falsch sein. Alternativ könnte auch schon die Erwartung falsch sein, dass es eine durchgehende Annahme oder Verwerfung der Hypothesen über alle Spültemperaturen gibt. Dies ist auch wahrscheinlicher als es zunächst aussieht, denn alle Spülungen starteten bei  $37\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ . Somit ist eine  $10\text{ °C}$  Spülung circa 73,0 % kälter und dagegen eine  $45\text{ °C}$  Spülung nur circa 21,6 % wärmer als die Umgebungstemperatur. Gleiche absolute Temperaturveränderungen haben damit unterschiedliche relative Ausmaße. Somit sind die Effekte bei den Spültemperaturen auch unterschiedlich. Des Weiteren könnten die nicht ganz homogenen Ergebnisse darauf hindeuten, dass andere Faktoren, wie die schon erwähnte Fließgeschwindigkeit, den Temperaturverlauf mehr mitbestimmen als die Aufbereitungsform alleine.

#### **4.7 Maximaltemperatur/Minimaltemperatur**

Während einer Spülung mit  $60\text{ °C}$  lag in dieser Studie der Mittelwert der Maximaltemperatur im Wurzelkanal bei  $48\text{ °C}$ . Wurde der Wurzelkanal mit  $45\text{ °C}$  gespült, stellte sich eine Maximaltemperatur von  $39,95\text{ °C}$  ein. In der Untersuchung von de Hemptinne et al. (63) wurde bei der Spülung mit einer  $66\text{ °C}$  Flüssigkeit eine Maximaltemperatur von  $57\text{ °C}$  ( $\pm 3,5\text{ °C}$ ) erreicht. Macedo et al. (64) geben in ihrer Veröffentlichung keine absolute Maximaltemperatur an, sondern schreiben von einer maximalen Temperatur an der apikalen Messsonde, die  $2\text{ °C}$  unter der Temperatur in der Spritze lag. Aus den dargestellten Kurven in der Veröffentlichung lassen sich Werte von circa  $58\text{ °C}$  bei einer  $60\text{ °C}$  Spülung und circa  $44\text{ °C}$  bei einer  $45\text{ °C}$  Spülung ablesen. Diese Werte der beiden oben erwähnten Studien liegen zwar höher als in dieser Untersuchung, was aber auch mit den unterschiedlichen Lagen der Messsonden im Versuchsaufbau verständlich werden kann. Bei der  $21\text{ °C}$  Spülung finden Macedo et al. (64) mit  $26\text{ °C}$  sogar eine gleiche Minimaltemperatur wie in der vorliegenden Studie. Die Maximaltemperaturen waren in der vorliegenden Studie durchgehend höher, wenn vor der Spülung mit erwärmter Spülflüssigkeit die Zähne größer oder konischer aufbereitet wurden. Dies war zwar in der Mehrzahl auch signifikant, praktisch äußerte sich

dies jedoch nur in einer minimalen Temperaturerhöhung. Bei der Spülung mit Temperaturen unterhalb der Körpertemperatur ist die Aufbereitungsform unbedeutend, da die Temperaturunterschiede ebenfalls nur gering und, bis auf eine Gruppe, nicht signifikant waren.

#### **4.8 Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur/ Minimaltemperatur**

Die Ergebnisse zum Temperaturverlauf bestätigen die bisherigen Untersuchungen von Sonntag et al. (62), de Hemptinne et al. (63) und Macedo et al. (64), dass die Temperatur schnell zum Spülbeginn ansteigt und nach Spülende direkt wieder abfällt. Macedo et al. (64) geben diesen Anstieg zur maximalen Temperatur mit einer Sekunde an und de Hemptinne et al. (63) benennen ihn mit fünf Sekunden. Diese Zeitspanne war in der vorliegenden Studie länger, was aber mit dem schon erwähnten unterschiedlichen Studiendesign erklärt werden kann und den hier vorliegenden Ergebnissen nicht widerspricht. Es konnte vielmehr gezeigt werden, dass bei dem Anstieg der Temperatur eine Abhängigkeit von der verwendeten Spültemperatur bestand. Je größer die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur war, desto länger war die Zeitspanne bis zur Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur. Die Aufbereitungsgröße und der *Taper* hatten auf diese Anstiegszeit in der Summe keinen entscheidenden Einfluss.

#### **4.9 Haltezeit**

Auch bei der Haltezeit hatte die Aufbereitungsgröße und der *Taper* zusammengefasst keinen entscheidenden Einfluss. Bei größeren Temperaturdifferenzen wird die Maximaltemperatur bzw. Minimaltemperatur jedoch kürzer gehalten.

#### **4.10 Temperatur 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende**

Für den Temperaturverlauf nach Spülende geben de Hemptinne et al. (63) an, dass nach 1 Minute im Wurzelkanal schon wieder 37 °C erreicht waren. Dies geht konform mit den vorliegenden Ergebnissen. Bei den abgekühlten Flüssigkeiten kam es in der Mehrzahl zu signifikanten Unterschieden zwischen den Aufbereitungsformen, wenn das Verhalten nach Spülende betrachtet wurde. Dagegen war bei den erwärmten Flüssigkeiten die Aufbereitungsform kaum relevant.

