

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
Poliklinik der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

**In Vitro Untersuchung zur Wärmeentwicklung der
Wurzeloberfläche von Zähnen während der trägerbasierten
Obturation von Wurzelkanälen**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

Vorgelegt von

Markus Gogl
aus Brixen

2022

**Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München**

Berichterstatter:	Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Bogna Stawarczyk apl. Prof. Dr. Mechthild Stöckelhuber
Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter:	Dr. med. dent. Christian Diegritz
Dekan:	Prof. Dr. med. Thomas Gudermann
Tag der mündlichen Prüfung:	21.02.2022

Eidesstattliche Versicherung

Gogl, Markus

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,
dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel

**In Vitro Untersuchung zur Wärmeentwicklung der Wurzeloberfläche von Zähnen
während der trägerbasierten Obturation von Wurzelkanälen**

selbstständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Ansbach, 23.02.2022

Ort, Datum

Markus Gogl

Unterschrift

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Literaturübersicht	3
2.1 Aufbau und Topographie des Endodonts und des apikalen Parodonts	3
2.2 Erkrankungen des Endodonts und des apikalen Parodonts	4
2.3 Endodontische Therapie	5
2.3.1 Pulpektomie und chemomechanische Aufbereitung des Wurzelkanalsystems	5
2.3.2 Obturation des Wurzelkanalsystems.....	5
2.3.2.1 Wurzelfüllmaterialien	5
2.3.2.2 Wurzelfülltechniken.....	8
2.3.2.2.1 Laterale Kompaktion.....	8
2.3.2.2.2 Einstifttechnik	9
2.3.2.2.3 Thermomechanische Kompaktion.....	9
2.3.2.2.4 Warm vertikale Kompaktion.....	10
2.3.2.2.5 Guttapercha-Injektionstechnik	11
2.3.2.2.6 Trägerbasierte Wurzelfülltechniken.....	11
2.4 Studienübersicht zur Wärmeentwicklung auf der Wurzeloberfläche.....	13
3. Ziele der Studie	15
4. Material und Methode	16
4.1 Versuchsaufbau	16
4.1.1 Auswahl der Zähne	18
4.1.2 Vorbereitung der Zähne.....	18
4.2 Obturationssysteme	19
4.2.1 Guttafusion® (VDW Dental).....	19
4.2.2 Thermafil® (Dentsply Maillefer)	20
4.2.3 Super Endo α/β ® (B&L Biotech).....	21
4.3 Versuchsdurchführung	21
4.3.1 Kamera.....	21
4.3.2 Temperaturmessungen an der Oberfläche des Obturators.....	23
4.3.3 Temperaturmessungen an der Wurzeloberfläche	25

4.4	Statistische Auswertung	30
4.4.1	Datenauswertung der Messungen auf der Obturatoroberfläche	30
4.4.2	Datenauswertung der Messungen auf der Wurzeloberfläche	30
5.	Ergebnisse	31
5.1	Vorversuche: Ergebnisse der Temperaturmessung an der Obturatoroberfläche	31
5.1.1	Guttafusion.....	31
5.1.1.1	Guttafusionobturatoren bei Emissionsgrad = 1.....	31
5.1.1.1.1	Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025.....	31
5.1.1.1.2	Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040.....	32
5.1.1.1.3	Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050.....	32
5.1.1.2	Guttafusionobturatoren bei Emissionsgrad = 0,95.....	33
5.1.1.2.1	Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025.....	33
5.1.1.2.2	Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040.....	33
5.1.1.2.3	Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050.....	34
5.1.2	Thermafil	35
5.1.2.1	Thermafilobturatoren bei Emissionsgrad = 1.....	35
5.1.2.1.1	Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025	35
5.1.2.1.2	Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040	36
5.1.2.1.3	Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050	37
5.1.2.2	Thermafilobturatoren bei Emissionsgrad 0,95.....	38
5.1.2.2.1	Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025	38
5.1.2.2.2	Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040	39
5.1.2.2.3	Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050	40
5.2	Vorversuche: Aussagen über nicht normalverteilte Daten.....	42
5.3	Vorversuche: Kontrolle der Nullhypothesen.....	54
5.4	Hauptversuche: Ergebnisse der Temperaturmessung an der Wurzeloberfläche	55
5.4.1	Zähne auf ISO-Größe 025 aufbereitet	55
5.4.2	Zähne auf ISO-Größe 040 aufbereitet	56
5.4.3	Zähne auf ISO-Größe 050 aufbereitet	57
5.5	Hauptversuche: Aussagen über nicht normalverteilte Daten	58
5.6	Hauptversuche: Kontrolle der Nullhypothesen	65

6. Diskussion	66
6.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	66
6.2 Einflussfaktoren.....	70
6.3 Messproben.....	72
6.4 Ergebnisse.....	76
6.4.1 Temperaturmessungen an der Oberfläche des Obturators	76
6.4.2 Temperaturmessungen an der Wurzeloberfläche	80
7. Zusammenfassung.....	87
8. Literaturverzeichnis.....	89
9. Anhang	96
9.1 Materialien.....	96
9.2 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	97
9.2.1 Verzeichnis der Abbildungen	97
9.2.2 Verzeichnis der Tabellen	98
10. Danksagung.....	99

1. Einleitung

Galten zu Zeiten des französischen Absolutismus kariöse Zähne noch als Zeichen von Reichtum und Wohlstand, steht heute „der Anspruch an ein gepflegtes Äußeres“ (Hartmut Böhme, Kulturtheoretiker) im Vordergrund. Dieses Ideal prägte auch die Zahnmedizin und führte daher über Jahrhunderte zu einer Verbesserung der Prophylaxe und der Therapiemöglichkeiten und in Bezug auf die Bevölkerung auf ein größeres Verständnis hinsichtlich der Mundhygiene. Jahrhundertlang kümmerten sich Barbieri und Wandergesellen um die kranken Zähne der einfachen Leute: mit Metallhaken, sog. Pelikanen, wurden stark kariöse Zähne entfernt. 1728 begründete schließlich Pierre Fauchard mit seinem Werk „Le chirurgien dentiste“ die moderne Zahnmedizin und gab damit den Startschuss für den bis heute anhaltenden Forschungs- und Entwicklungsdrang in der Zahnmedizin [1].

In der gegenwärtig praktizierten Zahnmedizin nimmt der Zahnerhalt eine bedeutende Rolle ein. Zwar wurden schon seit 4000 v. Chr. Behandlungen praktiziert, die schmerzlindernd und zahnerhaltend auf pulpale Erkrankungen wirken sollten; dennoch fand die moderne Definition der Endodontie erst Mitte des 19. Jahrhunderts ihren Ursprung [2].

Das Spektrum der Endodontie umfasst grundlegend die Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Pulpa-Dentin-Komplexes sowie des periapikalen Gewebes. Dazu gehört neben vitalerhaltenden Maßnahmen wie z.B. einer direkten Überkappung oder einer Pulpotomie nach wie vor die klassische Wurzelkanalbehandlung, welche aus einer chemomechanischen Desinfektion sowie einem dauerhaften, flüssigkeits- und bakteriedichten Verschluss des Wurzelkanalsystems mit biokompatiblen, unlöslichen und dimensionsstabilen Materialien besteht.[3]

"In der Zahnheilkunde gibt es wohl keine zweite Operation, welche im Laufe der Zeit so viele Wandlungen durchgemacht hätte als die Wurzelkanalfüllung" [4].

Dieses Zitat von Adolph Witzel aus dem Jahre 1879 ist mehr als 140 Jahre alt und dennoch beschreibt es den stetigen Wandel und Fortschritt der Endodontie, bis heute. Dies trifft vor allem auf die Techniken sowie die Materialauswahl für die Versiegelung des Wurzelkanalsystems zu.

Der erste Nachweis einer Wurzelkanalfüllung wurde an einem Schneidezahn eines Schädels aus dem Jahr 200 v. Chr. erbracht: Der Wurzelkanal wurde mit Bronzedraht gefüllt. 1782 beschrieb Fauchard eine Wurzelfüllung aus Blei, 1824 füllte Hudson den Wurzelkanal mit gestopfter Goldfolie [2]. Aktuell akzeptiert ist ein Kernmaterial, meist Guttapercha, kombiniert mit einem Verschlusszement, dem Sealer, welcher für die Füllung der lateralen Kanäle und für

die Asymmetrie der Wurzelkanäle unabdingbar ist. Nur unter diesen Voraussetzungen können klinisch akzeptable und erfolgreiche Wurzelfüllungen erreicht werden [5, 6].

Die laterale Kompaktion der kalten Guttapercha mit Handinstrumenten galt lange Zeit als Goldstandard der Füllungsmethoden. Sie wurde in den letzten Jahren durch warme Obturationsmethoden abgelöst, da durch sie Wurzelfüllungen mit höherer Dichte und besserem Adaptationsverhalten der Guttapercha an die Kanalwand erreicht werden können [7, 8]. Die Fülltechniken der warmen trägerbasierten Obturation sowie die warm vertikale Obturation konnten im klinischen Outcome bisher jedoch noch nicht zeigen, dass sie der kalt lateralen Kompaktion überlegen sind.

Beenden möchte ich diese kurze Einleitung mit einem Zitat von CJ Grieves aus dem Jahre 1920. „One of the gravest mistakes of dentistry is the stubborn belief that a correct root-canal filling will cure apical disease” [9].

Unser Ziel soll es sein, durch ein tiefes materialkundliches Verständnis und dem notwendigen klinischen Know-how die bestmögliche endodontische Behandlung durchzuführen. Die kritische Untersuchung von möglichen Risiken moderner Obturationsmethoden spielt dabei eine entscheidende Rolle.

2. Literaturübersicht

2.1 Aufbau und Topographie des Endodonts und des apikalen Parodonts

Das Endodont ist ein komplexes, dreidimensionales, zu den umgebenden Gewebestrukturen offenes anatomisches System. Pulpa und umgebendes Dentin bilden entwicklungsgeschichtlich und funktionell eine Einheit [2].

Das Pulpagewebe ist ein spezialisiertes gallertartiges Bindegewebe. Es besteht aus Zellen, einer interzellulären Grundsubstanz mit oxytalanartigen, retikulären und kollagenen Fasern sowie aus Gefäßen und Nerven [10, 11]. Die Nervenfasern, welche die Pulpa versorgen, werden eingeteilt in A β -, A δ - und C-Fasern [12].

Das apikale Parodont besteht aus dem Wurzelzement, dem parodontalen Ligament und dem Alveolarknochen. Das desmodontale Gewebe bildet den ca. 0,1 – 0,2 mm breiten Parodontalspalt. Durch einen gut entwickelten Kollateralkreislauf besitzt das Desmodont eine gute Vaskularisation und somit eine hohe Regenerationsfähigkeit [13].

Topografisch werden Kronenkavum und Wurzelkanäle unterschieden, entsprechend Kronenpulpa und Wurzelpulpa. Die schützende Dentinschicht oberhalb der Kronenpulpa wird Pulpakammerdach genannt, der Boden bei mehrwurzeligen Zähnen Pulpakammerboden. Im Bereich des Pulpakammerbodens finden sich in 55-76% aller Molaren und mehrwurzeligen Prämolaren die Furkationskanäle (Pulpoparodontalkanäle) [2].

Das Pulpagewebe steht mit dem Parodontium durch die Furkationskanäle, dem Foramen apicale, den Seitenkanälen und den akzessorischen Kanälen in Verbindung. Die genaue klinische Bedeutung dieser Seitenkanäle, die in etwa 45% aller Zähne vorkommen, ist jedoch unklar. Sie nehmen von koronal (2%) über das mittlere Wurzeldrittel (9%) nach apikal (bis zu 30%) zu [14].

Eine Infektion kann sich über diese nach lateral ausbreiten und zu einer Parodontitis lateralis führen. Die Seitenkanäle sind bei einer endodontischen Therapie nicht einsehbar und zur instrumentellen Bearbeitung nicht zugänglich [15]. Einzig der Einsatz von gewebeauflösenden Lösungen (z.B. NaOCl) kann eine Keimreduktion in den Seitenkanälen bewirken [16].

2.2 Erkrankungen des Endodonts und des apikalen Parodonts

Die gesunde Pulpa reagiert auf genügend starke Irritationen mit einer Entzündungsreaktion, die auf den Bereich des einwirkenden Reizes beschränkt ist. Solche Irritationen können infektiösen, traumatischen oder iatrogenen Ursprungs sein. Persistiert der Reiz, kann sich die Entzündung auf die gesamte Pulpa ausbreiten; man spricht von einer Pulpitis. Bei rechtzeitiger Reizausschaltung ist eine Regeneration der Pulpa möglich (reversible Pulpitis). Außerdem kann es zum nekrotischen Zerfall des Pulpagewebes bis hin zur vollständigen Pulpanekrose kommen [2].

Eine unbehandelte Pulpitis mündet stets in eine Parodontitis apicalis. Dabei handelt es sich um eine Entzündung der periapikalen Gewebestrukturen mit Resorption von Knochen und Wurzelzement hervorgerufen durch den Versuch der Immunabwehr, die Infektion einzudämmen und so eine systemische Ausbreitung zu verhindern. Die Parodontitis apicalis acuta manifestiert sich klinisch durch starke Schmerzen, vor allem bei axialer Belastung. Bei anhaltendem Reiz kann sich aus der Parodontitis apicalis acuta eine Parodontitis apicalis chronica entwickeln. Im Röntgenbild ist hierbei eine Knochenläsion als Manifestation der abgekapselten Entzündung in Nachbarschaft zum Foramen apicale bzw. zu lateralen Kanälen zu erkennen [17].

Bei einem weiter anhaltenden chronischen Verlauf kann das entzündete Gewebe im apikalen Bereich durch Granulationsgewebe ersetzt werden, es entsteht ein apikales Granulom. Daraus kann eine apikale Zyste entstehen. Bei reduzierter körpereigener Abwehr bzw. fortschreitender Entzündung entsteht ein apikaler Abszess [18].

Die bakterielle Infektion des Wurzelkanals ist die häufigste Ursache für eine Wurzelkanalbehandlung.

Nekrotische Pulpa und eindringender Speichel bilden das Substrat für die aus der normalen Mundflora kommenden Bakterien. Im geschlossenen Wurzelkanal können die zu 90% obligat anaeroben Bakterien durch die Bildung polymikrobieller Biofilme die Infektion aufrechterhalten. Dadurch sind sie resistenter gegenüber antimikrobiellen Agenzien. Im Normalfall liegt eine Mischinfektion vor, mit Keimzahlen zwischen 10^2 und 10^7 pro infiziertem Wurzelkanal [19].

Ziel jeder endodontischen Therapie ist es, das gesamte Wurzelkanalsystem von entzündlich verändertem Pulpagewebe zu befreien und eine möglichst vollständige Keimelimination zu erreichen [20]. Dies wird durch die Pulpektomie mit anschließender chemomechanischer Aufbereitung des Wurzelkanalsystems erreicht.

2.3 Endodontische Therapie

2.3.1 Pulpektomie und chemomechanische Aufbereitung des Wurzelkanalsystems

Bei einer Pulpektomie wird das Kronenkavum eröffnet und das Pulpakammerdach vollständig entfernt, um einen Zugang zur Pulpakammer und zum Wurzelkanalsystem zu schaffen. Die Kronenpulpa wird entfernt und die Kanaleingänge werden aufgesucht. Anschließend wird das Pulpagewebe mit Hilfe von Aufbereitungsinstrumenten aus den Wurzelkanälen entfernt. Nach der Längenbestimmung mit der Endometrie, einem Impedanzmessverfahren basierend auf unterschiedlichen elektrischen Widerstand zwischen Wurzelkanal und parodontalem Ligament, und der Verifizierung durch Röntgenbilder wird der Wurzelkanal mit speziellen Instrumenten erweitert und gereinigt. Zur Desinfektion werden Spüllösungen verwendet. Natriumhypochlorit (NaOCl) gilt als effektivste Spüllösung, sie ist gewebeauflösend und antibakteriell wirksam gegen reifen Biofilm [21]. Der Wurzelkanal wird so für die Aufnahme der Wurzelkanalfüllung vorbereitet [17].

Für die vollständige Reinigung und Aufbereitung des Wurzelkanals reicht es jedoch oft nicht aus, diesen nur mechanisch zu reinigen und chemisch zu desinfizieren. Spüllösungen können zusätzlich schallaktiviert werden. Bei der passiven ultraschallaktivierten Irrigation (PUI) oszillieren feine Ultraschallspitzen im Wurzelkanal, die so die Energie auf die Spüllösung übertragen und deren antibakterielle und gewebeauflösende Wirkung signifikant steigern. PUI erwärmt die Spüllösung auf bis zu 55°C und kann den an der Wurzelkanalwand anhaftenden Biofilm ablösen und zerstören (Kavitation). Auch neu in den Markt eingeführte schallaktivierbare Spülspitzen aus Polyamid (Eddy, Fa. VDW, München), welche bei 6000 Hz oszillieren, erreichen eine ähnlich gute Wirkung wie die PUI [22]. Spüllösungen können auch durch Laserimpulse („Photon Induced Photoacoustic Streaming“) aktiviert werden, um das gesamte komplexe Wurzelkanalsystem mitsamt akzessorischen Kanälen zu reinigen [23].

2.3.2 Obturation des Wurzelkanalsystems

2.3.2.1 Wurzelfüllmaterialien

Nach der chemomechanischen Aufbereitung werden für die Wurzelkanalfüllung in der Regel zwei unterschiedliche Füllwerkstoffe verwendet: Ein festes Kernmaterial in Kombination mit einer dünnfließenden Wurzelkanal-Füllpaste (Sealer) [6].

Als Standard Wurzelfüll-Kernmaterial gilt das erstmals 1847 in der Zahnmedizin eingesetzte Guttapercha. Guttapercha ist der koagulierte Milchsafte des im malaiischen Raum vorkommenden Guttaperchabaumes (*Palaquium gutta*). Der Name „Guttapercha“ kommt aus dem Malaiischen, wobei „Getah“ soviel wie Gummi bedeutet und „Pertja“ der Name des Abstammungsbaumes ist [24].

Guttapercha wurde lange vor der Einführung in Europa von der malaiischen Bevölkerung zu Messergriffen und Gehstöcken verarbeitet. Nachdem John Tradescant das Material 1656 nach seinen Reisen im Fernen Osten nach Europa brachte, entdeckte Dr. William Montgomerie das medizinische Potential der Guttapercha, wofür er 1843 von der „Royal Society of arts“ geehrt wurde [25]. In der Medizin wurde Guttapercha als Schienenmaterial nach Gelenkbrüchen verwendet und zu Zangengriffen oder Kathetern verarbeitet [26]. Außerdem wurde sie in der Dermatologie zur Therapie von Erysipelen und Ekzemen sowie der Psoriasis verwendet [27].

1847 beschrieb Edwin Truman die Verwendung von Guttapercha als provisorisches Füllmaterial und führte das Material erstmals in der Zahnmedizin ein [28].

20 Jahre später benutzte G.A. Bowman erstmals Guttaperchastifte als alleiniges Material zur Wurzelkanalfüllung. Zu Demonstrationszwecken füllte er extrahierte Molaren mit konisch geformten Guttaperchastiften [29, 30]. S. S. White stellte 1887 erstmals konfektionierte Guttapercha-Stifte her [30].

Medizinische Guttapercha besteht nur zu 20% aus Guttapercha. Die anderen Komponenten sind Zinkoxid als Füllstoff (66%), Wachse und Kunststoff zur Erhöhung der Plastizität, Schwermetallsalze als Röntgenkontrastmittel, Farbstoffe zur ISO-Kodierung und einige Spurenelemente wie Kupfer, Eisen, Schwefel oder Titan [31].

Guttapercha kann in einer kristallinen Alpha-Form bzw. kristallinen Beta-Form sowie in einer amorphen Form vorliegen. Die Alpha-Form, die natürliche Zustandsform, ist bei Zimmertemperatur bröslig und wird bei Erwärmung fließfähig und niedrigviskös. Bei Temperaturen zwischen 56°C und 64°C schmilzt die Alpha-Guttapercha. Nach Erwärmung über 65°C geht die Alpha-Phase Guttapercha bei normaler Abkühlung in die Beta-Phase über, bei langsamer Abkühlung (0,5°C/h) rekristallisiert erneut die Alpha-Form. In der Beta-Form ist die Guttapercha bei Zimmertemperatur stabil und flexibel, bei Erwärmung hochviskös [32].

Die Beta-Form wird für kalte Fülltechniken, z.B. für die laterale Kompaktion, angewandt, die Alpha-Form wird für warme Fülltechniken, z.B. für die warm vertikale Kompaktion, verwendet.

Bei kontinuierlicher Erwärmung auf 53-59°C wird Guttapercha in eine amorphe Phase überleitet, bei Abkühlung wird daraus wieder überwiegend Beta-Form-Guttapercha [32].

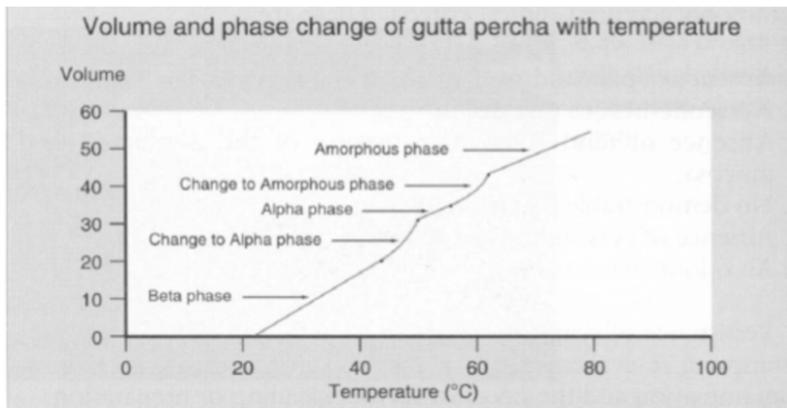


Abb. 1: Volumen und Phasenveränderung der Guttapercha bei unterschiedlichen Temperaturen [A]

Je stärker die Erwärmung, desto größer ist das Schrumpfungsverhalten bei Abkühlung [33]. Guttapercha wird wegen seiner hervorragenden Eigenschaften als Goldstandard der Wurzelfüllmaterialien angesehen. Es ist ein radioopakes, gewebeverträgliches, leicht einzubringendes und zu entfernendes Material [34]. Es kann in der kalten Beta-Form verformt und kompaktiert werden und in der warmen Alpha-Form sich der Konfiguration des Wurzelkanalsystems anpassen.

Es ist anzuführen, dass Guttapercha, wie alle anderen Wurzelfüllmaterialien, nur in Kombination mit einem geeigneten Sealer verwendet werden darf. Ohne die Anwendung eines Sealers resultiert kein vollständig dreidimensional abgedichteter Wurzelkanal [6, 35, 36].

Die gängigen Sealer werden anhand ihrer Zusammensetzung eingeteilt:

- Zinkoxideugenolbasierende Sealer (z.B. Kerr Pulp canal sealer® (Kerr, Karlsruhe))
- Calciumhydroxidbasierende Sealer (z.B. Apexit® (Vivadent, Ellwangen))
- Calciumsilikatbasierende Sealer (z.B. TotalFill BC Sealer® (FKG Dentaire, LA Chaux de-Fonds, Schweiz))
- Silikonbasierende Sealer (Guttaflow 2® (Coltene Endo, Altstätten, Schweiz))
- Epoxidharzbasierende Sealer (AH Plus® (Dentsply DeTrey, Konstanz))

Sealer auf Basis von Epoxidharz sind nahezu unlöslich in Gewebeflüssigkeit, außerdem wird ihnen eine sehr gute Biokompatibilität und Abdichtung zugeschrieben [37, 38]. Epoxidharzbasierende Sealer werden daher als empfehlenswert eingestuft [39].

2.3.2.2 Wurzelfülltechniken

Bei der definitiven Wurzelkanalfüllung haben die beschriebenen Füllmaterialien die Aufgabe, das durch chemomechanische Aufbereitung ausgeformte Wurzelkanalsystem dauerhaft vollständig dreidimensional, flüssigkeits- und bakteriendicht zu verschließen. Ziel der Wurzelfüllung ist laut Europäischer Gesellschaft für Endodontologie (2006) der „Ausschluss der Passage von Mikroorganismen und Flüssigkeit entlang des Wurzelkanals“ sowie die „Obturation des gesamten Kanalsystems, Letzteres nicht nur um die apikalen Foramina, sondern auch Dentinkanälchen und akzessorische Kanäle zu verblocken“ [3].

2.3.2.2.1 Laterale Kompaktion

Die laterale Kompaktion kalter Guttapercha ist eine standardisierte und universell einsetzbare Technik zur Wurzelfüllung. Ziel dieser Technik ist es, den Wurzelkanal vollständig mit möglichst vielen Guttapercha-Cones und möglichst wenig Sealer dreidimensional zu füllen [40].

Dabei wird ein Guttaperchastift, der sog. „Mastercone“ oder „Masterpoint“, auf Arbeitslänge eingebracht. Dieser soll eine apikale Friktion („tug back“) haben und die gleiche Größe und Konizität wie das zuletzt auf Arbeitslänge eingebrachte Aufbereitungsinstrument. In einer Röntgenkontrollaufnahme wird die korrekte Position des Masterpoints kontrolliert. Dieser wird vor endgültiger Wurzelfüllung z.B. durch Einlegen in Natriumhypochlorit-Lösung desinfiziert. Der Masterpoint wird zur endgültigen Wurzelfüllung mit Sealer beschickt und bis zur Arbeitslänge in den Kanal eingebracht. Mit einem Finger- oder Handkondensierer (Spreader) wird der Masterpoint gegen die Kanalwand verdichtet oder kompaktiert und so werden Hohlräume für weitere Guttaperchastifte („accessory cones“) geschaffen. Dieser Arbeitsschritt wird nun mehrmals wiederholt, etwa jeder zweite Guttaperchastift wird dabei mit Sealer beschichtet. Die Guttaperchastifte werden mit seitlich-apikalwärts gerichtetem Druck („kalte laterale Kondensation“) gegeneinander verformt. Um ein Überpressen zu vermeiden, wird der Spreader niemals auf volle Arbeitslänge in den Kanal eingebracht. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich der kleinste Spreader weniger als die Hälfte der Arbeitslänge einbringen lässt. Mit einem Hitzeplugger werden die überstehenden Guttaperchastifte 2-3 mm unterhalb des Kanaleingangs abgetrennt [41].

Vorteile dieser Technik sind die gute Längenkontrolle, der geringe Anteil an Sealer sowie das geringe Risiko der Überfüllung. Nachteilig ist anzuführen, dass bei zu starker Kraftanwendung

das Risiko einer Wurzellängsfraktur erhöht ist [42, 43], außerdem ist die Methode zeitaufwendiger und das Abfüllen akzessorischer Seitenkanäle ist nicht garantiert [44].

2.3.2.2.2 Einstifttechnik

Auf der Suche nach einer vereinfachten Methode, das Wurzelkanalsystem möglichst dicht zu füllen, wurde die Einstifttechnik, die auch als Zentralstifttechnik oder „Single-cone“-Technik bezeichnet wird, eingeführt. Als Füllstift werden dabei Guttaperchastifte verwendet. Der Stift wird dabei mit Sealer beschichtet auf volle Länge in den Kanal eingeführt. Apikal sollte er dieselbe ISO-Größe aufweisen wie das letzte Wurzelkanalinstrument der Aufbereitung. Mit der „single-cone“-Technik wird erreicht, dass der Stift so in den Kanal eingebracht wird, dass der gesamte Kanal dicht abgefüllt ist. Inhomogenitäten zwischen Kanalwand und Guttaperchastift werden mit dem Sealer aufgefüllt.

Vorteile der Einstifttechnik sind die schnelle und einfache Durchführung sowie die gute Längenkontrolle. Sie sollte allerdings nur angewandt werden, wenn wir klinisch eine Formkongruenz zwischen präpariertem Wurzelkanal und Wurzelstift erreichen. Bei allen Kanälen, die jedoch nicht der Form der Stifte entsprechen, werden randständige Hohlräume nicht komplett aufgefüllt, bzw. der Sealeranteil wäre in diesen Bereichen sehr groß. Auch werden Seitenkanäle nicht bzw. nur ungenügend ausgefüllt [45].

2.3.2.2.3 Thermomechanische Kompaktion

Bei der McSpadden-Technik werden Guttaperchastifte durch einen mit ca. 800 Umdrehungen/Minute rotierenden Kompaktor (McSpadden-Kompaktor) mechanisch erwärmt und erweicht und so nach lateral und apikal gepresst. Beim Kompaktor handelt es sich um eine umgekehrte Hedströmfeile, dessen Schneidekanten Richtung Instrumentenspitze gerichtet sind. Vorteile dieser thermomechanischen Fülltechnik ist die kurze Arbeitszeit und die Möglichkeit, auch irreguläre Kanalmorphologien abzufüllen [46, 47].

Nachteile bei dieser Füllmethode sind häufiges Überfüllen, starke Hitzeentwicklung, das Risiko der Inhomogenität, die Gefahr der Fraktur des Kompaktors und eine weitere mögliche Wurzelkanalaufbereitung durch den Kompaktor während der Obturation [48, 49].

System A (PacMac, Kerr, Karlsruhe) ist eine Modifikation der McSpadden-Technik durch Verwendung eines NiTi-Kompaktors bei 20.000-25.000 Umdrehungen/Minute [2].

2.3.2.2.4 Warm vertikale Kompaktion

Herbert Schilder entwickelte im Jahr 1967 die Technik der warm vertikalen Kompaktion zur dreidimensionalen Wurzelfüllung, welche auch „Schilder-Technik“ genannt wird [50].

1987 wurde sie von L. Steve Buchanan modifiziert und vereinfacht und als „continuous-wave-of-condensation-technique“ bekannt [51].

Nachfolgend soll die Schilder-Technik beschrieben und die Unterschiede zur „continuous-wave-of-condensation-technique“ nach Buchanan erläutert werden.

Nach der chemomechanischen Aufbereitung wird der Wurzelkanal getrocknet und für die Wurzelfüllung vorbereitet. Der Mastercone, welcher eine Klemmpassung („tug back“) aufweisen soll, wird mit Sealer beschichtet in den Kanal eingebracht. Bereits vorher soll das Einmessen der Handplugger in den Wurzelkanal erfolgen. Die Größe des Handpluggers soll so gewählt werden, dass der Plugger ohne Kontakt zur Kanalwand bis apikal vordringen kann. So werden Spannungen vermieden und das Frakturrisiko wird verringert.

Der Mastercone wird nach Einbringen mit einem Hitzeplugger 3-5 mm vor dem Apex gekürzt. Dieser sog. „Downpack“ zeigt die Unterschiede zwischen der Schilder-Technik und der modifizierter Schilder-Technik: In der Schilder-Technik erfolgt dies in mehreren einzelnen Schritten, wobei nach jedem abgetrennten Stück Mastercone das Kompaktieren der Guttapercha mit dem Handplugger erfolgt. Hier wird die Guttapercha durch den ausgeübten Druck verdichtet und somit auch in laterale Seitenkanäle gedrückt [17].

Buchanan kürzt den Downpack in der „continuous-wave-of-condensation-Technik“, indem er das Abtrennen des Mastercones in einem Schritt beschreibt. So wird in einer einzelnen Bewegung der Hitzeplugger unter kontinuierlicher Hitzezufuhr bis auf 3-5 mm vor dem Apex, dem sog. „Binding Point“, geschoben [52].

Im letzten Schritt des Downpacks wird der Hitzeplugger zehn Sekunden ohne Hitzezufuhr im Wurzelkanal belassen und anschließend erneut eine Sekunde erhitzt, um den Mastercone zu durchtrennen und den weiter koronal gelegenen Teil des Mastercones aus dem Kanal herauszuziehen. Die Guttapercha haftet an dem kurzzeitig erhitzten Hitzeplugger. Der „tug back“ hält den apikalen Teil im Kanal. Während der Abkühlphase soll der Hitzeplugger mit apikalwärts gerichtetem Druck auf der Guttapercha aufliegen, um der Schrumpfung der Guttapercha entgegenzuwirken. Dieser Schritt wird „Separation burst“ bezeichnet.

Im Backfill wird nun der mittlere und koronale Anteil des Wurzelkanals mit der Injektionstechnik gefüllt. Dabei wird mittels einer Injektionskanüle eine auf 180-200°C erwärmte Alpha-Guttapercha in den Kanal injiziert. Dabei soll die Applikationskanüle die

jeweils letzte Downpack-Schicht bzw. die zuletzt eingebrachte Guttapercha berühren, um ein Verschmelzen der einzelnen Schichten zu ermöglichen. Auch hier soll während des Auskühlens Druck auf die bereits eingebrachte Guttapercha mit einem Handplugger ausgeübt werden, um der thermischen Schrumpfung entgegenzukommen und um das Ausfließen der Guttapercha in Ramifikationen zu ermöglichen [53].

Vorteile der vertikal kompaktierten Wurzelfüllungen sind eine sehr gute Wandständigkeit und Dichtigkeit. Auch komplizierte Kanalmorphologien können mit dieser Füllmethode zufriedenstellend durchgeführt werden [54].

Nachteil der warm vertikalen Kompaktion ist die Gefahr der Überpressung von Wurzelfüllmaterial über den Apex hinaus [55].

Eine Überfüllung wirkt sich negativ auf die Prognose der Wurzelkanalbehandlung aus [56].

2.3.2.2.5 Guttapercha-Injektionstechnik

Bei dieser Wurzelfülltechnik wird Alpha-Guttapercha extraoral erwärmt und mit Injektionskanülen verschiedener Dicke in den Wurzelkanal injiziert. Diese Technik ist als alleinige Füllmethode nur geeignet zur Obturation schwieriger Kanalsysteme und gilt als Modifikation der warm vertikalen Obturation. Außerdem benötigt sie manuelle Kondensation zum Ausgleich der Abkühlungskontraktion. Nachteilig ist anzuführen, dass der Behandler ein hohes Risiko des Überpressens von Wurzelfüllmaterial trägt, da die Arbeitslänge nicht kontrolliert werden kann [57].

Beispiele hierfür sind Obtura[®] (Obtura Spartan, Fenton, USA), Ultrafil[®] (Hygienic/Coltene; Ohio, USA), Elements Obturation Unit[®] (Sybron Endo, Orange, USA) oder Beefill[®] (VDW, München, Deutschland).

2.3.2.2.6 Trägerbasierte Wurzelfülltechniken

Die trägerbasierten Wurzelfüll-Techniken gehören zu den Wurzelfülltechniken mit warmer Guttapercha.

Diese Wurzelfülltechnik wurde erstmals im Jahre 1883 durch Dr. Sanford Perry beschrieben und angewandt. Er verwendete mit Guttapercha ummantelte Golddrähte, um Kanäle vollständig und dreidimensional zu füllen [58]. 1925 folgte Dr. Ronald Pennycuik Perry's Idee und nutzte durch Silberdrähte versteiftes Guttapercha zur Wurzelkanalfüllung. 1929 wurden durch Dr.

Trebitsch Silberstifte verwendet, welche durch Dr. Elmer Jasper 1933 standardisiert wurden [59].

Weitere Modifikationen der Guttapercha-ummantelten Silberstifte wurden durch Dr. S.E. Welch 1978 und Negm et al. 1980 („Silver-Percha“) vorgestellt [60, 61].

Dr. Johnson beschrieb 1978 erstmals einen mit Guttapercha ummantelten Metallträger, welcher im Wurzelkanal eingebracht wird [62]. 1984 wurden erstmals mit Guttapercha ummantelte Kunststoffträger mit dem Namen Thermafil[®] produziert [63]. Weiterentwicklungen waren die 2014 vorgestellten trägerbasierten Obturationssysteme Guttacore[®] und Guttafusion[®], deren Kernmaterial aus kreuzvernetzter Guttapercha besteht

Der Thermafilträger besteht aus einem flexiblen Kunststoffträger, welcher mit Alpha-Guttapercha ummantelt ist. Thermafil ermöglicht die Füllung lateraler Kanäle effektiver als mit der kalten lateralen Kondensation [64, 65], außerdem dringt weniger Flüssigkeit in mit Thermafil gefüllten Kanälen ein, als in Kanälen, die mit der lateralen Kondensationstechnik gefüllt wurden [66].

Der Guttafusionsträger besteht im Inneren aus kreuzvernetzter Guttapercha. Die Vernetzung stellt ein chemisches Verfahren zur Querverbindung von Polymerketten dar, was dem Träger Widerstandsfähigkeit und Stabilität verleiht. Der Träger ist von Alpha-Guttapercha ummantelt. Die erwärmte fließfähige Guttapercha wird durch den Träger in das gesamte Wurzelkanalsystem kondensiert.

Beide Träger werden „chairside“ in einem Ofen erwärmt und anschließend in den Wurzelkanal eingebracht. Die Größe des Trägers wird vorher mit einem Prüfinstrument (Verifier) aus Nickel-Titan röntgenologisch ermittelt. Außerdem werden die Wurzelkanalwände vorher mit einem geeigneten Wurzelfüllsealer bestrichen. Beim Einbringen des Trägers soll der Obturator langsam in den Kanal eingeführt werden. So soll verhindert werden, dass sich die erwärmte Guttapercha vom Träger abstreift und nur der Kern des Obturators den apikalen Kanalanteil erreicht. Der Thermafilträger wird nach einer kurzen Abkühlphase mit rotierenden Instrumenten oder scharfen Handinstrumenten auf Höhe des Kanaleingangs abgetrennt. Der Griff des Guttafusionsträgers kann hingegen durch Biegen von einer Kanalwand zur anderen vom Schaft abgetrennt werden. Die Revision von Wurzelkanalfüllungen mit trägerbasierten Wurzelfüll-Techniken kann sich als problematisch herausstellen, da der stabile Träger im gekrümmten Kanal verklemmen und bei der Revision abbrechen kann [67].

Alle beschriebenen warmen Fülltechniken weisen jedoch ein gemeinsames Problem auf: Die Wärmeentwicklung auf der Wurzeloberfläche während des Obturationsprozesses und der damit

verbundenen Gefahr der irreversiblen Schädigung des parodontalen Halteapparats und des umliegenden Knochens.

2.4 Studienübersicht zur Wärmeentwicklung auf der Wurzeloberfläche

Eriksson et al. waren die Ersten, die sich dieser Problematik widmeten: Sie stellten 1983 in ihrer Studie fest, dass eine Erwärmung der Wurzeloberfläche über 47°C für fünf Minuten zu irreversiblen Schäden am Knochengewebe führt [68]. Eine Temperaturerhöhung von über 10°C am periradikulären Gewebe wird in der Literatur übereinstimmend als gewebeschädigend beschrieben [68-72].

Eine Erhitzung über 53°C über eine Minute führt zur Denaturierung der Alkalinphosphate und somit zu irreversiblen Knochenschäden [73]. Eine Erwärmung des Knochens über 60°C führt zur definitiven Knochennekrose [73, 74].