#### **4.11 Häufigkeit der Maximaltemperatur/Minimaltemperatur**

Bei einer apikalen Aufbereitungsgröße 40 oder einem Taper von .06 werden die exakten Minimaltemperaturen bzw. Maximaltemperaturen häufiger erreicht als bei einer apikalen Aufbereitungsgröße 30 oder einem Taper von .04. Jedoch sind die Unterschiede bei erwärmten Spülflüssigkeiten nicht signifikant. Bei abgekühlten Spülflüssigkeiten hat die Aufbereitungsgröße ebenfalls keinen entscheidenden Einfluss. Jedoch sind bei den abgekühlten Spülungen die Unterschiede zwischen den Aufbereitungskonizitäten signifikant.

#### **4.12 Gefahr der Gewebeschädigung in der Praxis**

Um die Ergebnisse der vorliegenden *in vitro* Studie auf die Behandlung am Patienten übertragen zu können, muss die Versuchsanordnung nicht nur möglichst den Bedingungen im Zahn entsprechen, sondern der Versuchsaufbau muss auch in der Praxis durchführbar sein. Wie oben schon erwähnt, wurde der Spülvorgang so gestaltet, dass es dem üblichen Vorgehen bei einer Wurzelkanalbehandlung entspricht. Für die Relevanz bei der Therapie muss aber auch gewährleistet sein, dass die Verfahren ohne Gefahr angewendet werden können. Bei den Spülungen mit 60 °C wurden Temperaturen über 53,3 °C im Wurzelkanal gemessen. Überschreitet die Temperatur im Bereich des Knochens 47 °C kann dies nach Eriksson und Albrektsson (69) zu Schädigungen am Knochengewebe führen. Aus mehreren Untersuchungen (108–111) zu warmer Guttaperchatechnik mit Einsatz von Hitzeträgern von bis 250 °C ist jedoch bekannt, dass die Temperatur auf der Wurzeloberfläche dem

Temperaturverhalten im Wurzelkanal nicht unmittelbar folgt. Macedo et al. (64) spülten in ihrer Studie auch mit 60 °C Flüssigkeit und konnten auf der Wurzeloberfläche nur maximal 39 °C messen. Somit kann man davon ausgehen, dass es auch bei Spülung mit 60 °C zu keiner Schädigung des umliegenden Gewebes kommt.

#### **4.13 Schlussfolgerung**

Bei der Spülung mit unterschiedlich temperierten Flüssigkeiten kommt es während des Spülvorganges zu deutlichen Temperaturveränderungen im Kanal. Erwärmtes Natriumhypochlorit verstärkt die positiven Eigenschaften der Spüllösung. Bei erwärmten Spülflüssigkeiten kann dieser Effekt in vielen Fällen durch eine apikal größere oder konischere Aufbereitung verstärkt werden. Jedoch näherten sich 1 Minute und 2 Minuten nach Spülende die Temperaturen im Wurzelkanal recht rasch wieder der Umgebungstemperatur. Werden Zähne apikal auf Größe 40 oder auf einen *Taper* .06 aufbereitet, dann werden die Minimaltemperaturen bzw. Maximaltemperaturen häufiger erreicht als bei einer apikalen Aufbereitungsgröße 30 oder bei einem *Taper* .04. Die Temperatur der Spülflüssigkeit könnte die Fließgeschwindigkeit beeinflussen. In der Folge könnte die Fließgeschwindigkeit die erreichte Temperatur im Wurzelkanal zusätzlich beeinflussen.

Klinisch wird der Einsatz von erwärmtem Natriumhypochlorit nach meiner Einschätzung nur von sehr geringer Bedeutung sein. Um einen Temperaturanstieg im Kanal erreichen zu können, muss über einen langen Zeitraum kontinuierlich mit sehr warmer Flüssigkeit gespült werden. Weiterhin sinkt die Temperatur der Flüssigkeit sehr schnell nach Ende der Spülung wieder auf Körpertemperatur ab. *In vivo* Untersuchungen zum *outcome* der Behandlung unter Verwendung von warmer Spülflüssigkeit erscheinen wünschenswert.