Ein Großteil der Studien zur Temperaturmessung an der Wurzeloberfläche wurde bis 1997 mittels Kontaktthermometer durchgeführt [69, 70, 75-81]. Hussey et al. waren die Ersten, die eine Infrarotkamera in der dentalen Forschung benutzt haben. Sie maßen die Wurzeloberflächentemperatur über die gesamte Wurzellänge während der Stiftbohrung. In der Folgezeit erschienen weitere Studien, in denen die Temperaturmessung der Wurzeloberfläche mit einer Infrarotkamera durchgeführt wurde [49, 78, 82-86]. Die Messung mit der Infrarotkamera ist eine non invasive, kontaktlose Methode, um den Punkt mit der höchsten Temperatur („Hot-Spot“) der Wurzeloberfläche zu messen und über den Zeitraum des Versuchs zu verfolgen. Dabei müssen im Vergleich zur Temperaturmessung mit Kontaktthermometern keine Messfühler an die Zahnwurzel geklebt oder angebracht werden.

Bei diesem Messverfahren wird die Intensität der Infrarotstrahlung, die von einzelnen Punkten auf dem Objekt ausgeht, gemessen und als Maß für die Temperatur aufgezeichnet. Bei Emissionsgrad = 1 (Idealfall, höchster Wert) entspricht das Spektrum der ausgesandten Strahlung dem eines schwarzen Strahlers. Der schwarze Strahler absorbiert und emittiert Wärmestrahlung vollständig ($100\%/100\% = 1$) [87].

Der Emissionsgrad der Zahnoberfläche wurde in verschiedenen Studien unterschiedlich festgesetzt. Lipski et al. und Ulusoy et al. verwendeten in ihren Versuchsreihen für die Temperaturmessung der Wurzeloberflächen den Emissionsgrad 0,91 [84, 88], Diegritz et al. legten den Emissionsgrad für die Wurzeloberfläche bei 0,9 fest. [89].

Kells et al. setzten den Emissionsgrad für Schmelz bei 0,65 an [90].

Versuchsreihen zur Temperaturmessung an der Wurzeloberfläche wurden bereits an Zahnmodellen [76] oder Tierversuchen [91, 92] durchgeführt.

Zahlreiche Studien untersuchten die Wärmeentwicklung auf die Wurzeloberfläche nach Obturation mit trägerbasierten Systemen [82, 86, 93-95].

Andere Studien untersuchten die warm vertikalen Methoden und deren Auswirkungen auf die Wärmeentwicklung der Wurzeloberfläche [63, 70, 75, 76, 80, 81, 84, 96-99].

Studien, welche den Emissionsgrad auf der Oberfläche der trägerbasierten Systeme Guttafusion oder Thermafil bestimmten, sowie Studien, welche den Einfluss des Emissionsgrades auf die Messergebnisse überprüften, sind keine bekannt.

Es existieren keine Studien zur Temperatur an der Oberfläche von Thermafil- und Guttafusionsträgern nach Entnahme aus dem jeweiligen Ofen.

Außerdem wurden bis dato keine Studien veröffentlicht, in denen die finale Aufbereitungsgröße des Zahnes, die ISO-Größe des Obturators und die Variable Zahn variiert wurden und als Folge die Temperaturerhöhung auf der Wurzeloberfläche miteinander verglichen werden konnte. Vergleiche zwischen den trägerbasierten Obturationssystemen Thermafil und Guttafusion und dem Obturationssystem Super Endo α/β [®] (B&L BioTech, Ansan, Südkorea) wurden bisher keine angestellt.

3. Ziele der Studie

Im ersten einführenden Teil der Arbeit wurden die Systeme Guttafusion und Thermafil untersucht. In diesen Vorversuchen wurde der Maximaltemperaturverlauf des jeweiligen Obturators nach Entnahme aus dem Ofen aufgezeichnet und die Zeitdauer gemessen, in der sich der jeweilige Träger über 64°C befunden hat.

Ziele der Vorversuche waren die Widerlegung/Bestätigung folgender Ausgangshypothesen:

1. Die Anpassung des Emissionsgrades hat keinen Einfluss auf das Messergebnis.
2. „Tmax“ und die Dauer, in der der jeweilige Träger Temperaturen über 64°C annimmt, sind abhängig von der Art sowie der ISO-Größe des Obturators.
3. „Tmax“ und die Dauer, in der der Guttafusionsträger Temperaturen über 64°C annimmt, sind abhängig von der Einstellungsstufe des Guttafusion-Ofens.
4. „Tmax“ und die Dauer, in der der Thermafilträger Temperaturen über 64°C annimmt, sind abhängig von der Dauer, die der Träger nach dem 1. Signalton im Ofen belassen wird.

Im zweiten Teil der Arbeit, den Hauptversuchen, wurde der Maximaltemperaturverlauf von extrahierten Zähnen während der Wurzelfüllung gemessen. Die Füllmethoden waren Thermafil, Guttafusion sowie die warm vertikale Kompaktion mit Super Endo α/β .

Ziele der Hauptversuche waren die Widerlegung/Bestätigung folgender Ausgangshypothesen:

1. „Tmax“ und „ ΔT “ sind unabhängig von der Variable Zahn.
2. „Tmax“ und „ ΔT “ sind unabhängig von der ISO Größe.
3. „Tmax“ und „ ΔT “ sind abhängig von der Art des Obturators/Füllmethode.
4. Die Zeit, in der die Wurzeloberfläche Temperaturen über 47°C bzw. 53 °C annimmt und die Zeit bis zum Erreichen der Körpertemperatur 37°C sind abhängig von der Art des Obturators und der ISO-Größe.
5. Die Zeit während der warm vertikalen Obturation, in der die Wurzeloberfläche Temperaturen über 60°C annimmt, ist abhängig von der ISO-Größe.

4. Material und Methode

4.1 Versuchsaufbau

Die Messungen wurden unter standardisierten Bedingungen in einer für diese Studie angefertigten Plexiglasbox mit den Abmessungen 65 cm x 36 cm x 37,5 cm durchgeführt (Abb. 2). Die Dicke des Plexiglasses beträgt 5 mm. Diese Box wurde mit schwarzer Folie ausgekleidet, um Lichtreflexionen zu verhindern und Messfehler damit zu minimieren. An der Außenseite wurde außerdem ein zweiwelliger schwarzer Karton angebracht.



Abb. 2: Mit schwarzer Folie ausgekleidete Versuchsbox aus Plexiglas

Die Box besitzt eine runde Öffnung mit einem Durchmesser von 4 cm in einer Höhe von 15 cm, durch die die Wärmebildkamera passgenau geführt wird und so positionsgetreue Messungen ermöglicht. Verwendet wurde hier die Infrarotkamera thermoIMAGER TIM 450 (Micro-Epsilon Messtechnik, Ortenburg, Deutschland). Auf der linken und rechten Stirnseite der Kameraöffnung wurden auf einer Höhe von 14,5 cm quadratische Öffnungen mit einer Seitenlänge von 16,5 cm geschaffen. Diese Öffnungen dienen dazu, mit den Händen in der Box arbeiten zu können, d.h. die Zähne in der Halterung zu positionieren und den Obturationsvorgang durchzuführen. Die Aussparungen wurden von der Innenseite mit flexiblen eingeschnittenen Silikonflächen verkleidet. Sie dienen dazu, während der Arbeitsvorgänge den Luftzug und eventuelle Temperaturveränderungen durch Luftaustausch zu verhindern und dadurch zwangsläufig verursachte Messfehler auf ein Minimum zu beschränken. Außerdem sind die Öffnungen von außen durch den zweiwelligen schwarzen Karton verschließbar.

Auf der Oberseite der Box wurde ein Rechteck mit den Maßen 25,5 cm x 13 cm aus der schwarzen Folie sowohl auf der Innen- als auch auf der Außenseite entfernt. Durch dieses nicht mit schwarzer Folie ausgekleidete Rechteck konnten die Vorgänge in der Box visuell kontrolliert werden und ein genaues Arbeiten unter Sicht wurde ermöglicht. Auch diese nicht verkleidete Stelle im Plexiglas ist von außen durch ein genau in die Fläche passendes Rechteck aus schwarzem Karton (Maße: 25,5 cm x 13 cm) verschließbar.

Eine verkleidete Spanplatte (OBI, Vahn, Italien) mit den Maßen 100 cm x 50 cm bildete den eigentlichen Versuchsboden. Die nach unten offene Plexiglasbox konnte mit Hilfe eines an der Oberseite der Box befestigten Griffs bei Bedarf von der Spanplatte abgenommen werden. An der Spanplatte wurde eine selbst konstruierte Halterung aus verkleideten Plastikleisten für die Zähne fixiert. Der jeweilige Zahn wurde vor jedem Versuch im Bereich der Krone in eine Matrize nach Tofflemire (Omnident, Rodgau, Deutschland) eingespannt (Abb. 3). Die Zahnwurzel, also die eigentlich zu messende Fläche, ragte in das Messfeld der Infrarotkamera hinein. Außerdem wurde ein Mini-Keramikheizer (GO/ON, Hagebaumarkt, Soltau, Deutschland) auf der Spanplatte fixiert, durch den die Temperatur in der Versuchsbox auf Körpertemperatur erwärmt werden konnte (Abb. 4).

Die Messungen der einzelnen Versuche wurden durch die Infrarotkamera aufgenommen und konnten am Bildschirm durch die Software TIMconnect (Micro-Epsilon Messtechnik, Ortenburg, Deutschland) überwacht werden.

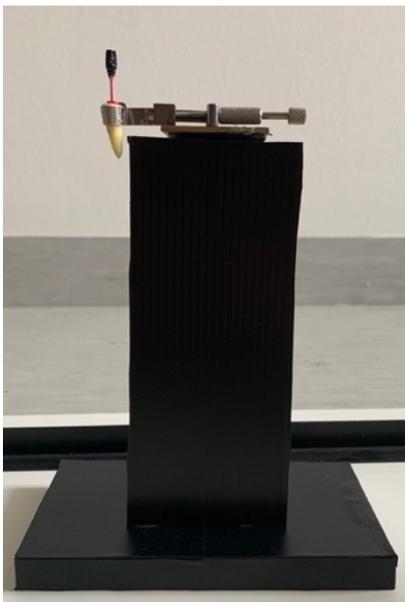


Abb. 3: Konstruierte Halterung für den jeweiligen Versuchszahn



Abb. 4: Versuchsaufbau nach Abnahme der Versuchsbox

4.1.1 Auswahl der Zähne

Für die Hauptversuche wurden 90 humane einwurzelige Prämolaren verwendet. Zähne, die aus verschiedenen Gründen (starke Verblockung des Kanals, Zähne mit offenem Apex, Zähne kürzer als 18 mm) nicht für die Versuchsreihe geeignet waren, wurden ersetzt.

Die Zähne wurden auf die drei Untersuchungsgruppen A, B und C mit jeweils 30 Zähnen entsprechend ihrer äußeren Wurzelanatomie aufgeteilt. Die Zähne wurden nach der Extraktion von Geweberesten (parodontaler Halteapparat, Knochen) mit Schallscaler und Küretten entfernt. Anschließend wurden sie in einer 0,9%igen NaCl-Lösung (Fresenius Kabi Deutschland GmbH, Bad Homburg, Deutschland) aufbewahrt.

4.1.2 Vorbereitung der Zähne

Um die Versuchsdurchführung zu vereinheitlichen, wurden alle Zähne von okklusal gekürzt und ein Plateau geschaffen. Danach wurden die Zähne koronal auf 18 mm gekürzt, um eine weitere Vereinheitlichung der Untersuchungsgruppen zu erzielen. Somit wurde erreicht, dass nicht nur Obturatoren, sondern auch Handfeilen, Aufbereitungsinstrumente und Papierspitzen alle auf dieselbe Länge (Arbeitslänge) eingestellt werden konnten. Diese Arbeitslänge betrug für alle 90 Zähne 18 mm.

Die Zähne wurden mit einem diamantierten Zylinder (Komet Dental, Lemgo, Deutschland) der Größe 014 trepaniert. Anschließend wurde die Gängigkeit mit einer C-Pilotfeile (VDW GmbH, München, Deutschland) der ISO-Größe 010 überprüft. Für die Hauptversuche wurden jeweils 30 Zähne in drei Gruppen eingeteilt (Gruppe A, B und C). Gruppe A enthielt 30 Zähne mit einem auf ISO 025 aufbereiteten Wurzelkanal. Ebenso wurden Gruppe B (auf ISO 040 aufbereiteter Wurzelkanal) und Gruppe C (auf ISO 050 aufbereiteter Wurzelkanal) jeweils 30 Zähne zugeteilt. Die Auswahl der Zähne erfolgte nicht zufällig, sondern nach den anatomischen Gegebenheiten des jeweiligen Wurzelkanals. Wurzelkanäle, welche mit einer K-Feile der Größe ISO 015 (VDW GmbH, München, Deutschland) nicht bis Arbeitslänge gängig waren, wurden nach Aufbereitung Gruppe A (Zähne mit ISO 025) zugeteilt. Alle anderen Zähne, welche mit einer K Feile der Größe ISO 015 problemlos die jeweilige Arbeitslänge erreicht haben, wurden den Gruppen B und C zugeteilt. Zähne mit Wurzelkanälen, die mit einer K-Feile ISO 025 problemlos die Arbeitslänge erreicht haben (Kontrolle unter Sicht) wurden der Gruppe C zugeteilt, alle anderen der Gruppe B. So wurde versucht, die individuell unterschiedlichen Wurzelendindicken zu berücksichtigen.

Die Aufbereitung erfolgte maschinell mit Reciproc blue[®] (VDW GmbH, München, Deutschland).

Zum Herausspülen der Debris wurde nach jedem Instrumentenwechsel mit 3%igem NaOCl (Wunderlichs Apotheke, München, Deutschland) gespült. In schwer gängigen Kanälen wurde die Aufbereitungsfeile mit Glyde EDTA-Gel (Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland) beschichtet. Außerdem wurde nach jedem zweiten Instrumentenwechsel die Gängigkeit manuell mit einer K-Feile der Größe ISO 015 überprüft.

Nach der maschinellen Aufbereitung wurde der Wurzelkanal mit einer 0,9%igen NaCl-Lösung gespült und zur Aufbewahrung in einem Behälter mit einer 0,9%igen NaCl-Lösung verschlossen.

4.2 Obturationssysteme

Für die Vor- und Hauptversuche wurden zwei verschiedene trägerbasierte Obturationssysteme untersucht: Guttafusion[®] (VDW GmbH, München, Deutschland) und Thermafil[®] (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz). In den Hauptversuchen wurden die Zähne zusätzlich noch mit einem System für die warm vertikale Obturation nach Schilder, dem Super Endo α/β (B&L BioTech, Ansan, Südkorea), verglichen.

4.2.1 Guttafusion[®] (VDW Dental)

Der Guttafusionsträger wird vor Erwärmen eine Minute lang in einer 3%igen NaOCl Lösung desinfiziert und anschließend mit einer mindestens 70%igen Alkohollösung ausgewaschen. Der Obturator wird anschließend im Ofen eingehängt und unabhängig der ISO-Größe auf Stufe 1 erwärmt. Nach einem akustischen Signal nach 20 Sekunden wird der Obturator entweder mit der Hand oder mit einer Pinzette aus dem Ofen entnommen und in den Wurzelkanal eingebracht. Der Einsatz einer Pinzette wird bei eingeschränkter Sicht im Seitenzahnbereich empfohlen, ein Führungsriff für die Pinzette erleichtert diesen Vorgang. Nach der Obturation wird der Träger mindestens zehn Sekunden abgekühlt. Anschließend wird der Griff in die Mitte der Kavität gebogen und z.B. mit einem Löffelxkavator abgetrennt. Die verbliebene weiche Guttapercha wird mit einem Handplugger kompaktiert.



Abb. 5: Guttafusionofen [B]



Abb. 6: Guttafusionobturator im Pinzettengriff [C]

4.2.2 Thermafil® (Dentsply Maillefer)

Thermafil-Obturatoren sind in allen ISO Größen von ISO-020 bis ISO-140 erhältlich. Vor der Obturation wird der Kanal mit Papierspitzen getrocknet. Auch die Thermafil-Obturatoren werden nach Entnahme aus der Verpackung in einer 3%igen NaOCl-Lösung für eine Minute desinfiziert. Anschließend wird der Obturator mit einer 70%igen Alkohol-Lösung abgespült und in der Luft getrocknet. Der Hersteller empfiehlt den Einsatz eines geeigneten Sealers, der währenddessen angemischt und in den Wurzelkanal eingebracht werden kann. Der Obturator wird anschließend im Thermaprep-2-Ofen erhitzt. Hier gilt: Nach dem ersten Signalton nach 15 Sekunden ist der Obturator ausreichend erhitzt, um entnommen werden zu können. Sollte dies nicht erfolgen, hält der Ofen den Träger für die nächsten zwei Minuten warm. Dies unterstützt er durch einen akustischen Signalton alle 15 Sekunden.

Nach Entnahme hat der Behandler acht bis zehn Sekunden Zeit, um den Träger mit festem Druck ohne Drehen und Schrauben in den Wurzelkanal einzubringen. Nach dem Obturationsvorgang wird der Thermafilobturator im Kanal belassen und so langsam abgekühlt. Anschließend wird der Trägerschaft mit einem Müllerbohrer oder einem Thermacut-Bohrer abgetrennt [63].



Abb. 7: Thermaprep-2-Ofen [D]



Abb. 8: Thermafilobturatoren [E]

4.2.3 Super Endo α/β [®] (B&L Biotech)

Das Obturationssystem SuperEndo- α/β von B&L Biotech ermöglicht eine warm vertikale Wurzelfüllung. Der SuperEndo α^2 Pen ist ein kabelloser, akkubetriebener Hitzeplugger. Die Temperatur kann direkt am Pen auf 150°C, 180°C, 200°C und 230°C eingestellt werden. Es gibt neun Aufsätze in verschiedenen ISO-Größen und verschiedenen Konizitäten. Für unsere Versuchsreihe wurde ein Hitzeplugger der Größe ISO 40 mit 4% Konizität (Taper) verwendet (40/.04). In den Hauptversuchen wurde die Schilder-Technik angewandt. Dabei wurde der Hitzeplugger (SuperEndo- α^2 Pen) nach Aktivierung in den Kanal eingebracht und ca. 5-10 mm durch die mit „tug back“ eingebrachte Guttapercha geführt. Anschließend wurde sie für ca. zehn Sekunden abgekühlt. Während der Abkühlphase wurde mit dem inaktivierten Hitzeplugger Druck auf die apikal gelegene Guttapercha aufrechterhalten, um der Schrumpfung der Guttapercha entgegenzuwirken. Beim anschließenden „Separation burst“ wurde der Plugger erneut für ca. eine Sekunde aktiviert und so die Guttapercha abgetrennt und aus dem Wurzelkanal entfernt. Mit einem Handplugger wurde die Guttapercha mit apikalwärts gerichtetem Druck kompaktiert. Dieser Schritt wurde zwei Mal durchgeführt. Die B&L SuperEndo- β Pistole ermöglicht die Abfüllung des Kanals in der Backfill-Phase. Dabei wurde erwärmtes Guttapercha direkt mit der Pistole in den Wurzelkanal injiziert [100].



Abb. 9: SuperEndo- β Pistole (links) und SuperEndo- α^2 Pen (rechts) [F]

4.3 Versuchsdurchführung

4.3.1 Kamera

Für Vor- und Hauptversuche wurde eine Infrarotkamera thermoIMAGER TIM 450 (Micro-Epsilon Messtechnik, Ortenburg, Deutschland) verwendet. Mit deren Hilfe ist eine detaillierte

Echtzeit-Analyse des thermischen Verhaltens von Objekten möglich. Die Kamera wird über ein USB-Kabel an einen Computer geschlossen, wo sie über die Auswertungssoftware TIM Connect (Micro-Epsilon, Messtechnik, Ortenburg, Deutschland) gesteuert werden kann. Einstellungen wie Emissionsgrad, Kontraste, Messfeld und Auflösung des „Hot-Spots“ werden in der Software eingestellt. Im Unterschied zu herkömmlichen Kameras empfangen Wärmebildkameras Infrarotstrahlung. Die Kamera von Micro-Epsilon empfängt einen Spektralbereich im mittleren bis langwelligen Infrarotbereich, also von 7,5 - 13 μm . Der Temperaturbereich von -20°C bis 900°C kann erfasst werden.

Der Emissionsgrad ist abhängig vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit des Objekts. Jedes Objekt besitzt einen spezifischen Emissionsgrad.

Der spezifische Emissionsgrad eines Objekts kann mit Hilfe eines berührenden Thermofühlers ermittelt werden. Dieser wird an das zu messende Objekt befestigt. Gleichzeitig wird mit der Wärmebildkamera dasselbe Objekt aufgenommen und der Emissionsgrad in der Software so lange verändert, sodass die vom Infrarotmessgerät gemessene Temperatur mit dem Messwert des Thermoelements übereinstimmt. Zur Feststellung des Emissionsgrades wurde das Kontaktthermometer PL-120 T1 (Voltcraft, Wollerau, Schweiz) verwendet.



Abb. 10: Infrarotkamera thermoIMAGER TIM 450 [G]

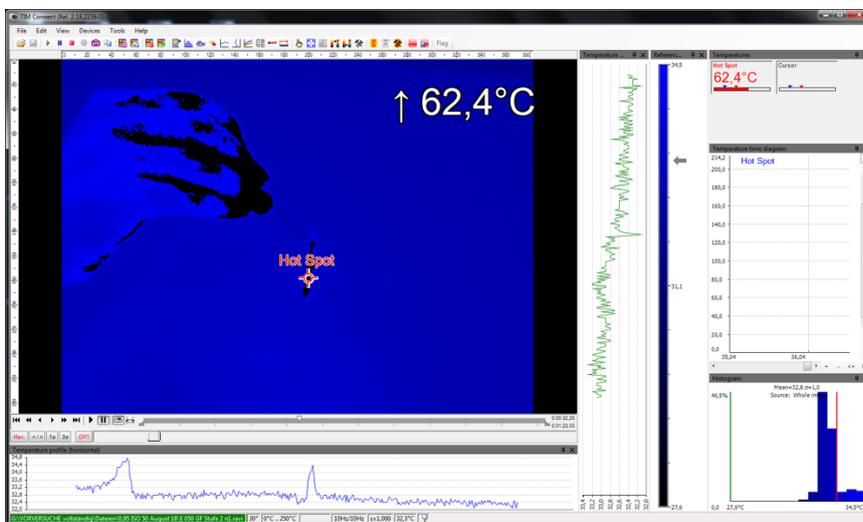


Abb. 11: Bildschirmaufnahme der Auswertungssoftware TIM Connect

4.3.2 Temperaturmessungen an der Oberfläche des Obturators

In diesen Vorversuchen wurden die Systeme Thermoafil (Dentsply Maillefer) und Guttafusion (VDW Dental) untersucht.

Im Vorfeld der Versuche wurden mit Hilfe des Kontaktthermometers der Emissionsgrad auf 0,95 festgesetzt. Die Messungen wurden außerdem zum Vergleich mit der Standardeingabe Emissionsgrad = 1 durchgeführt. Die Obturatoren wurden direkt nach dem akustischen Signal mit einer Pinzette aus dem Ofen entnommen und in die Plexiglasbox gehalten. Die Zeitspanne zwischen Entnahme aus dem Ofen und der Messung durch die Kamera dauerte zwischen 1,5 und 2 Sekunden. Wurde diese Zeit überschritten, wurde der Versuch wiederholt. Die Infrarotkamera wurde auf den Bereich der Obturatoren ausgerichtet. Über die Kamerasoftware konnte der gesamte Vorgang in Echtzeit aufgezeichnet und im „ravi“-Format gesichert werden. Um auch die entsprechenden Daten aus dem Video ziehen zu können, wurde eine dynamische Suche nach dem „Hot-Spot“, dem wärmsten Messpunkt, ausgewählt. Der „Hot-Spot“ bewegt sich während der Aufnahme in Abständen von 0,03 Sekunden automatisiert auf den wärmsten Punkt des Messfelds. Zu jedem Zeitpunkt der Aufnahme kann ermittelt werden, wo der Obturator gerade seine höchste Temperatur hat. Außerdem ermöglicht es die Software, die Temperaturdaten des „Hot-Spots“ als Temperatur-Zeit Diagramme im „dat-Format“ zu speichern und für die weitere Datenverarbeitung in Microsoft Excel (for Mac) zu übertragen.

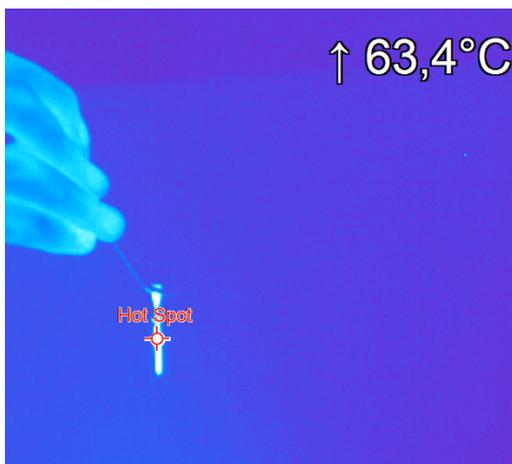


Abb. 12: „Hot-Spot“-Messung am Guttafusionobturator der ISO-Größe 025

Mit diesen Daten kann der Temperaturverlauf des „Hot-Spots“ stellvertretend für das gesamte Objekt dargestellt und der Verlauf von Erwärmung/Abkühlung verfolgt werden.

In Abb. 13 ist der Temperaturverlauf des „Hot-Spots“ des Guttafusionsträgers der Größe ISO 050 bei Emissionsgrad 1 (n5) exemplarisch dargestellt.

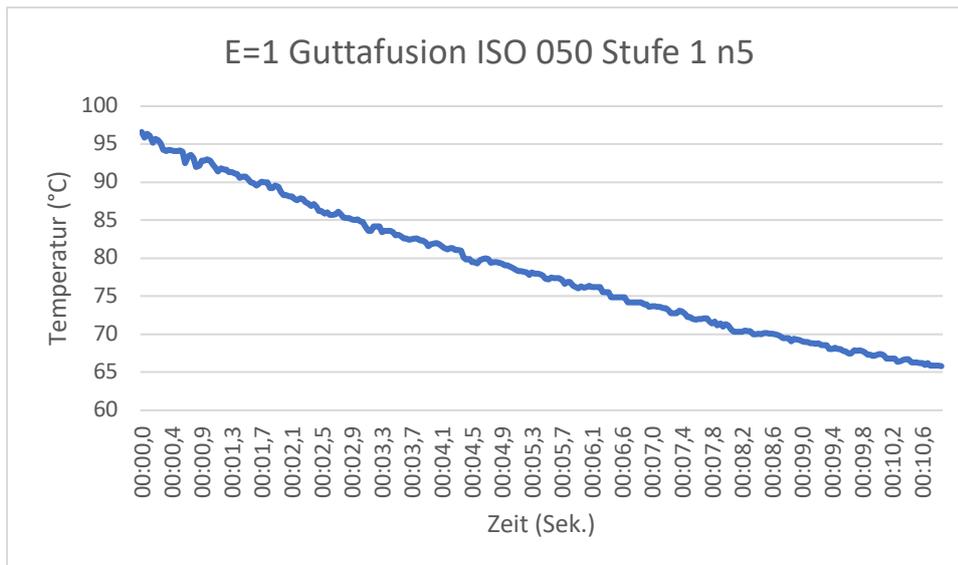


Abb. 13: Temperaturverlauf des Guttafusionobturators der ISO-Größe 050 bei Stufe 1 und Emissionsgrad = 1. Die erhobenen Daten waren die Höchsttemperatur („Tmax“, 96,6°C), sowie die Zeit, in der der Träger Temperaturen über 64°C annahm („Zeit über 64°C“, 11,5 Sekunden).

Bei den Versuchen wurden die Kategorien Emissionsgrad, Obturatorotyp, ISO-Größe des jeweiligen Obturators, Stufe im Guttafusion-Ofen und Zeit, in der der Träger nach dem ersten akustischen Signal im Thermaprep-Ofen belassen wurde, variiert. Die verschiedenen Variablen, unter welchen diese Kategorien aufgenommen wurden, sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Kategorie	Variablen
„Emissionsgrad“	1 0,95
„Obturatorotyp“	Thermafil (TF) Guttafusion (GF)
„ISO-Größe“	025 040 050
„Stufe im Guttafusion-Ofen“	Stufe 1 Stufe 2 Stufe 3
„Zeit nach dem 1. Signalton im Thermaprep-Ofen“	0 Sekunden 15 Sekunden 30 Sekunden 60 Sekunden 90 Sekunden 120 Sekunden

Tabelle 1: Kategorien, unter welchen die Messungen in den Vorversuchen aufgezeichnet wurden, mit den jeweils zugehörigen Variablen

Von jeder Messreihe (z.B. Guttafusion bei E=1, ISO-Größe 040, Stufe 1, 10 Messwerte) wurde ein Mittelwert (MW) aus allen Temperaturmaxima gebildet. Anschließend wurden die Varianz und daraus die Standardabweichung (SD) berechnet. Messungen außerhalb der doppelten Standardabweichung wurden exkludiert und wiederholt.

4.3.3 Temperaturmessungen an der Wurzeloberfläche

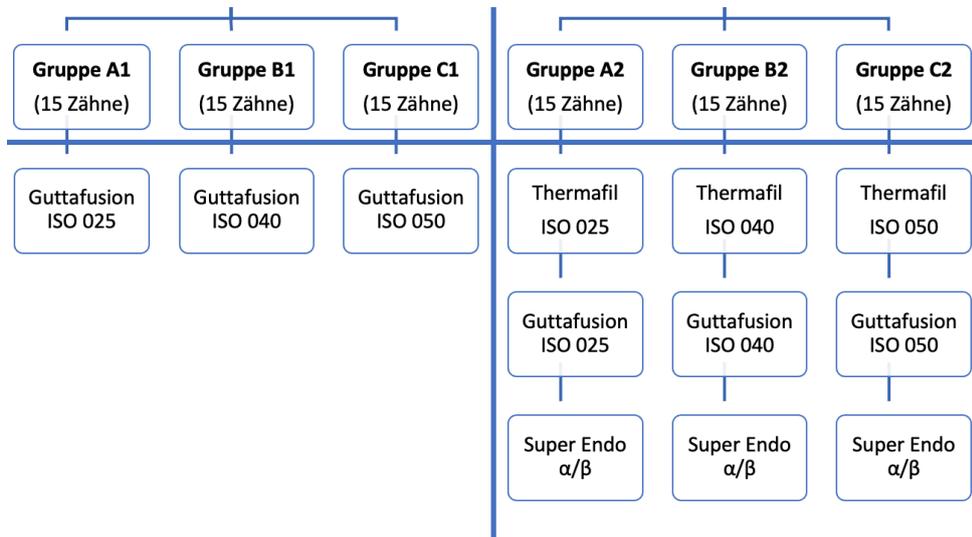


Abb. 14: Einteilung der Versuchszähne in Gruppen mit dem jeweiligen Versuchsprotokoll



Abb. 15: Gruppen A1, B1 und C1 mit den jeweiligen Zähnen 1-15 nach Wurzelfüllung mit Guttafusion

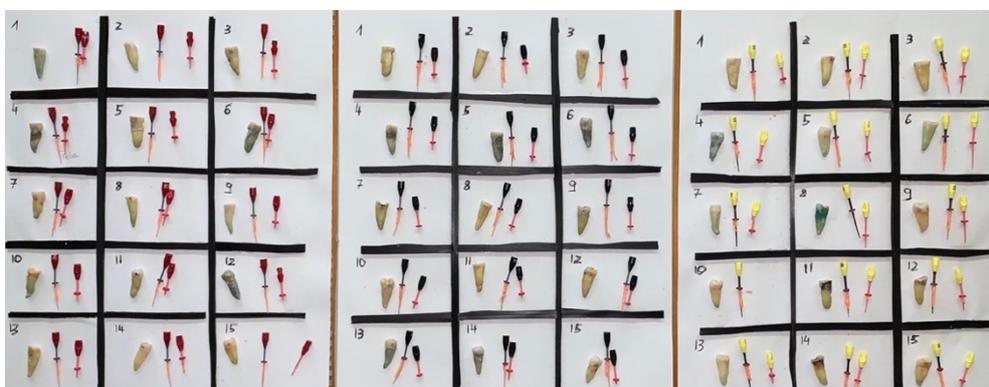


Abb. 16: Gruppen A2, B2 und C2 mit den jeweiligen Zähnen 1-15 nach der Wurzelfüllung mit Super Endo α/β . Rechts davon die vorher abgetrennten Thermafil- und Guttafusionsträger

Die nach Aufbereitungsgröße formierten Gruppen A, B und C wurden randomisiert halbiert, sodass Gruppen zu je 15 Zähnen entstanden: Gruppe A1 und A2 mit auf ISO 025 aufbereiteten Wurzelkanälen, Gruppe B1 und B2 mit auf ISO 040 aufbereiteten Wurzelkanälen und Gruppe C1 und C2 mit auf ISO 050 aufbereiteten Wurzelkanälen.

Die Zähne wurden vor der Versuchsdurchführung aus der 0,9%igen NaCl-Lösung entnommen. Der Wurzelkanal wurde mit Papierspitzen (Roeko, Coltène/Whaledent GmbH & Co. KG, Langenau, Deutschland) getrocknet. Mit einer Papierspitze wurde das Sealmaterial AH Plus® (DentsplyDeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland) in den Kanal eingebracht und mit einer weiteren trockenen Papierspitze verteilt bzw. überschüssiges Sealmaterial entfernt.

Der Zahn wurde anschließend in die in Kapitel 4.1 „Versuchsaufbau“ beschriebene Vorrichtung eingespannt. Die Tofflemire Matrize erfasste dabei den koronaren Teil des jeweiligen Prämolaren, die Wurzel ragte darunter in das Messfeld der Wärmebildkamera. Die Versuchsbox wurde mit einem Heizstrahler vorgewärmt, bis sich der Zahn auf eine Temperatur von ca. 37°C vorgewärmt hat. Anschließend wurden jeweils die 15 Zähne der Gruppen A1, B1 und C1 mit Guttafusion-Obturatoren der ISO-Größen 025, 040 und 050 abgefüllt. Jede Wurzelfüllung wurde von der Wärmebildkamera aufgezeichnet.

Dasselbe Vorgehen wurde bei den 15 Zähnen der Gruppen A2, B2 und C2 mit Thermafil-Obturatoren durchgeführt und aufgezeichnet.

Um den Einflussfaktor Wurzeloberfläche zu eliminieren, wurden die 45 Zähne der Gruppen A2, B2 und C2, welche in der ersten Versuchsrunde mit Thermafil gefüllt wurden, in einer zweiten Versuchsreihe revidiert, gespült, mit Sealer beschichtet und anschließend mit Guttafusion gefüllt. Die Revision der Zähne wurde mit Reciproc blue durchgeführt, gespült wurde mit einer NaCl-Lösung.

In einer dritten Versuchsreihe wurden die 45 Zähne der Gruppen A2, B2 und C2 erneut mit Reciproc blue revidiert, gespült und gereinigt, mit Sealer beschichtet und anschließend warm vertikal mit Super Endo α/β (B&L) gefüllt.

Durch die drei Versuchsreihen wurden 45 Zähne der Gruppen A2, B2 und C2 jeweils in folgender Reihenfolge gefüllt: Thermafil, Guttafusion und Super Endo α/β .

Bei jedem Zahn wurden die aufgezeichneten Daten als „.dat“ Format abgespeichert und in Microsoft Excel übertragen. Hier wurden die Messdaten geprüft bzw. validiert und Diagramme erstellt.

Der spezifische Emissionsgrad der Zähne wurde wie im Kapitel 4.3.1 „Kamera“ beschrieben ermittelt und auf 0,900 festgesetzt. Dieser entspricht dem verwendeten Emissionsgrad in der Publikation Diegritz et al. [89].

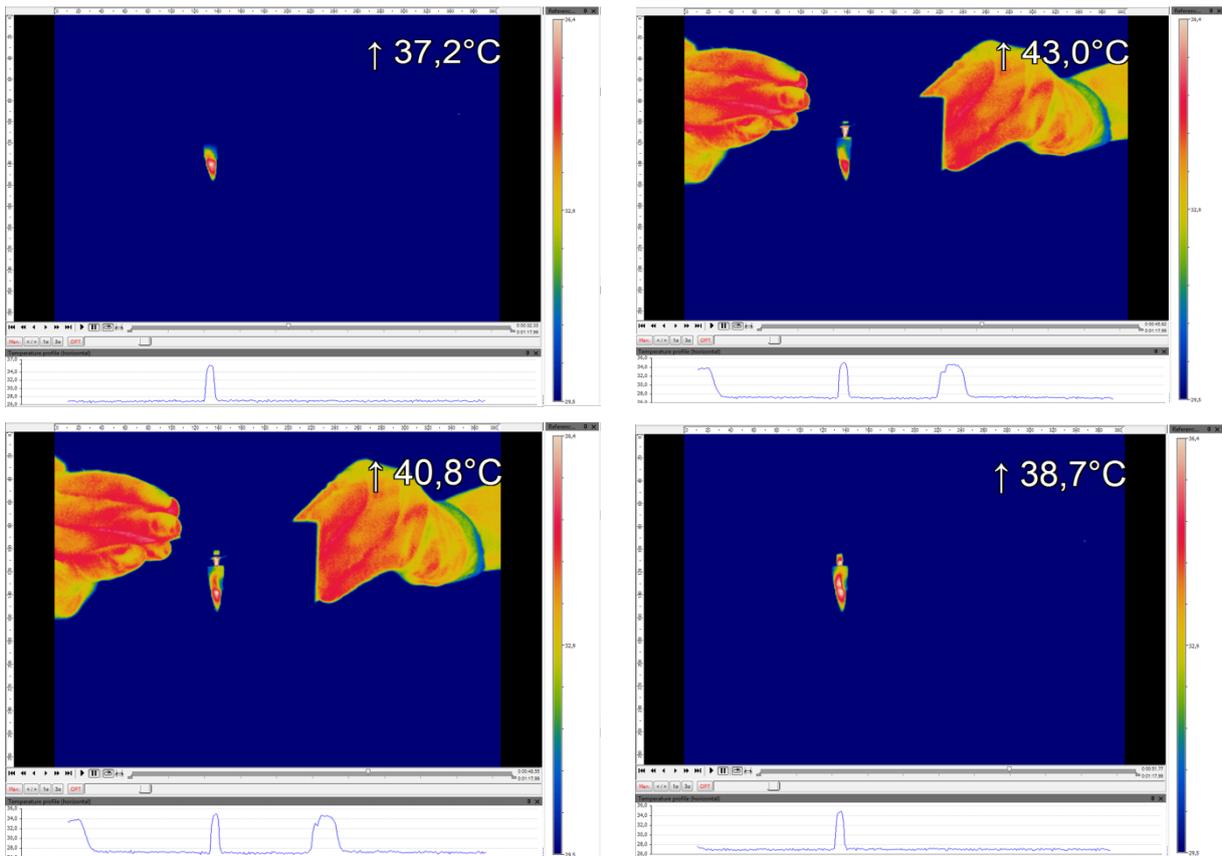


Abb. 17: Aufzeichnung einer Wurzelfüllung mit Guttafusion durch die Kamerasoftware TIMconnect

Abb. 18 zeigt den Temperaturverlauf des „Hot-Spots“ bei der Füllung des Zahns Nr. 14 mit Thermafil (blauer Graph) und Guttafusion (oranger Graph). Beide erreichen ihre Maximaltemperatur „Tmax“ und kühlen danach langsam wieder auf 37°C ab. Erhoben wurde die Maximaltemperatur „Tmax“, die Starttemperatur „Tmin“ und die Differenz von Maximal- und Starttemperatur „ ΔT “. Außerdem wurden die Zeiten erhoben, in denen die Wurzeloberfläche Temperaturen über 47°C bzw. 53°C angenommen haben („Zeit über 47°C“ bzw. „Zeit über 53°C“), ebenso wie die Zeit, welche die Wurzeloberfläche benötigt hat, um wieder auf Ausgangstemperatur 37°C abzukühlen („Zeit bis 37°C“).