## 5 Literaturangaben

1. Costerton JW. Bacterial Biofilms: A Common Cause of Persistent Infections. *Science*. 1999 Mai;284(5418):1318–1322.
2. Clem WH. Endodontics: the adolescent patient. *Dent Clin North Am*. 1969 Apr;13(2):482–493.
3. Mullaney TP. Instrumentation of finely curved canals. *Dent Clin North Am*. 1979 Okt;23(4):575–592.
4. Thompson SA, Dummer PM. Shaping ability of ProFile.04 Taper Series 29 rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. Part 1. *Int Endod J*. 1997 Jan;30(1):1–7.
5. Thompson SA, Dummer PM. Shaping ability of ProFile.04 Taper Series 29 rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. Part 2. *Int Endod J*. 1997 Jan;30(1):8–15.
6. Peters OA, Schönenberger K, Laib A. Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J*. 2001 Apr;34(3):221–230.
7. Dutner J, Mines P, Anderson A. Irrigation Trends among American Association of Endodontists Members: A Web-based Survey. *J Endod*. 2012 Jan;38(1):37–40.
8. Dakin HD. On the use of certain antiseptic substances in the treatment of infected wounds. *Br Med J*. 1915 Aug;2(2852):318–320.
9. Grossman LI, Meiman BW. Solution of pulp tissue by chemical agents. *J Am Dent Assoc*. 1941 Feb;28(2):223–225.
10. Hand RE, Smith ML, Harrison JW. Analysis of the effect of dilution on the necrotic tissue dissolution property of sodium hypochlorite. *J Endod*. 1978 Feb;4(2):60–64.
11. Tartari T, Bachmann L, Maliza AGA, Andrade FB, Duarte MAH, Bramante CM. Tissue dissolution and modifications in dentin composition by different sodium hypochlorite concentrations. *J Appl Oral Sci*. 2016 Juni;24(3):291–298.
12. Cvek M, Nord CE, Hollender L. Antimicrobial effect of root canal débridement in teeth with immature root. A clinical and microbiologic study. *Odontol Revy*. 1976 Jan;27(1):1–10.
13. Byström A, Sunqvist G. The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. *Int Endod J*. 1985 Jan;18(1):35–40.

14. Wang Z, Shen Y, Haapasalo M. Effectiveness of Endodontic Disinfecting Solutions against Young and Old *Enterococcus faecalis* Biofilms in Dentin Canals. *J Endod*. 2012 Okt;38(10):1376–1379.
15. Siqueira JF, Batista M, Fraga RC, de Uzeda M. Antibacterial effects of endodontic irrigants on black-pigmented gram-negative anaerobes and facultative bacteria. *J Endod*. 1998 Juni;24(6):414–416.
16. Siqueira JF, Rôças I, Favieri A, Lima. Chemomechanical reduction of the bacterial population in the root canal after instrumentation and irrigation with 1%, 2.5%, and 5.25% sodium hypochlorite. *J Endod*. 2000 Juni;26(6):331–334.
17. Berber VB, Gomes BPFA, Sena NT, Vianna ME, Ferraz CCR, Zaia AA, Souza-Filho FJ. Efficacy of various concentrations of NaOCl and instrumentation techniques in reducing *Enterococcus faecalis* within root canals and dentinal tubules: Reduction of *E. faecalis* by NaOCl and different instrumentation techniques. *Int Endod J*. 2006 Jan;39(1):10–17.
18. Oliveira DP, Barbizam JVB, Trope M, Teixeira FB. In vitro antibacterial efficacy of endodontic irrigants against *Enterococcus faecalis*. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2007 Mai;103(5):702–706.
19. Frough-Reyhani M, Ghasemi N, Soroush-Barhaghi M, Amini M, Gholizadeh Y. Antimicrobial efficacy of different concentration of sodium hypochlorite on the biofilm of *Enterococcus faecalis* at different stages of development. *J Clin Exp Dent*. 2016 Dez;8(5):e480–e484.
20. Gomes B, Ferraz CCR, ME V, Berber VB, Teixeira FB, Souza-Filho FJ. In vitro antimicrobial activity of several concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine gluconate in the elimination of *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J*. 2001 Sep;34(6):424–428.
21. Harrison JW, Hand RE. The effect of dilution and organic matter on the anti-bacterial property of 5.25% sodium hypochlorite. *J Endod*. 1981 März;7(3):128–132.
22. Betancourt P, Merlos A, Sierra JM, Camps-Font O, Arnabat-Dominguez J, Viñas M. Effectiveness of low concentration of sodium hypochlorite activated by Er,Cr:YSGG laser against *Enterococcus faecalis* biofilm. *Lasers Med Sci*. 2019 März;34(2):247–254.
23. Verma N, Sangwan P, Tewari S, Duhan J. Effect of Different Concentrations of Sodium Hypochlorite on Outcome of Primary Root Canal Treatment: A Randomized Controlled Trial. *J Endod*. 2019 Apr;45(4):357–363.
24. Ulin C, Magunacelaya-Barria M, Dahlén G, Kvist T. Immediate clinical and microbiological evaluation of the effectiveness of 0.5% versus 3% sodium hypochlorite in root canal treatment: A quasi-randomized controlled trial. *Int Endod J*. 2020 Mai;53(5):591–603.