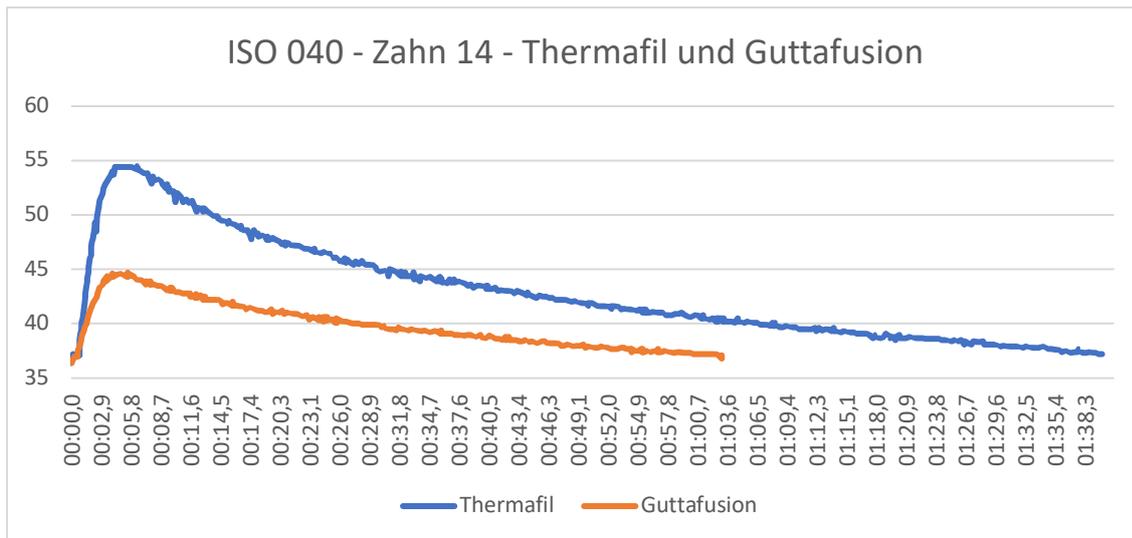


Abb. 18: Temperaturverlauf bei der Wurzelfüllung mit Thermafil (blau) und Guttafusion (orange) exemplarisch am Zahn 14 mit Trägern der ISO-Größe 040

Abb. 19 zeigt den Temperaturverlauf des Zahnes 14 bei ISO 040 bei der warm vertikalen Obturation mit Super Endo α/β .

Die Temperaturkurve erreicht ein erstes Maximum (1) beim initialen Trennen des Mastercones am Kanaleingang. Das zweite und vierte Maximum (2, 4) wird beim Downpack erreicht, wenn der Hitzepluggler aktiviert und 3-5 mm in den Kanal entlang des Mastercones eingeführt wird. Das dritte und fünfte Maximum (3, 5) wird erreicht, wenn der Hitzepluggler erneut aktiviert wird und die Guttapercha an dieser Stelle abgetrennt wird. Das sechste Maximum (6) entsteht beim Backfill.

Außerdem wurde vor jedem der sechs Maxima ein Minimum aufgezeichnet und gemessen. So entsteht für jedes Maximum eine Temperaturdifferenz „ ΔT “, um die sich der Zahn beim jeweiligen Arbeitsschritt erhitzt hat.

Auch wurde für jeden Zahn die Zeit errechnet, in der der Zahn in der längsten Intervalldauer ohne Unterbrechung Temperaturen über 47°C bzw. 53°C bzw. 60°C angenommen hat.

Abschließend wurde die Zeit berechnet, die der Zahn benötigt, um von „Tmax“ auf Ausgangstemperatur abzukühlen („Zeit bis 37°C“).

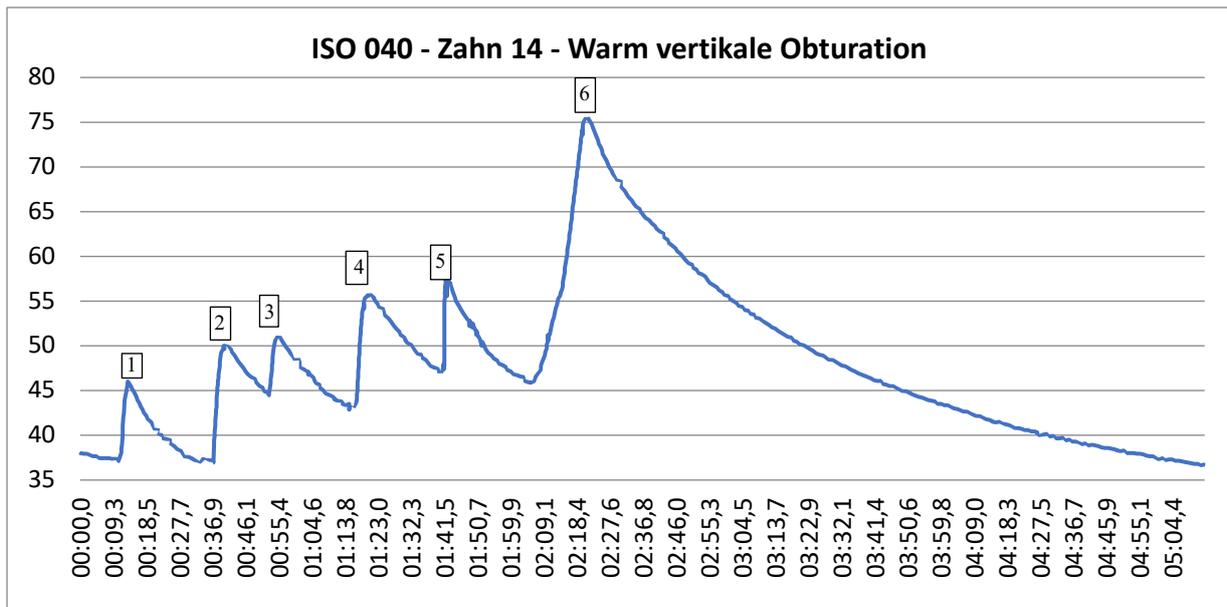


Abb. 19: Temperaturverlauf des Zahnes 14 bei ISO 040 bei der warm vertikalen Obturation mit Super Endo α/β

Zu den oben beschriebenen erhobenen Daten wurden in der dritten Versuchsreihe der Zähne der Gruppen A2, B2 und C2 (warm vertikale Obturation mit Super Endo α/β) noch die Zeiten über 47°C, 53°C und 60°C in ihrer längsten Intervalldauer aufgezeichnet.

Bei den Versuchen wurden die Kategorien „ISO-Größe“, „Zahn“ und die „Obturatorertechnik“ variiert. Die verschiedenen Variablen dieser Kategorien sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Kategorie	Variablen
„ISO-Größe“	025 040 050
„Zahn“	1- 15
„Obturatorertechnik“	TF GF DP+BF

Tabelle 2: Kategorien, unter welchen die Messungen in den Hauptversuchen aufgezeichnet wurden, mit den jeweils zugehörigen Variablen

4.4 Statistische Auswertung

4.4.1 Datenauswertung der Messungen auf der Obturatoroberfläche

Die Werte wurden in SPSS mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test und dem Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung getestet. Werte unterhalb 0,05 ($p < 0,05$) gelten als nicht normalverteilt.

Die Berechnung nicht normalverteilter Werte wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test und dem Mann-Whitney-U-Test durchgeführt, die Berechnung normalverteilter Werte wurde mittels einfaktorieller Anova durchgeführt.

4.4.2 Datenauswertung der Messungen auf der Wurzeloberfläche

Auch in den Hauptversuchen wurden die Daten in SPSS mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test und dem Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung getestet. Werte unterhalb 0,05 ($p < 0,05$) gelten als nicht normalverteilt.

Die Berechnung nicht normalverteilter Werte wurde mit dem Kruskal-Wallis-Test, die Berechnung normalverteilter Werte wurde mittels einfaktorieller Anova durchgeführt.

5. Ergebnisse

5.1 Vorversuche: Ergebnisse der Temperaturmessung an der Obturatoroberfläche

Zu jeder Kategorie-Kombination (z.B. Emissionsgrad=1, Guttafusion, ISO 025, Stufe 1) wurde eine Versuchsreihe von zehn Durchläufen gestartet. Alle „Tmax“-Werte befinden sich in einem Bereich, dessen obere Grenze durch die Addition der doppelten Standardabweichung zum Mittelwert und dessen untere Grenze durch die Subtraktion der doppelten Standardabweichung zum Mittelwert definiert ist.

5.1.1 Guttafusion

5.1.1.1 Guttafusionobturatoren bei Emissionsgrad = 1

5.1.1.1.1 Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025

"Tmax"		MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
ISO 025	Stufe 1	77,34	8,43	93,9	68,9
	Stufe 2	80,06	8,74	92,6	68,5
	Stufe 3	91,29	2,52	95,6	88

Tabelle 3: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 1

"Zeit über 64°C"		MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
ISO 025	Stufe 1	4,62	1,95	8,2	1,2
	Stufe 2	4,62	2,13	7,5	1,4
	Stufe 3	6,66	1,02	8,7	5,3

Tabelle 4: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 1

Guttafusionobturatoren, welche auf Stufe 3 erhitzt werden, werden mit der durchschnittlich höchsten Maximaltemperatur aus dem Guttafusion-Ofen entnommen, gefolgt von Guttafusionobturatoren, welche auf Stufe 2 und auf Stufe 1 erhitzt werden.

Während bei Stufe 1 und Stufe 2 der Träger exakt dieselbe Zeit, 4,62 Sekunden, benötigt, um auf 64°C abzukühlen, hält sich der Guttafusionobturator von Stufe 3 für 6,66 Sekunden über 64°C.

5.1.1.1.2 Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040

"Tmax"		MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
ISO 040	Stufe 1	81,16	4,86	89,9	76,4
	Stufe 2	81,31	5,08	88,9	76,1
	Stufe 3	84,11	4,8	94,2	75,1

Tabella 5: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 1

"Zeit über 64°C"		MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
ISO 040	Stufe 1	6,97	2,14	10,7	4,1
	Stufe 2	7,09	1,86	10,5	4,5
	Stufe 3	7,88	1,53	9,9	5,1

Tabella 6: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 1

Die Maximaltemperatur nimmt bei Stufe 1 und Stufe 2 ähnliche Werte (81,16°C bzw. 81,31°C) an und steigt bei Stufe 3 leicht (84,11°C). Dementsprechend länger hält sich der Träger über 64°C. Durchschnittlich halten sich die Guttafusionobturatoren zwischen 6,97 und 7,88 Sekunden auf Temperaturen über 64°C.

5.1.1.1.3 Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050

"Tmax"		MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
ISO 050	Stufe 1	90,23	4,47	96,6	80
	Stufe 2	83,56	4,58	92,9	77,4
	Stufe 3	91,01	3,45	94,9	84,6

Tabella 7: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 1

"Zeit über 64°C"		MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
ISO 050	Stufe 1	10,39	1,7	12,8	6,6
	Stufe 2	8,23	1,61	11	5,6
	Stufe 3	10,43	1,48	12,6	8

Tabella 8: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 1

Die Maximaltemperatur ist bei Stufe 3 im Mittelwert am höchsten (91,01°C), gefolgt von Stufe 1 (90,23°C) und Stufe 2 (83,56°C). Die Guttafusionobturatoren der ISO-Größe 050 halten sich durchschnittlich zwischen 8,23 und 10,43 Sekunden über 64°C.

5.1.1.2 Guttafusionobturatoren bei Emissionsgrad = 0,95

5.1.1.2.1 Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025

"Tmax"		MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
ISO 025	Stufe 1	90,95	2,98	95,9	87,4
	Stufe 2	90,39	5,59	97,8	82
	Stufe 3	97,89	3,39	103	90,2

Tabella 9: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 0,95

"Zeit über 64°C"		MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
ISO 025	Stufe 1	8,02	1,18	9,6	6,3
	Stufe 2	7,88	1,01	9,6	6,8
	Stufe 3	8,51	0,9	9,5	7

Tabella 10: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 0,95

Guttafusionobturatoren der ISO-Größe 025 erreichen auf Stufe 1 und Stufe 2 erhitzt ähnliche Maximaltemperaturen (90,95°C bzw. 90,39°C). Werden die Träger auf Stufe 3 erhitzt, erreichen sie einen um ca. 7°C erhöhten „Tmax“-Wert. Die durchschnittliche „Zeit über 64°C“ der Guttafusionobturatoren der ISO-Größe 025 beträgt zwischen 7,88 und 8,51 Sekunden.

5.1.1.2.2 Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040

"Tmax"		MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
ISO 040	Stufe 1	90,33	4,41	97,3	84,6
	Stufe 2	87,98	6,29	97,3	79,6
	Stufe 3	95,7	2,06	98,7	90,7

Tabella 11: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 0,95

"Zeit über 64°C"		MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
ISO 040	Stufe 1	9,26	1,49	11,7	5,7
	Stufe 2	8,45	2,9	14,1	4,3
	Stufe 3	11,29	1,51	12,9	8,3

Tabella 12: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 0,95

Auch bei ISO 040 erreicht der Obturator, welcher auf Stufe 3 erhitzt wird, eine höhere Maximaltemperatur (95,7°C) als Obturatoren, welche auf Stufe 1 (90,33°C) bzw. 2 (87,98°C) erhitzt werden. Er hält sich auch durchschnittlich 2,03 Sekunden länger über 64°C als bei Stufe 1 bzw. 2,84 Sekunden länger über 64°C als bei Stufe 2.

5.1.1.2.3 Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050

"Tmax"		MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
ISO 050	Stufe 1	93,48	4,02	98,2	86,7
	Stufe 2	89,74	4,16	93,7	80,5
	Stufe 3	92,57	3,34	96,3	85,9

Tabelle 13: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 0,95

"Zeit über 64°C"		MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
ISO 050	Stufe 1	11,48	1,76	13,6	9,1
	Stufe 2	10,18	1,81	13,6	6,7
	Stufe 3	11,67	1,18	13,4	9,6

Tabelle 14: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 0,95

Die Obturatoren, welche auf Stufe 1 und Stufe 3 erhitzt werden, ähneln sich in ihrer durchschnittlichen Maximaltemperatur (92,57°C bzw. 93,48°C) und der durchschnittlichen „Zeit über 64°C“ (11,48 Sekunden bzw. 11,67 Sekunden). Der Guttafusionobturator auf Stufe 2 erreicht eine geringere Maximaltemperatur (89,74°C) und hält sich somit geringfügig kürzer über 64°C (10,18 Sekunden).

Guttafusion		E=1		E=0,95	
		"Tmax" [°C]	"Zeit über 64°C" [Sek.]	"Tmax" [°C]	"Zeit über 64°C" [Sek.]
ISO 025	Stufe 1	77,34	4,62	90,95	8,02
	Stufe 2	80,06	4,62	90,82	7,88
	Stufe 3	91,29	6,66	97,89	8,51
ISO 040	Stufe 1	81,16	6,97	90,33	9,26
	Stufe 2	81,31	7,09	87,98	8,45
	Stufe 3	84,11	7,88	95,7	11,29
ISO 050	Stufe 1	90,23	10,39	93,48	11,48
	Stufe 2	83,56	8,23	89,74	10,18
	Stufe 3	91,01	10,43	92,57	11,67

Tabelle 15: „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ der Guttafusionobturatoren bei Emissionsgrad = 1 und Emissionsgrad = 0,95

In Tabelle 15 sind für die Maximaltemperatur „Tmax“ und für die „Zeit über 64°C“ die Mittelwerte bei unterschiedlichen Emissionsgraden zusammenfassend aufgelistet.

5.1.2 Thermafil

5.1.2.1 Thermafilobturatoren bei Emissionsgrad = 1

5.1.2.1.1 Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025

"Tmax" bei ISO 025				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
0	84,74	4,2	91,2	76,6
15	91,27	4,99	100	85,8
30	95,35	5,31	103,1	86,5
60	94,37	4,71	102,9	89,4
90	95,28	5,45	103,1	86
120	84,5	3,16	88,6	79,9

Tabelle 16: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 1

"Zeit über 64°C" bei ISO 025				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
0	7,95	1,58	9,7	5
15	9,47	1,29	11,9	7,7
30	11,34	1,09	13,7	10,2
60	10,86	0,97	12,6	9
90	11,17	1,51	13,8	8,5
120	7,69	1,35	10,4	6,1

Tabelle 17: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 1

Thermafilobturatoren, welche mit einer Verzögerung von 15, 30, 60 bzw. 90 Sekunden nach dem ersten Signalton aus dem Thermaprep-Ofen entnommen werden, erreichen eine deutlich höhere Maximaltemperatur (91,27°C – 95,35°C) und halten sich somit auch länger über 64°C (9,47-11,34 Sekunden) als Obturatoren, welche direkt oder 120 Sekunden nach dem ersten Signalton aus dem Thermaprep-Ofen entnommen werden.

5.1.2.1.2 Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040

"Tmax" bei ISO 040				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
0	116,93	9,3	131	105,2
15	116,41	5,24	126,4	109,4
30	114,02	3,31	120,2	106,5
60	107,5	4,76	117,1	102
90	104,35	4,15	110,8	95,9
120	98,69	3,45	104,6	95,5

Tabelle 18: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 1

"Zeit über 64°C" bei ISO 040				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
0	21,75	2,59	25,9	18
15	22,26	1,06	23,5	20,6
30	23,2	3,31	32,2	20
60	19,95	1,46	21,9	16,6
90	18,29	1,92	21,5	14,7
120	15,7	1,85	19	12,5

Tabelle 19: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 1

Thermafilobturatoren der ISO-Größe 040, welche direkt aus dem Ofen entnommen werden, erreichen durchschnittlich die höchste Maximaltemperatur (116,93°C). Die gemessene Maximaltemperatur sinkt leicht, wenn die Messung 15 bzw. 30 Sekunden nach dem Signalton vorgenommen wird (116,41 bzw. 114,02°C). Je länger der Träger im Ofen belassen wird, desto niedriger wird die gemessene Maximaltemperatur. Sie erreicht ein Minimum (98,69°C) bei Entnahme des Obturators 120 Sekunden nach dem Signalton. Ähnlich verhält es sich hierbei bei der „Zeit über 64°C“, die bis zu den Messungen bei 15 bzw. 30 Sekunden nach dem Signalton leicht ansteigt, dann jedoch analog zur Maximaltemperatur sinkt.