25. Sun X, Li S, Wang S, Luo C, Hou B. The evaluation of *E. faecalis* colonies dissolution ability of sodium hypochlorite in microenvironment by a novel device. *Biomed Microdevices* [Internet]. 2018 [zitiert 2019 Dez 22];20(2). Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s10544-018-0279-3>
26. Retamozo B, Shabahang S, Johnson N, Aprecio RM, Torabinejad M. Minimum Contact Time and Concentration of Sodium Hypochlorite Required to Eliminate *Enterococcus faecalis*. *J Endod*. 2010 März;36(3):520–523.
27. Mohmmed SA, Vianna ME, Penny MR, Hilton ST, Knowles JC. The effect of sodium hypochlorite concentration and irrigation needle extension on biofilm removal from a simulated root canal model. *Aust Endod J*. 2017 Dez;43(3):102–109.
28. de Gregorio C, Arias A, Navarrete N, Cisneros R, Cohenca N. Differences in disinfection protocols for root canal treatments between general dentists and endodontists. *J Am Dent Assoc*. 2015 Juli;146(7):536–543.
29. Sim TP, Knowles JC, Ng YL, Shelton J, Gulabivala K. Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain. *Int Endod J*. 2001 März;34(2):120–132.
30. Wang T, Feng X, Gao Y, Wang M, Wang Y, Sa Y, Jiang T. Effects of different concentrations and exposure time of sodium hypochlorite on the structural, compositional and mechanical properties of human dentin. *J Huazhong Univ Sci Technolog Med Sci*. 2017 Aug;37(4):568–576.
31. Ehrich DG, Brian Jr. JD, Walker WA. Sodium hypochlorite accident: Inadvertent injection into the maxillary sinus. *J Endod*. 1993 Apr;19(4):180–182.
32. Behrents KT, Speer ML, Noujeim M. Sodium hypochlorite accident with evaluation by cone beam computed tomography. *Int Endod J*. 2012 Mai;45(5):492–498.
33. Gernhardt CR, Eppendorf K, Kozlowski A, Brandt M. Toxicity of concentrated sodium hypochlorite used as an endodontic irrigant. *Int Endod J*. 2004 Apr;37(4):272–280.
34. Hülsmann M, Hahn W. Complications during root canal irrigation—literature review and case reports. *Int Endod J*. 2000 Mai;33(3):186–193.
35. Witton R, Henthorn K, Ethunandan M, Harmer S, Brennan PA. Neurological complications following extrusion of sodium hypochlorite solution during root canal treatment. *Int Endod J*. 2005 Nov;38(11):843–848.
36. Guivarc'h M, Ordioni U, Ahmed HMA, Cohen S, Catherine J-H, Bukiet F. Sodium Hypochlorite Accident: A Systematic Review. *J Endod*. 2017 Jan;43(1):16–24.

37. Kleier DJ, Averbach RE, Mehdipour O. The Sodium Hypochlorite Accident: Experience of Diplomates of the American Board of Endodontics. *J Endod.* 2008 Nov;34(11):1346–1350.
38. Boutsoukis C, Psimma Z, van der Sluis LWM. Factors affecting irrigant extrusion during root canal irrigation: a systematic review. *Int Endod J.* 2013 Juli;46(7):599–618.
39. Brown DC, Moore BK, Brown CE, Newton CW. An In Vitro Study of Apical Extrusion of Sodium Hypochlorite during Endodontic Canal Preparation. *J Endod.* 1995 Dez;21(12):587–591.
40. VandeVisse JE, Brilliant JD. Effect of irrigation on the production of extruded material at the root apex during instrumentation. *J Endod.* 1975 Juli;1(7):243–246.
41. Pashley EL, Birdsong NL, Bowman K, Pashley DH. Cytotoxic effects of NaOCl on vital tissue. *J Endod.* 1985 Dez;11(12):525–528.
42. Harrison JW, Baumgartner JC, Svec TA. Incidence of pain associated with clinical factors during and after root canal therapy. Part 2. Postobturation pain. *J Endod.* 1983 Okt;9(10):434–438.
43. Zehnder M. Root canal irrigants. *J Endod.* 2006 Mai;32(5):389–398.
44. Penick EC, Osetek EM. Intracanal drugs and chemicals in endodontic therapy. *Dent Clin North Am.* 1970 Okt;14(4):743–756.
45. Clarkson RM, Moule AJ. Sodium hypochlorite and its use as an endodontic irrigant. *Aust Dent J.* 1998 Aug;43(4):250–256.
46. Clegg MS, Vertucci FJ, Walker C, Belanger M, Britto LR. The Effect of Exposure to Irrigant Solutions on Apical Dentin Biofilms In Vitro. *J Endod.* 2006 Mai;32(5):434–437.
47. Spangberg L, Engström B, Langeland K. Biologic effects of dental materials. 3. Toxicity and antimicrobial effect of endodontic antiseptics in vitro. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1973 Dez;36(6):856–871.
48. Yesilsoy C, Whitaker E, Cleveland D, Phillips E, Trope M. Antimicrobial and toxic effects of established and potential root canal irrigants. *J Endod.* 1995 Okt;21(10):513–515.
49. Mostafa MEHAA, El-Shrief YAI, Anous WIO, Hassan MW, Salamah FTA, El Boghdadi RM, El-Bayoumi MAA, Seyam RM, Abd-El-Kader KG, u. a. Postoperative pain following endodontic irrigation using 1.3% versus 5.25% sodium hypochlorite in mandibular molars with necrotic pulps: a randomized double-blind clinical trial. *Int Endod J.* 2020 Feb;53(2):154–166.

50. Cunningham WT, Balekjian AY. Effect of temperature on collagen-dissolving ability of sodium hypochlorite endodontic irrigant. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1980 Feb;49(2):175–177.
51. Cunningham WT, Joseph SW. Effect of temperature on the bactericidal action of sodium hypochlorite endodontic irrigant. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1980 Dez;50(6):569–571.
52. Abou-Rass M, Oglesby SW. The effects of temperature, concentration, and tissue type on the solvent ability of sodium hypochlorite. *J Endod.* 1981 Aug;7(8):376–377.
53. Stojcic S, Zivkovic S, Qian W, Zhang H, Haapasalo M. Tissue Dissolution by Sodium Hypochlorite: Effect of Concentration, Temperature, Agitation, and Surfactant. *J Endod.* 2010 Sep;36(9):1558–1562.
54. Dumitriu D, Dobre T. Effects of Temperature and Hypochlorite Concentration on the Rate of Collagen Dissolution. *J Endod.* 2015 Juni;41(6):903–906.
55. Sirtes G, Waltimo T, Schaetzle M, Zehnder M. The effects of temperature on sodium hypochlorite short-term stability, pulp dissolution capacity, and antimicrobial efficacy. *J Endod.* 2005 Sep;31(9):669–671.
56. Rossi-Fedele G, De Figueiredo JAP. Use of a bottle warmer to increase 4% sodium hypochlorite tissue dissolution ability on bovine pulp. *Aust Endod J.* 2008 Apr;34(1):39–42.
57. Raphael D, Wong TA, Moodnik R, Borden BG. The effect of temperature on the bactericidal efficiency of sodium hypochlorite. *J Endod.* 1981 Juli;7(7):330–334.
58. Gulsahi K, Tirali RE, Cehreli SB, Karahan ZC, Uzunoglu E, Sabuncuoglu B. The effect of temperature and contact time of sodium hypochlorite on human roots infected with *Enterococcus faecalis* and *Candida albicans*. *Odontology.* 2014 Jan;102(1):36–41.
59. del Carpio-Perochena A, Monteiro Bramante C, Hungaro Duarte M, Bombarda de Andrade F, Zardin Graeff M, Marciano da Silva M, Cavallini Cavenago B, Lucas Fernandes S. Effect of Temperature, Concentration and Contact Time of Sodium Hypochlorite on the Treatment and Revitalization of Oral Biofilms. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects.* 2015 Dez;9(4):209–215.
60. Gambarini G, De Luca M, Gerosa R. Chemical stability of heated sodium hypochlorite endodontic irrigants. *J Endod.* 1998 Juni;24(6):432–434.
61. Cameron JA. The effect of ultrasonic endodontics on the temperature of the root canal wall. *J Endod.* 1988 Nov;14(11):554–559.
62. Sonntag D, Raab WH-M, Martin E, Keppel R. Intracanal use of heated rinsing solutions: A pilot study. *Quintessence Int.* 2017;48(4):281–285.

63. de Hemptinne F, Slaus G, Vandendael M, Jacquet W, De Moor RJ, Bottenberg P. In Vivo Intracanal Temperature Evolution during Endodontic Treatment after the Injection of Room Temperature or Preheated Sodium Hypochlorite. *J Endod.* 2015 Juli;41(7):1112–1115.
64. Macedo RG, Verhaagen B, Versluis M, van der Sluis L. Temperature evolution of preheated irrigant injected into a root canal ex vivo. *Clin Oral Invest.* 2017 Dez;21(9):2841–2850.
65. Macedo RG, Verhaagen B, Wesselink PR, Versluis M, van der Sluis LWM. Influence of refreshment/activation cycles and temperature rise on the reaction rate of sodium hypochlorite with bovine dentine during ultrasonic activated irrigation. *Int Endod J.* 2014 Feb;47(2):147–154.
66. Zeltner M, Peters OA, Paqué F. Temperature Changes During Ultrasonic Irrigation with Different Inserts and Modes of Activation. *J Endod.* 2009 Apr;35(4):573–577.
67. Iandolo A, Amato M, Dagna A, Poggio C, Abdellatif D, Franco V, Pantaleo G. Intracanal heating of sodium hypochlorite: Scanning electron microscope evaluation of root canal walls. *J Conserv Dent.* 2018 Okt;21(5):569–573.
68. Leonardi DP, Grande NM, Tomazinho FSF, Marques-da-Silva B, Gonzaga CC, Baratto-Filho F, Plotino G. Influence of activation mode and preheating on intracanal irrigant temperature. *Aust Endod J.* 2019 Dez;45(3):373–377.
69. Eriksson AR, Albrektsson T. Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: A vital-microscopic study in the rabbit. *J Prosthet Dent.* 1983 Juli;50(1):101–107.
70. Ng Y-L, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K. Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature – Part 2. Influence of clinical factors. *Int Endod J.* 2008 Jan;41(1):6–31.
71. Smith CS, Setchell DJ, Harty FJ. Factors influencing the success of conventional root canal therapy--a five-year retrospective study. *Int Endod J.* 1993 Nov;26(6):321–333.
72. Hoskinson SE, Ng Y-L, Hoskinson AE, Moles DR, Gulabivala K. A retrospective comparison of outcome of root canal treatment using two different protocols. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2002 Juni;93(6):705–715.
73. Huang T-Y, Gulabivala K, Ng Y-L. A bio-molecular film ex-vivo model to evaluate the influence of canal dimensions and irrigation variables on the efficacy of irrigation. *Int Endod J.* 2008 Jan;41(1):60–71.
74. Dalton BC, Ørstavik D, Phillips C, Pettiette M, Trope M. Bacterial reduction with nickel-titanium rotary instrumentation. *J Endod.* 1998 Nov;24(11):763–767.