5.1.2.1.3 Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050

"Tmax" bei ISO 050				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
0	114,8	6,67	123,6	102,8
15	118,54	3,67	123,5	110,6
30	112,42	5,61	118,5	101,3
60	104,92	2,75	109,1	99,1
90	105,57	3,12	108,1	96,7
120	98,71	4,22	104,8	90,1

Tabelle 20: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 1

"Zeit über 64°C" bei ISO 050				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
0	20	4,07	23,5	9
15	22,03	1,28	23,7	19,1
30	19,47	2,41	22,4	14,7
60	17,26	0,92	18,6	16,1
90	18,45	2,22	22,7	13,2
120	14,36	1,92	17,5	11,3

Tabelle 21: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 1

Thermafilobturatoren der ISO-Größe 050, welche direkt nach dem Signalton bzw. 15 oder 30 Sekunden nach dem Signalton aus dem Ofen genommen werden, erreichen die höchste Maximaltemperatur (112,42-118,54°C). Den höchsten „Tmax“-Wert (118,54°C) erreicht der Obturator, wenn er 15 Sekunden nach dem ersten Signalton im Ofen belassen wird und dann zur Messung entnommen wird. Wird 60, 90 oder 120 Sekunden nach dem 1. Signalton gewartet, sinkt die Maximaltemperatur (98,71-105,57°C) und somit auch die Zeit, in der sich der Träger über 64°C hält.

5.1.2.2 Thermafilobturatoren bei Emissionsgrad = 0,95

5.1.2.2.1 Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025

"Tmax" bei ISO 025				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
0	88,65	3,77	93,2	84,1
15	93,87	2,87	97,8	89,3
30	96,61	4,98	104,9	88,1
60	92,75	5,34	100,8	83,3
90	91,88	2,21	95,5	88,9
120	82,35	3,7	88,6	77,1

Tabelle 22: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 0,95

"Zeit über 64°C" bei ISO 025				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
0	8,38	1,71	11,5	5,8
15	10,5	1,5	13,7	8,9
30	10,8	2,42	14,8	7,5
60	9,89	3,31	16,2	5
90	9,85	1,15	11,6	7,5
120	5,22	2,9	11,9	3,7

Tabelle 23: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 0,95

Thermafilobturatoren der ISO-Größe 025 erreichen ihre durchschnittlich höchste Maximaltemperatur, wenn sie 30 Sekunden nach dem ersten Signalton aus dem Thermaprep-Ofen entnommen werden (96,61°C). Erfolgt die Entnahme aus dem Ofen 60, 90 oder 120 Sekunden nach dem Signalton, sinkt die gemessene Maximaltemperatur. Analog verhalten sich die durchschnittlichen Werte für die „Zeit über 64°C“.

5.1.2.2.2 Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040

"Tmax" bei ISO 040				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
0	120,05	6,19	124,4	105,6
15	113,42	4,5	122	108,1
30	124,1	4,65	128,7	119
60	102,92	5,04	113,6	96,2
90	108,64	2,94	113,7	104,8
120	98,85	4,81	105,6	91,1

Tabelle 24: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 0,95

"Zeit über 64°C" bei ISO 040				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
0	23,17	2,91	28,9	17,3
15	21,85	1,82	24,2	17,8
30	23,89	2,1	27,7	21
60	15,98	2,31	19,8	11,5
90	19,72	3,52	23,3	10
120	16,02	2,96	22,9	11,5

Tabelle 25: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 0,95

All jene Thermafilobturatoren der ISO-Größe 040, welche direkt (0 Sekunden) bzw. nach einer Verzögerung von 15 bzw. 30 Sekunden aus dem Ofen entnommen werden, erreichen durchschnittlich die höchsten Maximaltemperaturen (113,42-124,1°C). Je länger der Obturator im Ofen belassen wird, desto stärker sinkt die erreichte Maximaltemperatur. Sie erreicht ein Minimum bei Entnahme des Obturators 120 Sekunden nach dem Signalton (98,85°C). Analog zu den Maximaltemperaturen sinken die Zeiten, in denen der Obturator Temperaturen über 64°C annimmt.

5.1.2.2.3 Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050

"Tmax" bei ISO 050				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [°C]	SD	Maximal [°C]	Minimal [°C]
0	116,41	5,86	125,9	107,9
15	113,53	3,71	120,3	107,7
30	120,69	5,63	130,6	111,1
60	110,81	4,65	115,4	104
90	108,35	2,02	111,9	105,4
120	106,49	5,08	113,2	99,5

Tabelle 26: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 0,95

"Zeit über 64°C" bei ISO 050				
"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	MW [Sek]	SD	Maximal [Sek]	Minimal [Sek]
0	21,45	2,98	26,3	16,9
15	21,22	1,82	25	18,7
30	22,48	2,16	25,6	19,1
60	19,06	2,62	23,8	14,9
90	20,12	1,08	32,5	18,4
120	18,49	3,04	23,2	13,4

Tabelle 27: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 0,95

Der Obturator der ISO-Größe 050 erreicht den höchsten „Tmax“-Wert, wenn er 30 Sekunden nach dem Signalton aus dem Ofen entnommen wird (120,69°C). Die geringste durchschnittliche Maximaltemperatur wird nach Belassen des Obturators für 120 Sekunden nach dem ersten Signalton gemessen (106,49°C). Der Obturator bleibt nach Entnahme aus dem Thermaprep-Ofen zwischen 18,49 und 22,48 Sekunden auf Temperaturen über 64°C.

Thermafil	"Zeit nach 1. Ton" [Sek]	E=1		E=0,95	
		"Tmax" [°C]	"Zeit über 64°C [Sek]	"Tmax" [°C]	"Zeit über 64°C [Sek]
ISO 025	0	84,74	7,95	88,65	8,38
	15	91,27	9,47	93,87	10,5
	30	95,35	11,34	96,61	10,8
	60	94,37	10,86	92,75	9,89
	90	95,28	11,17	91,88	9,85
	120	84,5	7,69	82,35	5,22
ISO 040	0	116,93	21,75	120,05	23,17
	15	116,41	22,26	113,42	21,85
	30	114,02	23,2	124,1	23,89
	60	107,5	19,95	102,92	15,98
	90	104,35	18,29	108,64	19,72
	120	98,69	15,7	98,85	16,02
ISO 050	0	114,8	20	116,41	21,45
	15	118,54	22,03	113,53	21,22
	30	112,42	19,47	120,69	22,48
	60	104,92	17,26	110,81	19,06
	90	105,57	18,45	108,35	20,12
	120	98,71	14,36	106,49	18,49

Tabelle 28: „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ der Guttafusionobturatoren bei Emissionsgrad = 1 und Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 28 zeigt die Mittelwerte der Maximaltemperaturen („Tmax“) und der Zeiten, in welchen der jeweilige Obturator Temperaturen über 64°C („Zeit über 64°C“) angenommen hat.

5.2 Vorversuche: Aussagen über nicht normalverteilte Daten

Aussage 1: Die Verteilung von „Tmax“ ist über die Variablen der Kategorie „Emissionsgrad“ identisch.

Diese Aussage wird abgelehnt (Mann-Whitney-U-Test mit Signifikanz-Wert $p < 0,001$).

Die Maximaltemperatur ist abhängig vom „Emissionsgrad“.

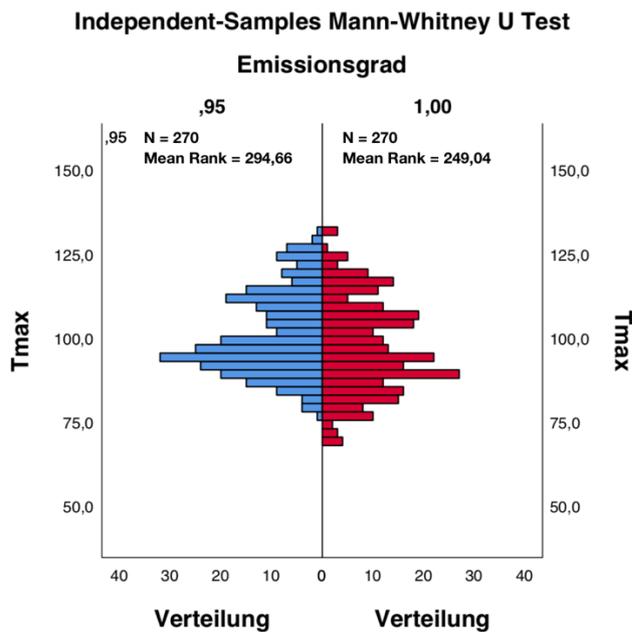


Abb. 20: Verteilung der „Tmax“-Werte über Emissionsgrad = 0,95 (blau) und Emissionsgrad = 1 (rot)

In Abb. 20 ist zu erkennen, dass die Maximaltemperaturwerte („Tmax“) bei Emissionsgrad = 1 (roter Balken) breiter gestreut sind. Bei $E=0,95$ ist der „Tmax“-Durchschnittswert höher als bei $E=1$.

Aussage 2: Die Verteilung von „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ ist über die Variablen der Kategorie „Obturatortyp“ identisch („Emissionsgrad“=0,95 und „Emissionsgrad“=1).

Die Aussage wird abgelehnt (Mann-Whitney-U-Test mit Signifikanz-Wert $p < 0,001$).

Die Maximaltemperatur und die Zeit über 64°C ist abhängig vom „Obturatortyp“.

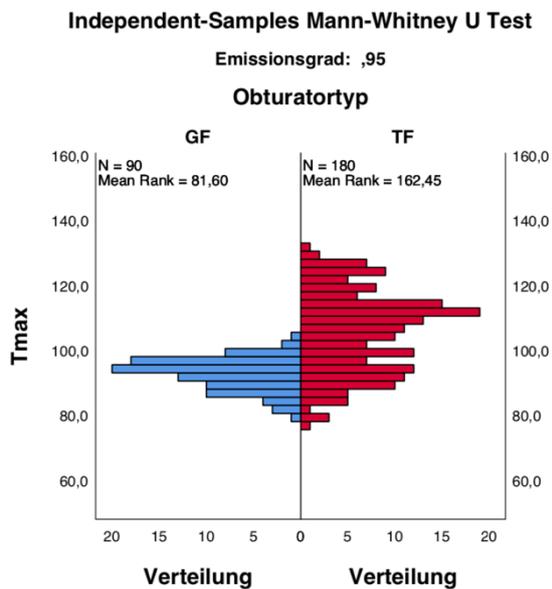


Abb. 21: Verteilung der „Tmax“-Werte von Guttufusion (blau) und Thermafil (rot) bei Emissionsgrad = 0,95

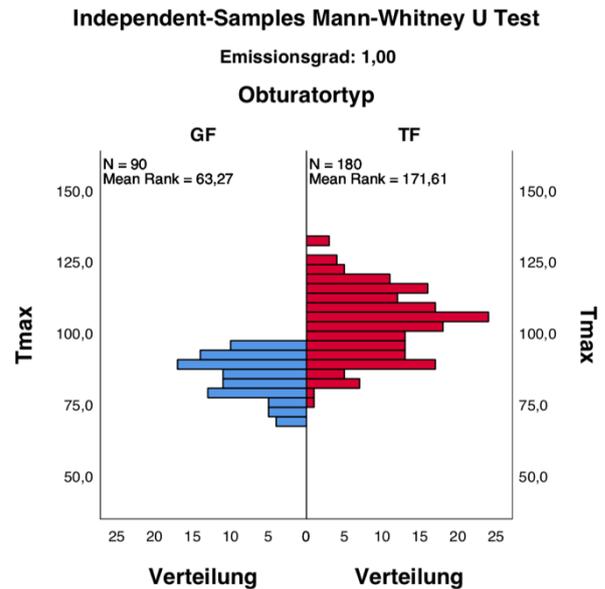


Abb. 22: Verteilung der „Tmax“-Werte von Guttufusion (blau) und Thermafil (rot) bei Emissionsgrad = 1

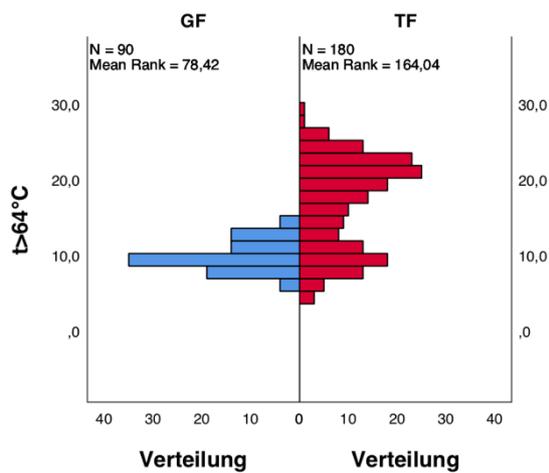
Abb. 21 (Emissionsgrad 0,95) und Abb. 22 (Emissionsgrad 1) zeigen, dass bei Thermafil höhere Temperaturen gemessen werden als bei Guttufusion.

Thermafil entwickelt bei E=1 eine im Mittelwert um 21,5°C und bei E=0,95 eine im Mittelwert um 12,9°C höhere Temperatur als Guttufusion. Bei Thermafil werden Maximaltemperaturen von 131°C bei E=1 bzw. von 130,6°C bei E=0,95 erzielt, verglichen dazu sind die Maximaltemperaturen der Guttufusionsträger deutlich kleiner, 96,6°C bei E=1 und 103°C bei E=0,95.

Independent-Samples Mann-Whitney U Test

Emissionsgrad: ,95

Obturatortyp



Independent-Samples Mann-Whitney U Test

Emissionsgrad: 1,00

Obturatortyp

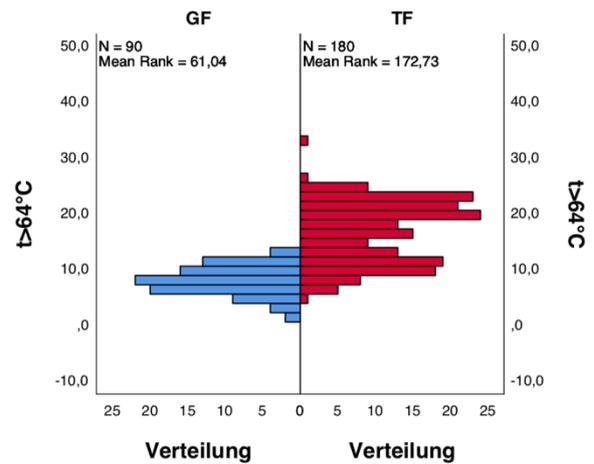


Abb. 23: Verteilung der „ $t > 64^{\circ}\text{C}$ “-Werte von Guttafusion (blau) und Thermafil (rot) bei Emissionsgrad = 0,95

Abb. 24: Verteilung der „ $t > 64^{\circ}\text{C}$ “-Werte von Guttafusion (blau) und Thermafil (rot) bei Emissionsgrad = 1

Abb. 23 (Emissionsgrad 0,95) und Abb. 24 (Emissionsgrad 1) zeigen, dass sich Thermafilobturatoren, analog zu den höheren Maximaltemperaturen, durchschnittlich länger über 64°C halten.

Aussage 3: Die Verteilung von „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ ist über die Variablen der Kategorien „Obturortyp“ und „ISO-Größe“ identisch („Emissionsgrad“=0,95 und „Emissionsgrad“=1).

Die Aussage wird abgelehnt (Kruskal-Wallis-Test mit Signifikanz-Wert $p < 0,001$).

Die Maximaltemperatur und die Zeit über 64°C ist abhängig vom „Obturortyp“ und von der „ISO-Größe“.

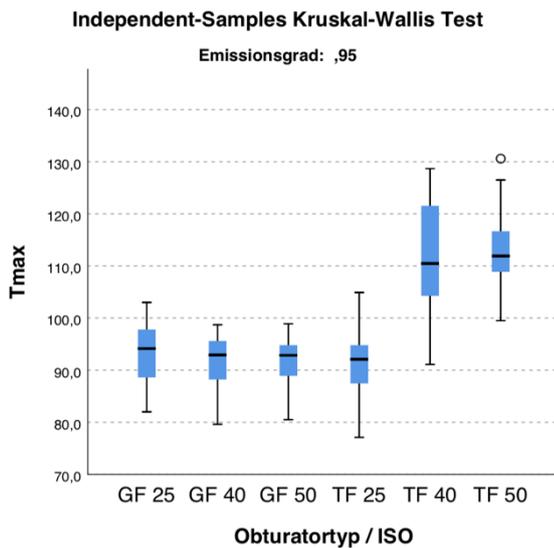


Abb. 25: Box-Plot von „Tmax“ über die Kategorien Obturatorotyp und ISO-Größe bei Emissionsgrad = 0,95

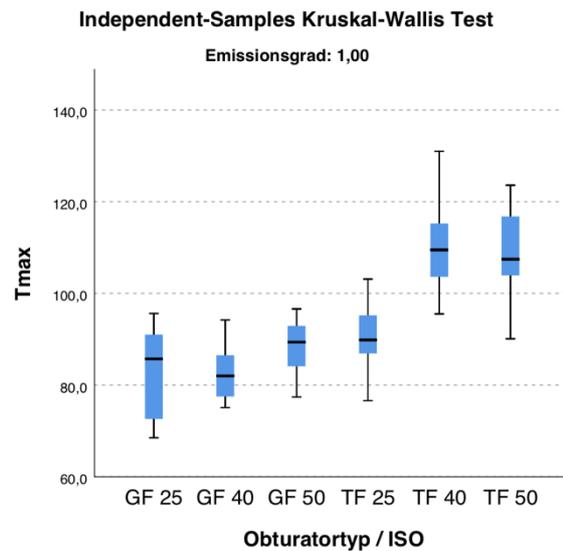


Abb. 26: Box-Plot von „Tmax“ über die Kategorien Obturatorotyp und ISO-Größe bei Emissionsgrad = 1

Paarweise Stichprobenvergleiche ergeben, dass es zwischen den Variablenkombinationen „TF 040“ und „TF 050“ keine signifikanten Unterschiede gibt ($p=1,000$).

Es gibt jedoch signifikante Unterschiede zwischen den Variablen „GF 025“, „GF 040“, „GF 050“ und „TF 025“ im Vergleich zu „TF 050“ und „TF 040“, unabhängig vom Emissionsgrad ($p < 0,001$).

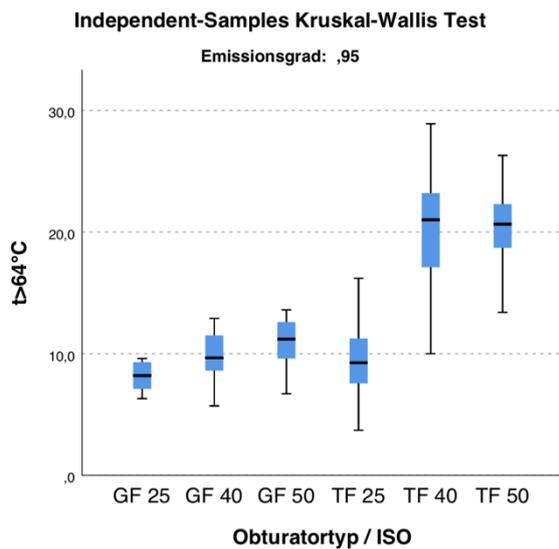


Abb. 27: Box-Plot von „t>64°C“ über die Kategorien Obturator typ und ISO-Größe bei Emissionsgrad = 0,95

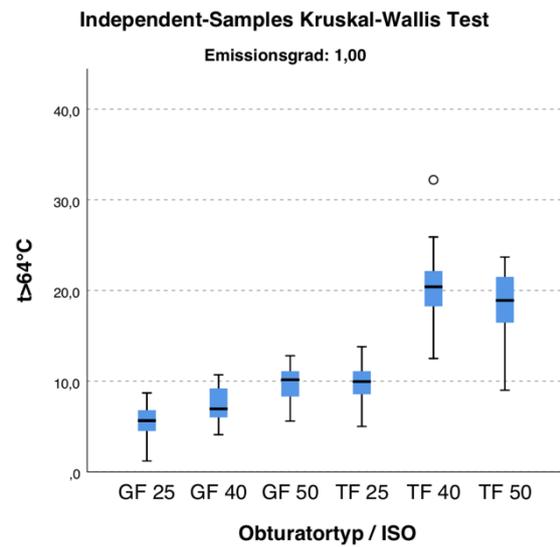


Abb. 28: Box-Plot von „t>64°C“ über die Kategorien Obturator typ und ISO-Größe bei Emissionsgrad = 1

Auch hier gilt, dass sowohl bei Emissionsgrad = 0,95 (Abb. 27) als auch bei Emissionsgrad = 1 (Abb. 28) die Zeiten über 64°C im Mittelwert bei Thermafilträgern der ISO-Größe 040 und 050 höher als bei allen ISO-Größen von Guttafusion und Thermafil der ISO-Größe 025 sind.