75. Usman N, Baumgartnerand JG, others. Influence of instrument size on root canal debridement. *J Endod.* 2004 Feb;30(2):110–112.
76. Rodrigues RCV, Zandi H, Kristoffersen AK, Enersen M, Mdala I, Ørstavik D, Rôças IN, Siqueira JF. Influence of the Apical Preparation Size and the Irrigant Type on Bacterial Reduction in Root Canal–treated Teeth with Apical Periodontitis. *J Endod.* 2017 Juli;43(7):1058–1063.
77. Shuping GB, Ørstavik D, Sigurdsson A, Trope M. Reduction of intracanal bacteria using nickel-titanium rotary instrumentation and various medications. *J Endod.* 2000 Dez;26(12):751–755.
78. Yared GM, Bou Dagher FE. Influence of apical enlargement on bacterial infection during treatment of apical periodontitis. *J Endod.* 1994 Nov;20(11):535–537.
79. Rollison S, Barnett F, Stevens RH. Efficacy of bacterial removal from instrumented root canals in vitro related to instrumentation technique and size. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2002 Sep;94(3):366–371.
80. Siqueira JF, Lima KC, Magalhães FAC, Lopes HP, de Uzeda M. Mechanical reduction of the bacterial population in the root canal by three instrumentation techniques. *J Endod.* 1999 Mai;25(5):332–335.
81. Ørstavik D, Kerekes K, Molven O. Effects of extensive apical reaming and calcium hydroxide dressing on bacterial infection during treatment of apical periodontitis: a pilot study. *Int Endod J.* 1991 Jan;24(1):1–7.
82. Card SJ, Sigurdsson A, Ørstavik D, Trope M. The effectiveness of increased apical enlargement in reducing intracanal bacteria. *J Endod.* 2002 Nov;28(11):779–783.
83. Arvaniti IS, Khabbaz MG. Influence of Root Canal Taper on Its Cleanliness: A Scanning Electron Microscopic Study. *J Endod.* 2011 Juni;37(6):871–874.
84. Paraskevopoulou MTh, Khabbaz MG. Influence of Taper of Root Canal Shape on the Intracanal Bacterial Reduction. *Open Dent J.* 2016 Okt;10:568–574.
85. Brunson M, Heilborn C, Johnson DJ, Cohenca N. Effect of Apical Preparation Size and Preparation Taper on Irrigant Volume Delivered by Using Negative Pressure Irrigation System. *J Endod.* 2010 Apr;36(4):721–724.
86. de Gregorio C, Arias A, Navarrete N, del Rio V, Oltra E, Cohenca N. Effect of Apical Size and Taper on Volume of Irrigant Delivered at Working Length with Apical Negative Pressure at Different Root Curvatures. *J Endod.* 2013 Jan;39(1):119–124.