Dies wurde in den durchgeführten paarweisen Stichprobenvergleichen bestätigt.

Die Werte für die „Zeit über 64°C“ unterscheiden sich einzig zwischen „TF 040“ und „TF 050“ untereinander nicht signifikant. „TF 040“ und „TF 050“ unterscheiden sich mit allen anderen Variablenkombinationen sowohl bei E=1 als auch bei E=0,95 signifikant ($p < 0,001$).

Aussage 4: Die Verteilung von „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ ist über die Variablen der Kategorie „Stufe im Guttafusion-Ofen“ identisch („Emissionsgrad“=0,95).

Die Aussage wird abgelehnt (Kruskal-Wallis-Test mit Signifikanz-Wert $p < 0,001$).

Die Maximaltemperatur und die Zeit über 64°C sind bei „Obturortyp“ Guttafusion und „Emissionsgrad“ 0,95 abhängig von der „Stufe im Guttafusion-Ofen“.

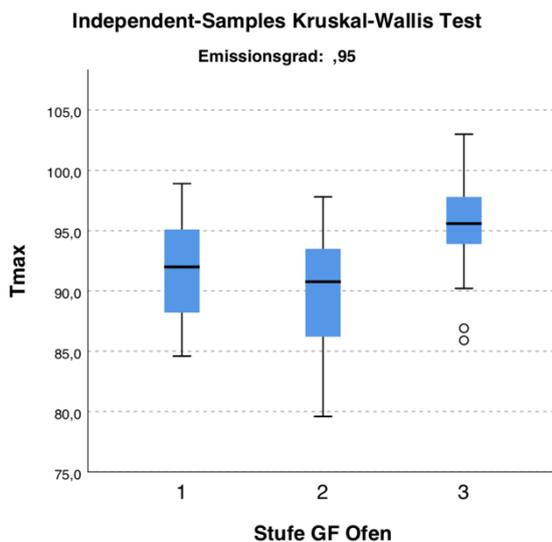


Abb. 29: Box-Plot von „Tmax“ über die Kategorie Stufe im Guttafusionofen bei Emissionsgrad = 0,95

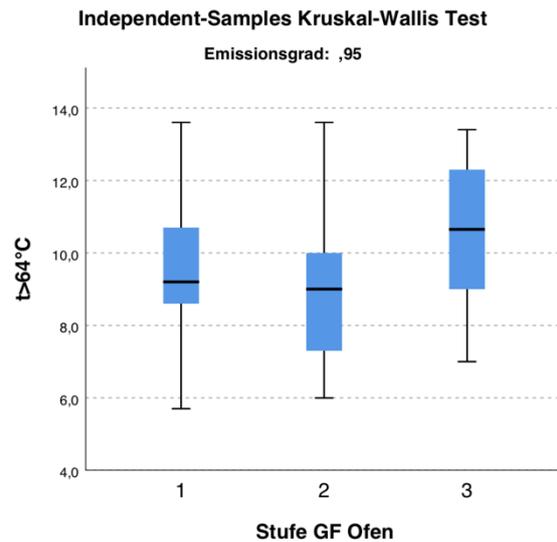


Abb. 30: Box-Plot von „t>64°C“ über die Kategorie Stufe im Guttafusionofen bei Emissionsgrad = 0,95

Bei Emissionsgrad 0,95 nehmen Guttafusionobturatoren, welche auf Stufe 3 erhitzt wurden, die höchste Temperatur an und verbleiben länger über 64°C. Die „Tmax“-Werte der Obturatoren, welche auf Stufe 3 erhitzt wurden, unterscheiden sich laut paarweisen Stichprobenvergleichen signifikant von denjenigen Werten, bei denen der Obturator auf Stufe 2 und Stufe 1 erhitzt wurde.

Aussage 5: Die Verteilung von „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ ist über die Variablen der Kategorie „Stufe im Guttafusion-Ofen“ identisch („Emissionsgrad“=1).

Die Aussage wird für „Tmax“ abgelehnt (Kruskal-Wallis-Test mit Signifikanz-Wert $p < 0,001$). Die Maximaltemperatur, welche bei Stufe 3 gemessen wurde, unterscheidet sich statistisch signifikant von den bei Stufe 2 und Stufe 1 gemessenen Maximaltemperaturen.

Die Maximaltemperatur ist bei „Obturatortyp“ Guttafusion und „Emissionsgrad“ 1 abhängig von der „Stufe im Guttafusion-Ofen“.

Die Aussage für „Zeit über 64°C“ wird bestätigt (Kruskal-Wallis-Test mit Signifikanz-Wert $p = 0,062$).

Die Zeit über 64°C ist bei „Obturatortyp“ Guttafusion und „Emissionsgrad“ 1 unabhängig von der „Stufe im Guttafusion-Ofen“.

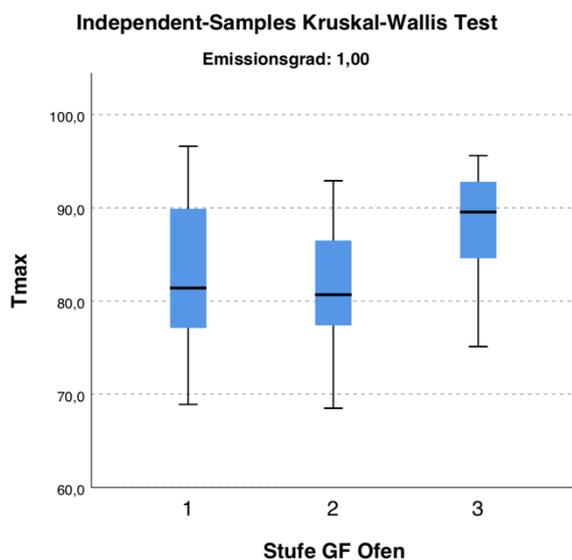


Abb. 31: Box-Plot von „Tmax“ über die Kategorie Stufe im Guttafusionofen bei Emissionsgrad = 1

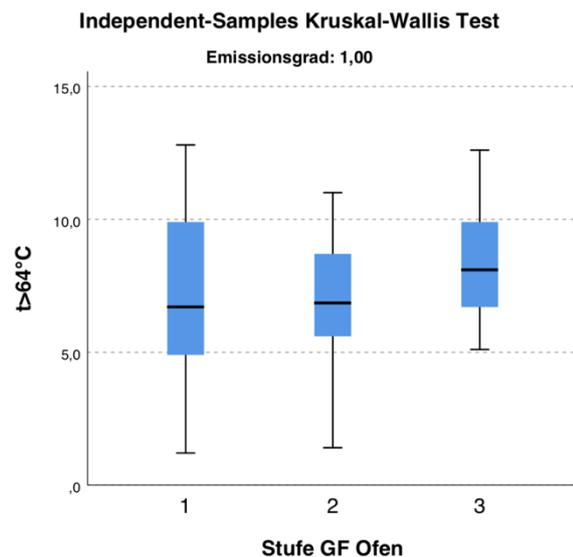


Abb. 32: Box-Plot von „t>64°C“ über die Kategorie Stufe im Guttafusionofen bei Emissionsgrad = 1

Aussage 6: Die Verteilung von „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ ist über die Variablen der Kategorien „Obturortyp“, „ISO-Größe“ und „Stufe im Guttafusion-Ofen“ identisch („Emissionsgrad“=1 und „Emissionsgrad“=0,95).

Die Aussage wird abgelehnt (Kruskal-Wallis-Test mit Signifikanz-Wert $p < 0,001$).

Die Maximaltemperatur und die Zeit über 64°C ist bei „Obturortyp“ Guttafusion und den „ISO-Größen“ 025, 040 und 050 abhängig von der gewählten „Stufe im Guttafusion-Ofen“.

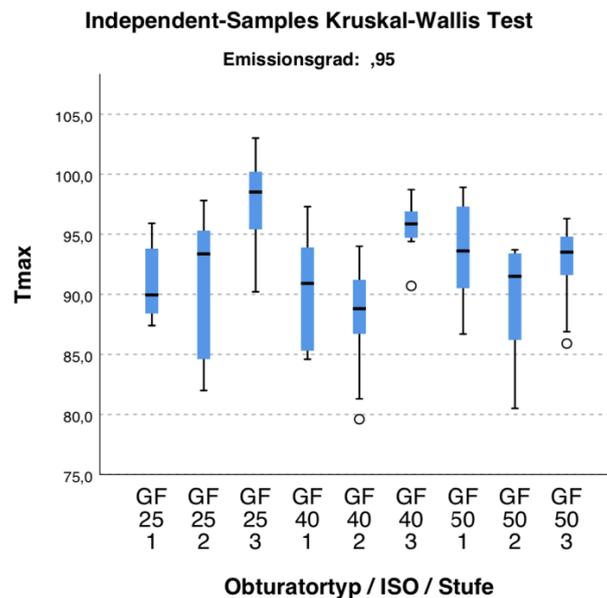


Abb. 33: Box-Plot von „Tmax“ über die Kategorien Obturortyp, ISO-Größe und Stufe im Guttafusionofen bei Emissionsgrad = 0,95

In den paarweisen Stichprobenvergleichen wurde bewiesen, dass sich bei Emissionsgrad 0,95 nur der „Tmax“-Wert des Guttafusionsträgers der ISO-Größe 025 auf Stufe 3 erwärmt von den „Tmax“-Werten der Variablenkombinationen „GF 025 Stufe 1“, „GF 040 Stufe 1“, „GF 040 Stufe 2“ und „GF 050 Stufe 2“ signifikant unterscheidet. Er ist höher als die Werte der genannten Guttafusionobturatoren.

Auch der „Tmax“-Wert des Guttafusionsträgers der ISO-Größe 040 auf Stufe 2 erwärmt unterscheidet sich signifikant von den „Tmax“-Werten der Variablenkombinationen „GF 040 Stufe 3“ und „GF 025 Stufe 3“.

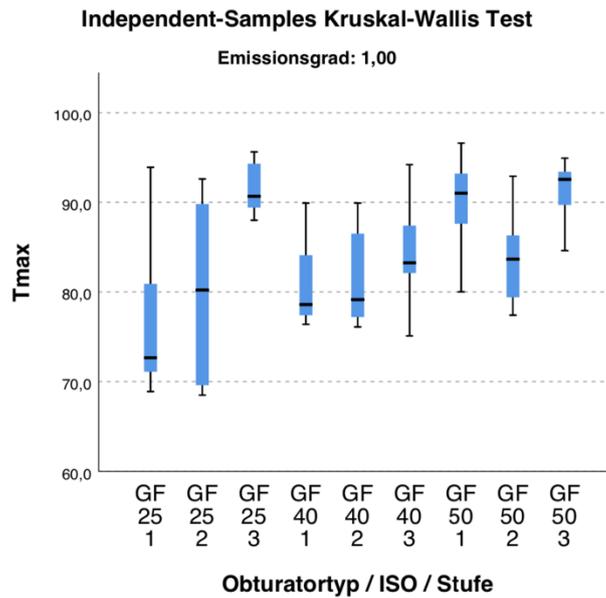


Abb. 34: Box-Plot von „Tmax“ über die Kategorien Obturatortyp, ISO-Größe und Stufe im Guttafusionofen bei Emissionsgrad = 1

Auch bei Emissionsgrad = 1 unterscheidet sich nur der „Tmax“-Wert des Guttafusionobturators der ISO-Größe 025 auf Stufe 1 erwärmt signifikant von den „Tmax“-Werten der Variablenkombinationen „GF 050 Stufe 1“, „GF 025 Stufe 3“, „GF 050 Stufe 3.

Auch der „Tmax“-Wert von „GF 025 Stufe 3“ unterscheidet sich signifikant von „GF 040 Stufe 1“, „GF 040 Stufe 2“ und „GF 050 Stufe 3“.

Der „Tmax“-Wert von „GF 050 3“ unterscheidet sich signifikant von den „Tmax“-Werten der Variablenkombinationen „GF 040 Stufe 2“, „GF 040 Stufe 1“ und „GF 025 Stufe 2“.

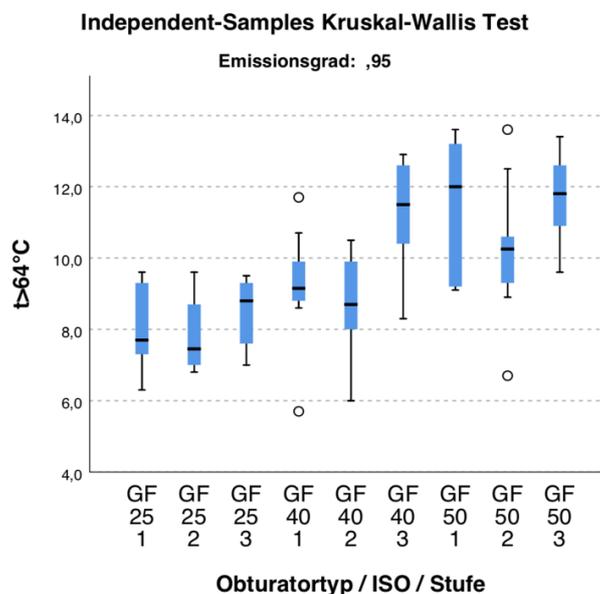


Abb. 35: Box-Plot von „t > 64°C“ über die Kategorien Obturatortyp, ISO-Größe und Stufe im Guttafusionofen bei Emissionsgrad = 0,95

Aus Abb. 35 (Emissionsgrad 0,95) kann geschlossen werden, dass die „Zeit über 64°C“ des Guttafusionobturators mit zunehmender ISO-Größe zunimmt.

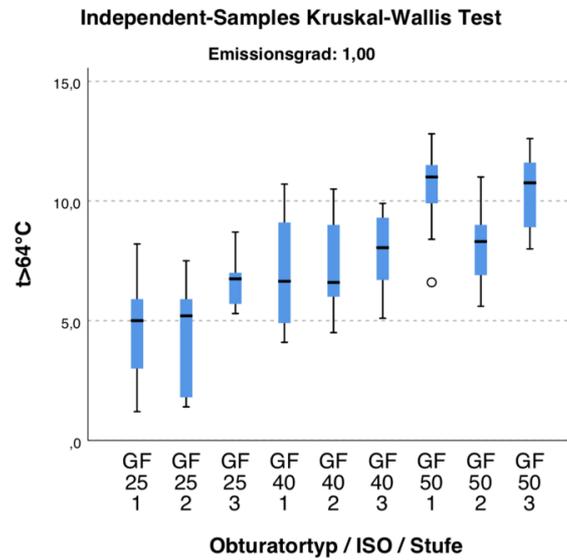


Abb. 36: Box-Plot von „ $t > 64^{\circ}\text{C}$ “ über die Kategorien Obturatorotyp, ISO-Größe und Stufe im Guttafusionofen bei Emissionsgrad = 1

Auch aus Abb. 36 (Emissionsgrad 1) kann geschlossen werden, dass die „Zeit über 64°C“ mit zunehmender ISO-Größe steigt.

Aussage 7: Die Verteilung von „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ ist über die Variablen der Kategorie „Zeit nach dem 1. Signalton im Thermaprep-Ofen“ identisch („Emissionsgrad“=1 und „Emissionsgrad“=0,95).

Die Aussage wird abgelehnt (Kruskal-Wallis-Test mit Signifikanz-Wert $p < 0,001$).

Die Maximaltemperatur und die Zeit über 64°C ist bei „Obturatortyp“ Thermafil abhängig von der „Zeit nach dem 1. Signalton im Thermaprep-Ofen“.

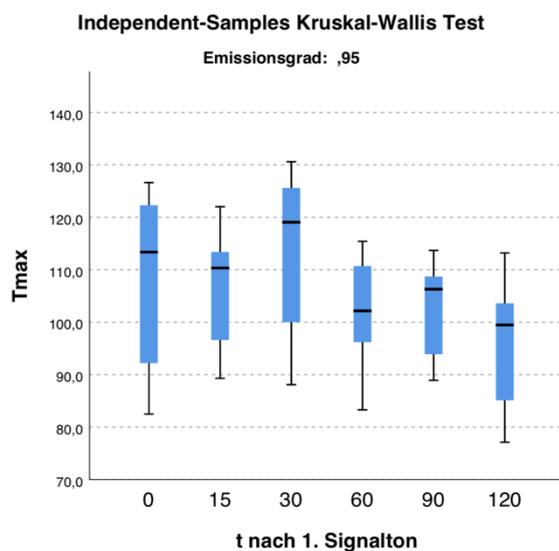


Abb. 37: Box-Plot von „Tmax“ über die Zeit nach dem ersten Signalton im Thermaprep-Ofen bei Emissionsgrad = 0,95

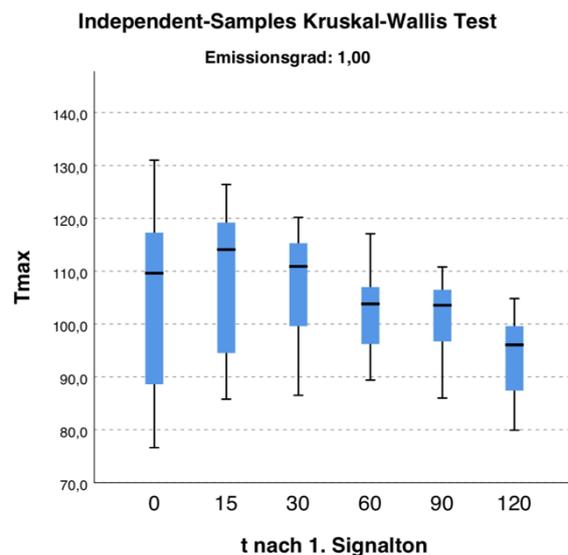


Abb. 38: Box-Plot von „Tmax“ über die Zeit nach dem ersten Signalton im Thermaprep-Ofen bei Emissionsgrad = 1

In der Abb. 37 ist der „Tmax“-Verlauf bezogen auf die Zeit nach dem 1. Signalton im Thermaprep-Ofen bei Emissionsgrad = 0,95 zu erkennen. Die höchsten „Tmax“-Werte werden bei Entnahme 30 Sekunden nach dem Signalton erzielt, die niedrigsten „Tmax“-Werte bei Entnahme 120 Sekunden nach dem Signalton.

Die Werte, welche bei Entnahme 60, 90 oder 120 Sekunden nach dem Signalton erzielt wurden, unterscheiden sich signifikant vom Wert, welcher bei Entnahme 30 Sekunden nach dem Signalton erzielt wurde.

In Abb. 38 ist der „Tmax“-Verlauf bezogen auf die Zeit nach dem 1. Signalton im Thermaprep-Ofen bei Emissionsgrad = 1 zu erkennen. Die durchschnittlich höchsten Werte werden bei Entnahme 15 Sekunden nach dem Signalton aus dem Thermaprep-Ofen gemessen, die niedrigsten bei Entnahme 120 Sekunden nach dem Signalton aus dem Thermaprep-Ofen.