87. Albrecht L, Baumgartner J, Marshall J. Evaluation of Apical Debris Removal Using Various Sizes and Tapers of ProFile GT Files. *J Endod.* 2004 Juni;30(6):425–428.
88. Chow TW. Mechanical effectiveness of root canal irrigation. *J Endod.* 1983 Nov;9(11):475–479.
89. Khademi A, Yazdizadeh M, Feizianfard M. Determination of the Minimum Instrumentation Size for Penetration of Irrigants to the Apical Third of Root Canal Systems. *J Endod.* 2006 Mai;32(5):417–420.
90. Boutsoukis C, Lambrianidis T, Kastrinakis E, Bekiaroglou P. Measurement of pressure and flow rates during irrigation of a root canal ex vivo with three endodontic needles. *Int Endod J.* 2007 Juli;40(7):504–513.
91. Park E, Shen Y, Khakpour M, Haapasalo M. Apical Pressure and Extent of Irrigant Flow beyond the Needle Tip during Positive-pressure Irrigation in an In Vitro Root Canal Model. *J Endod.* 2013 Apr;39(4):511–515.
92. Boutsoukis C, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, Wesselink PR, van der Sluis LWM. Evaluation of irrigant flow in the root canal using different needle types by an unsteady computational fluid dynamics model. *J Endod.* 2010 Mai;36(5):875–879.
93. Boutsoukis C, Gogos C, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, Van Der Sluis LWM. The effect of apical preparation size on irrigant flow in root canals evaluated using an unsteady Computational Fluid Dynamics model: CFD preparation size study. *Int Endod J.* 2010 Okt;43(10):874–881.
94. Boutsoukis C, Lambrianidis T, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, Wesselink PR, van der Sluis LWM. The Effect of Needle-insertion Depth on the Irrigant Flow in the Root Canal: Evaluation Using an Unsteady Computational Fluid Dynamics Model. *J Endod.* 2010 Okt;36(10):1664–1668.
95. Sedgley CM, Nagel AC, Hall D, Applegate B. Influence of irrigant needle depth in removing bioluminescent bacteria inoculated into instrumented root canals using real-time imaging in vitro. *Int Endod J.* 2005 Feb;38(2):97–104.
96. Boutsoukis C, Gogos C, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, Van Der Sluis LWM. The effect of root canal taper on the irrigant flow: evaluation using an unsteady Computational Fluid Dynamics model: CFD canal taper study. *Int Endod J.* 2010 Okt;43(10):909–916.
97. Allison DA, Weber CR, Walton RE. The influence of the method of canal preparation on the quality of apical and coronal obturation. *J Endod.* 1979 Okt;5(10):298–304.
98. Zandbiglari T, Davids H, Schäfer E. Influence of instrument taper on the resistance to fracture of endodontically treated roots. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2006 Jan;101(1):126–131.

99. Keppel R. Temperaturveränderungen der intrakanalären Flüssigkeit bei Verwendung von Spüllösungen mit unterschiedlichen Ausgangstemperaturen - Masterthese. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf; 2012.
100. Feldmann A, Wili P, Maquer G, Zysset P. The thermal conductivity of cortical and cancellous bone. *Eur Cell Mater.* 2018 Jan 28;35:25–33.
101. Afilal S. Ablationsmechanismen von biologischem Hartgewebe bei Bestrahlung mit kurzgepulsten CO<sub>2</sub> -Lasern [Internet]. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf; 2004 [zitiert 2012 Feb 22]. Available from: <http://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-2905>
102. Donnermeyer D, Schäfer E, Bürklein S. Real-time Intra canal Temperature Measurement During Different Obturation Techniques. *J Endod.* 2018 Dez;44(12):1832–1836.
103. Temperaturleitfähigkeit [Internet]. Wikipedia. 2019 [zitiert 2019 Mai 1]. Available from: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Temperaturleitf%C3%A4higkeit&oldid=185027608>
104. Vertucci FJ. Root canal anatomy of the mandibular anterior teeth. *J Am Dent Assoc.* 1974 Aug;89(2):369–371.
105. Kerekes K, Tronstad L. Morphometric observations on root canals of human anterior teeth. *J Endod.* 1977 Jan;3(1):24–29.
106. Peters OA, Peters CI. Cleaning and Shaping of the Root Canal System. In: *Pathways of the Pulp* 10 ed. 10. Aufl. St. Louis: Mosby; 2010. S. 283–348.
107. Boutsoukis C, Lambrianidis T, Kastrinakis E. Irrigant flow within a prepared root canal using various flow rates: a computational fluid dynamics study. *Int Endod J.* 2009 Feb;42(2):144–155.
108. Cullagh JJPM, Setchell DJ, Gulabivala K, Hussey DL, Biagioni P, Lamey P-J, Bailey G. A comparison of thermocouple and infrared thermographic analysis of temperature rise on the root surface during the continuous wave of condensation technique. *Int Endod J.* 2000 Juli;33(4):326–332.
109. Floren JW, Weller RN, Pashley DH, Kimbrough WF. Changes in root surface temperatures with in vitro use of the system B HeatSource. *J Endod.* 1999 Sep;25(9):593–595.
110. Lipski M. Root Surface Temperature Rises In Vitro During Root Canal Obturation Using Hybrid and Microseal Techniques. *J Endod.* 2005 Apr;31(4):297–300.
111. Lipski M. In Vitro Infrared Thermographic Assessment of Root Surface Temperatures Generated by High-Temperature Thermoplasticized Injectable Gutta-Percha Obturation Technique. *J Endod.* 2006 Mai;32(5):438–441.

## 6 Anhang

Einige Fremdwörter wurden im Text nicht erläutert, da sie in der Fachliteratur geläufige Begriffe darstellen. Diese Wörter wurden kursiv formatiert und sind in den folgenden Zeilen übersetzt.

<b>Debris</b>	Trümmer von Dentinspänen und Geweberesten
<b>in vitro</b>	im Reagenzglas; hier: außerhalb des Patienten
<b>in vivo</b>	am lebenden Objekt; hier: Untersuchung am Patienten
<b>outcome</b>	Therapieergebnis
<b>step-back</b>	zurücktreten; hier als Aufbereitungstechnik: folgende größere Instrumente werden nur verkürzt eingesetzt
<b>Taper</b>	Konus
<b>via falsa</b>	lat. falscher Weg; hier: Verlassen des Wurzelkanals während der Wurzelkanalaufbereitung

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Röntgenbild frontal Zahn Nr. 2.....	21
Abb. 2: Röntgenbild seitlich Zahn Nr. 2.....	21
Abb. 3: Vorbereiteter Zahn im Inkubator.....	22
Abb. 4: Übertragung und Darstellung der Messdaten am Computer.....	24
Abb. 5: Beispiel Kurvenverlauf Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 bei einer 60°C Spülung.....	25
Abb. 6: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 10 °C Spülung.....	27
Abb. 7: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 21 °C Spülung.....	28
Abb. 8: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 37 °C Spülung.....	28
Abb. 9: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 45 °C Spülung.....	29
Abb. 10: Die zehn überlagerten Kurven Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 mit 60 °C Spülung.....	29
Abb. 11: Vergleich der apikalen Aufbereitungsgrößen - Temperaturverlauf bei 10 °C Spülung	33
Abb. 12: Vergleich der apikalen Aufbereitungsgrößen - Temperaturverlauf bei 21 °C Spülung	34
Abb. 13: Vergleich der apikalen Aufbereitungsgrößen - Temperaturverlauf bei 45 °C Spülung	35
Abb. 14: Vergleich der apikalen Aufbereitungsgrößen - Temperaturverlauf bei 60 °C Spülung	36
Abb. 15: Vergleich der Aufbereitungskonizitäten - Temperaturverlauf bei 10 °C Spülung.....	37
Abb. 16: Vergleich der Aufbereitungskonizitäten - Temperaturverlauf bei 21 °C Spülung.....	38
Abb. 17: Vergleich der Aufbereitungskonizitäten - Temperaturverlauf bei 45 °C Spülung.....	39
Abb. 18: Vergleich der Aufbereitungskonizitäten - Temperaturverlauf bei 60 °C Spülung.....	40
Abb. 19: Ausschnitt reiner Spülvorgang aus Abb. 5 - Zahn Nr. 2 Aufbereitung 30.06 bei einer 60 °C Spülung.....	56
Abb. 20: Korridor in Abb. 19 eingezeichnet.....	58

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Test auf Normalverteilung.....	32
Tabelle 2: Minimaltemperatur/Maximaltemperatur.....	42
Tabelle 3: Zeit bis zum Erreichen der Maximaltemperatur/Minimaltemperatur.....	43
Tabelle 4: Haltezeit.....	44
Tabelle 5: Temperatur 1 Minute nach Spülende.....	45
Tabelle 6: Temperatur 2 Minuten nach Spülende.....	46
Tabelle 7: Häufigkeit Maximaltemperatur/Minimaltemperatur.....	47
Tabelle 8: Fließrate.....	48
Tabelle 9: Isolierte Darstellung der Unterschiede bei den apikalen Aufbereitungsgrößen.....	49
Tabelle 10: Isolierte Darstellung der Unterschiede bei den Aufbereitungskonizitäten in der Abkühlphase.....	50
Tabelle 11: Isolierte Darstellung der Unterschiede bei den Aufbereitungskonizitäten in der Aufwärmphase.....	50

## Danksagung

Ich danke Prof. Dr. David Sonntag, der mich schon bei der Masterthese unterstützt hat, meine Idee wissenschaftlich zu untersuchen und mir immer hilfreich zur Seite stand. Dank seines Engagements konnte ich diese Fragestellung, die mich schon lange bewegt hat, als Thema entwickeln und in der Dissertation noch weiter ausbauen.

Im ganz besonderen Maße danke ich meiner Frau Ramona, die in dieser Zeit der Dissertation viel auf sich genommen hat und immer hinter mir stand. Sie hat bei unzähligen Korrekturlesungen nicht nur etliche Fehler gefunden, sondern sie hat mir auch allgemein unendlich mit ihrer Unterstützung geholfen, diese Arbeit abzuschließen und mir dabei noch wunderbare Kinder geschenkt. Ich liebe Dich!

Außerdem danke ich meiner Schwester für die ständige Hilfsbereitschaft und das eifrige Korrekturlesen.

Allgemein danke ich meinen Eltern, dass sie mir die Ausbildung ermöglicht haben und bei all meinen Vorhaben bedingungslos hinter mir standen.

Des Weiteren danke ich Dr. Andreas Röhrle, der mir Instrumentarium und Geräte leihweise für die Versuchsdurchführung überlassen hat und mich auch sonst bei der Umsetzung immer unterstützt hat.

Für das Sammeln der Unterkieferfrontzähne danke ich meinen Kommilitonen aus dem Masterstudiengang Dr. Franziska Frangenberg, Dr. Sven Koßert und Dr. Theo van Beek.