Der „Tmax“-Wert, welcher bei Entnahme nach 120 Sekunden gemessen wurde, unterscheidet sich signifikant von den „Tmax“-Werten, die direkt (0 Sekunden) bzw. 15 oder 30 Sekunden nach dem Signalton gemessen wurden.

Alle anderen Werte unterscheiden sich nicht statistisch signifikant voneinander.

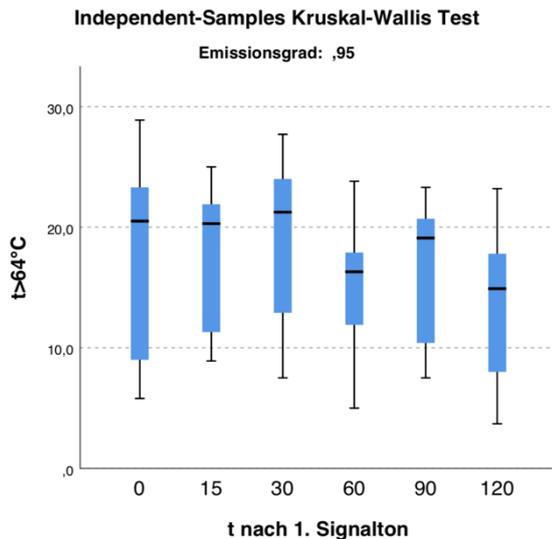


Abb. 39: Box-Plot von „ $t > 64^{\circ}\text{C}$ “ über die Zeit nach dem ersten Signalton im Thermaprep-Ofen bei Emissionsgrad = 0,95

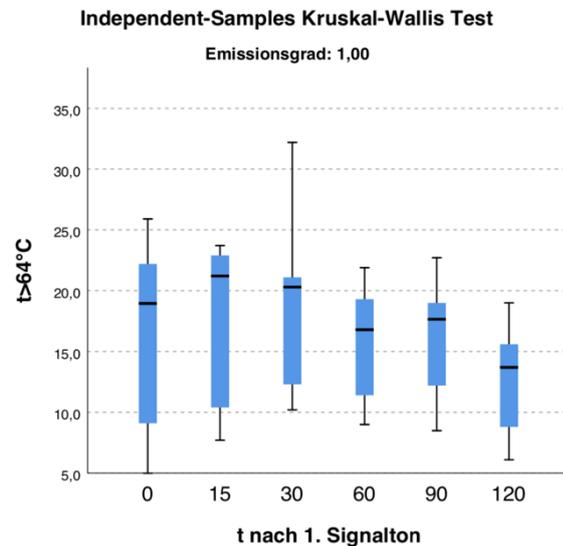


Abb. 40: Box-Plot von „ $t > 64^{\circ}\text{C}$ “ über die Zeit nach dem ersten Signalton im Thermaprep-Ofen bei Emissionsgrad = 1

Abb. 39 zeigt, dass bei Emissionsgrad = 0,95 die längsten Zeitintervalle über 64°C bei Entnahme des Trägers 30 Sekunden nach dem Signalton auftreten, das niedrigste Zeitintervall findet sich bei Entnahme des Trägers 120 Sekunden nach dem Signalton.

Signifikante Unterschiede zeigen die Werte, welche bei Entnahme 30 Sekunden nach dem Signalton gemessen wurden von den Werten, welche bei Entnahme 60 bzw. 120 Sekunden nach dem Signalton gemessen wurden.

Alle anderen Werte unterscheiden sich statistisch nicht signifikant.

Analog zur Maximaltemperatur ist auch das Zeitintervall über 64°C bei Emissionsgrad = 1 15 Sekunden nach dem Signalton am längsten und sinkt mit zunehmender Wartezeit. 120 Sekunden nach dem Signalton erreicht sie seinen niedrigsten Durchschnittswert.

Signifikante Unterschiede erzielte der Wert, welcher bei Entnahme 120 Sekunden nach dem Signalton gemessen wurde mit den Werten, welche bei Entnahme direkt (0 Sekunden) bzw. 15 und 30 Sekunden nach dem Signalton gemessen wurden.

Alle andere Werte unterscheiden sich statistisch nicht signifikant voneinander.

5.3 Vorversuche: Kontrolle der Nullhypothesen

Nullhypothese 1: Die Anpassung des Emissionsgrades hat keinen Einfluss auf das Messergebnis.

Nullhypothese wird abgelehnt (Aussage 1).

Nullhypothese 2: „Tmax“ und die Dauer, in der der jeweilige Träger Temperaturen über 64°C annimmt, sind abhängig von der Art sowie der ISO-Größe des Obturators.

Nullhypothese wird bestätigt (Aussagen 2-3).

Nullhypothese 3: „Tmax“ und die Dauer, in der der Guttafusionsträger Temperaturen über 64°C annimmt, sind abhängig von der Einstellungsstufe des Guttafusion-Ofens.

Bei Emissionsgrad = 0,95 wird die Nullhypothese bestätigt (Aussage 4).

Bei Emissionsgrad = 1 wird die Nullhypothese nicht bestätigt (Aussage 5).

Wird die „Stufe im Guttafusion-Ofen“ mit der „ISO-Größe“ kombiniert, wird die Nullhypothese bestätigt (Aussage 6).

Nullhypothese 4: „Tmax“ und die Dauer, in der der Thermafilträger Temperaturen über 64°C annimmt, sind abhängig von der Dauer, die der Träger nach dem 1. Signalton im Ofen belassen wird.

Nullhypothese 4 wird bestätigt (Aussage 7).

5.4 Hauptversuche: Ergebnisse der Temperaturmessung an der Wurzeloberfläche

5.4.1 Zähne auf ISO-Größe 025 aufbereitet

ISO 025	Thermafil (TF)	Guttafusion (GF)	Kontrollgruppe (GF)	Downpack (DP)	Backfill (BF)
"Tmax" MW [°C]	40,3	41,5	40,5	64,3	70,2
"Tmax" Maximal [°C]	45,4	45,0	42,8	86,6	86,4
"Tmax" Minimal [°C]	38,1	38,8	38,6	45,3	58,6
"ΔT" MW [°C]	3,6	4,9	3,7	26,3	25,2
Zeit bis 37°C (MW) [Sek.]	33,0	40,7	29,4	159,4	
Zeit über 47°C (MW) [Sek.]	0,0	0,0	0,0	86,3	
Zeit über 53°C (MW) [Sek.]	0,0	0,0	0,0	44,0	

Tabelle 29: Messergebnisse der auf ISO 025 aufbereiteten Zähne

Aus Tabelle 29 kann entnommen werden, dass Zähne, welche auf ISO 025 aufbereitet wurden und mit einem trägerbasierten Wurzelfüllsystem (Thermafil oder Guttafusion) der ISO-Größe 025 abgefüllt wurden, nicht über 47°C ansteigen.

Die Mittelwerte der Maximaltemperaturen betragen bei der Wurzelfüllung mit Thermafil 40,3°C und bei denselben Zähnen nach Revision bei der Wurzelfüllung mit Guttafusion 41,5°C. Auch die Kontrollgruppe erreicht einen minimal höheren „Tmax“-Wert (40,5°C) mit der Guttafusion-Füllung als die mit Thermafil gefüllten Zähne. Durchschnittlich steigt die Temperatur der Wurzeloberfläche bei der Füllung mit Thermafil um 3,6°C, bei der Füllung mit Guttafusion um 4,9°C bzw. 3,7°C.

Werden die Zähne 1-15, welche auf ISO-Größe 025 aufbereitet werden, mit der warm vertikalen Obturation nach Schilder gefüllt, erreichen sie eine durchschnittliche Maximaltemperatur von 64,3°C beim Downpack und 70,2°C beim Backfill. Die höchste Maximaltemperatur beträgt beim Downpack 86,6°C und beim Backfill 86,4°C. Im Schnitt steigt die Wurzeloberflächentemperatur beim Downpack um 26,3°C, beim Backfill um 25,2°C. Während des gesamten Füllvorgangs bleiben die Zähne durchschnittlich ohne Unterbrechung 86,3 Sekunden über 47°C und 44 Sekunden über 53°C. Die gefüllten Zähne benötigen durchschnittlich 159,4 Sekunden, um auf eine Ausgangstemperatur von 37°C abzukühlen.

5.4.2 Zähne auf ISO-Größe 040 aufbereitet

ISO 040	Thermafil (TF)	Guttafusion (GF)	Kontrollgruppe (GF)	Downpack (DP)	Backfill (BF)
"Tmax" MW [°C]	48,7	43,6	40,5	65,8	67,8
"Tmax" maximal [°C]	55,2	47,5	44,3	91,8	90,8
"Tmax" minimal [°C]	42,3	38,9	38,4	49,7	49,8
"ΔT" MW [°C]	11,9	6,7	3,7	28,3	23,4
Zeit bis 37°C (MW) [Sek.]	83,7	53,2	33,3	152,4	
Zeit über 47°C (MW) [Sek.]	6,4	0,1	0,0	78,1	
Zeit über 53°C (MW) [Sek.]	1,2	0,0	0,0	31,5	

Tabelle 30: Messergebnisse der auf ISO 040 aufbereiteten Zähne

Zähne, welche auf ISO 040 aufbereitet wurden und mit Obturatoren der ISO-Größe 040 abgefüllt wurden, erreichen bei der Füllung mit Thermafil Maximaltemperaturen von durchschnittlich 48,7°C, bei der Füllung mit Guttafusion Maximaltemperaturen von 43,6°C bzw. in der Kontrollgruppe 40,5°C. Zähne, welche mit Thermafil gefüllt wurden, erreichen somit Temperaturen über 47°C, sie halten sich durchschnittlich 6,4 Sekunden über 47°C.

Von den 60 mit Guttafusion der ISO-Größe 040 gefüllten Zähnen überschreitet nur eine gemessene Wurzeloberfläche die Temperatur von 47°C.

Bei der warm vertikalen Obturation erreichen die Zähne Maximaltemperaturen von durchschnittlich 65,8°C beim Downpack und 67,8°C beim Backfill. Die höchste gemessene Maximaltemperatur beträgt beim Downpack 91,8°C und beim Backfill 90,8°C. Die Zähne halten sich durchschnittlich 78,1 Sekunden als längste Intervalldauer über 47°C und 31,5 Sekunden als längste Intervalldauer über 53°C. Die gefüllten Zähne benötigen durchschnittlich 152,4 Sekunden, um auf eine Ausgangstemperatur von 37°C abzukühlen.

5.4.3 Zähne auf ISO-Größe 050 aufbereitet

ISO 050	Thermafil (TF)	Guttafusion (GF)	Kontrollgruppe (GF)	Downpack (DP)	Backfill (BF)
"Tmax" MW [°C]	48,3	44,8	42,3	56,8	70,6
"Tmax" maximal [°C]	66,3	55,1	52,3	67,4	88,9
"Tmax" minimal [°C]	42,0	40,7	39,9	51,1	57,8
"ΔT" MW [°C]	11,4	8,1	5,3	19,5	26,5
Zeit bis 37°C (MW) [Sek.]	86,2	64,6	47,4	144,4	
Zeit über 47°C (MW) [Sek.]	5,9	1,1	0,4	69,5	
Zeit über 53°C (MW) [Sek.]	1,1	0,2	0,0	35,5	

Tabelle 31: Messergebnisse der auf ISO 050 aufbereiteten Zähne

Bei Zähnen, welche mit Obturatoren der ISO-Größe 050 gefüllt wurden, werden bei der Füllung mit Thermafil höhere Temperaturen erzielt als bei der Füllung mit Guttafusion. Mit Thermafil gefüllte Zähne erreichen eine durchschnittliche Maximaltemperatur von 48,3°C, während an mit Guttafusion gefüllten Zähnen durchschnittlich 44,8°C bzw. in der Kontrollgruppe 42,3°C gemessen wird. Die mit Thermafil der ISO-Größe 050 gefüllten Zähne bleiben durchschnittlich 5,9 Sekunden über 47°C.

Bei der warm vertikalen Obturation erreichen die Zähne durchschnittlich eine Maximaltemperatur von 56,8°C beim Downpack und 70,6°C beim Backfill. Die höchste Maximaltemperatur beträgt beim Downpack 88,9°C und beim Backfill 67,4°C. Durchschnittlich bleibt jeder Zahn 69,5 Sekunden als längste Intervalldauer über 47°C und 35,5 Sekunden als längste Intervalldauer über 53°C.

Die gefüllten Zähne benötigen durchschnittlich 144,4 Sekunden, um auf eine Ausgangstemperatur von 37°C abzukühlen.

5.5 Hauptversuche: Aussagen über nicht normalverteilte Daten

Zur Kontrolle der Nullhypothesen (Siehe Kapitel 3 „Ziele der Studie“) wurden in SPSS Aussagen formuliert, welche entweder bestätigt oder abgelehnt wurden.

Aussage 1: Die Verteilung von „Tmax“ und „ΔT“ sind über die Variablen der Kategorie „Zahn“ identisch.

Die Aussage 1 wird bestätigt.

„Tmax“ ($p=0,786$) und „ΔT“ ($p=0,694$) sind unabhängig vom Faktor Zahn.

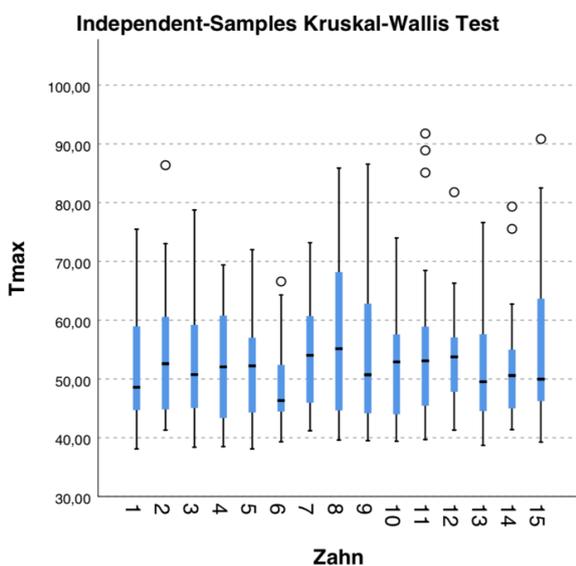


Abb. 41: Box-Plot von „Tmax“ über die Kategorie Zahn

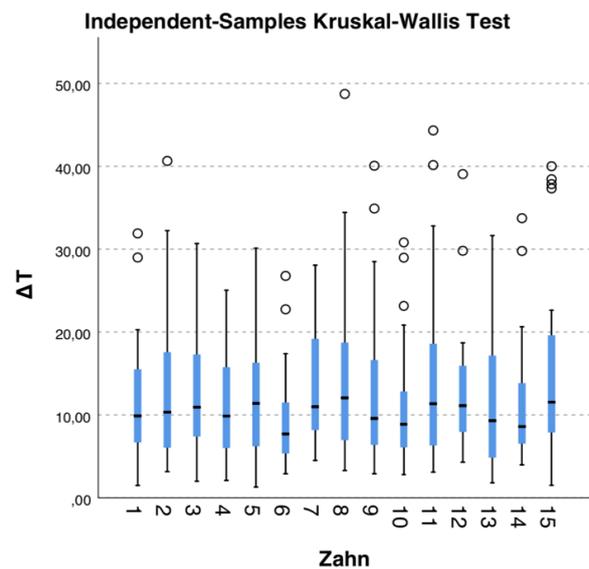


Abb. 42: Box-Plot von „ΔT“ über die Kategorie Zahn

Aussage 2: Die Verteilung von „Tmax“ und „ΔT“ sind über die Variablen der Kategorie „ISO-Größe“ identisch.

Die Aussage 2 wird bestätigt.

„Tmax“ ($p=0,621$) und „ΔT“ ($p=0,486$) sind unabhängig von der ISO-Größe.

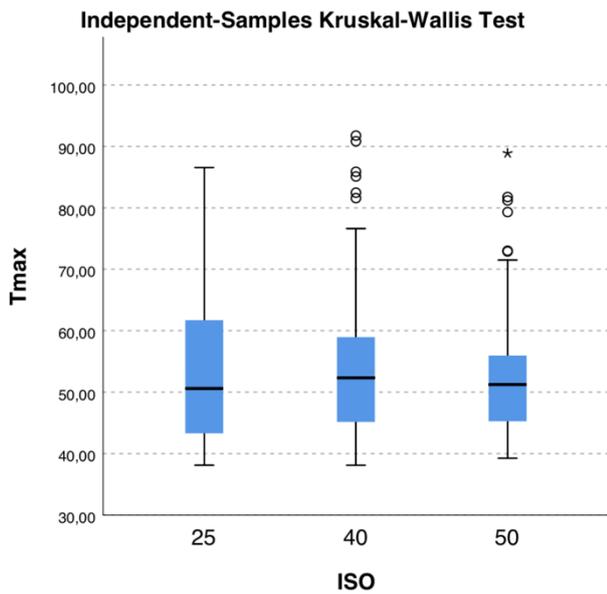


Abb. 43: Box-Plot von „Tmax“ über die Kategorie ISO-Größe

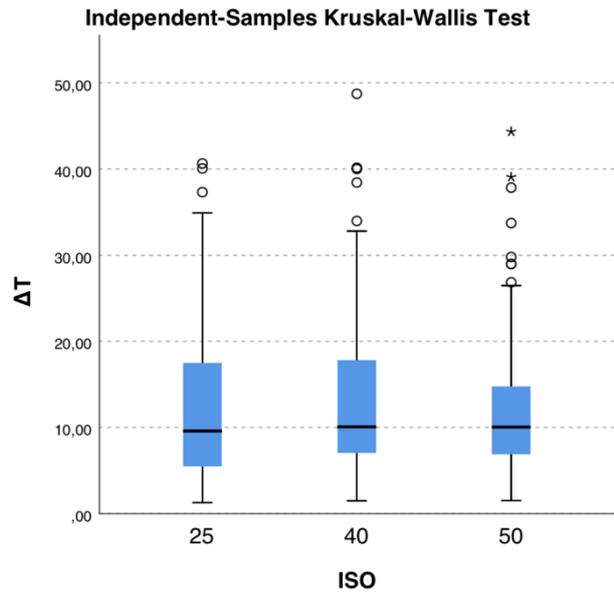


Abb. 44: Box-Plot von „ΔT“ über die Kategorie ISO-Größe

Aussage 3: Die Verteilung von „Tmax“ und „ΔT“ sind über die Variablen der Kategorie „Obturatorstechnik“ identisch.

Die Aussage 3 wird abgelehnt.

„Tmax“ ($p < 0,001$) und „ΔT“ ($p < 0,001$) sind abhängig von der Art des Obturators.

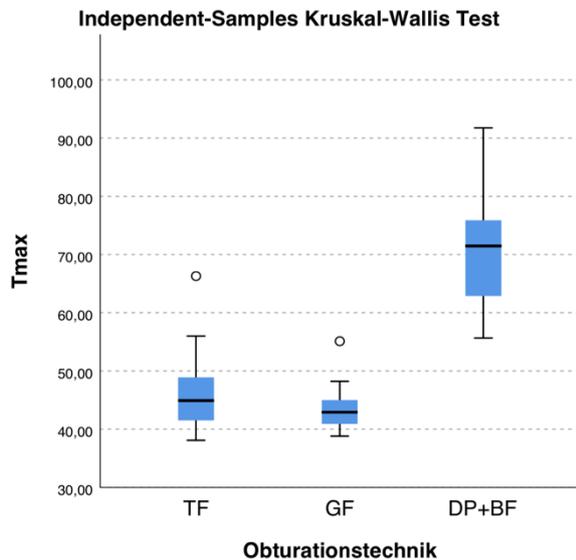


Abb. 45: Box-Plot von „Tmax“ über die Kategorie Obturationstechnik

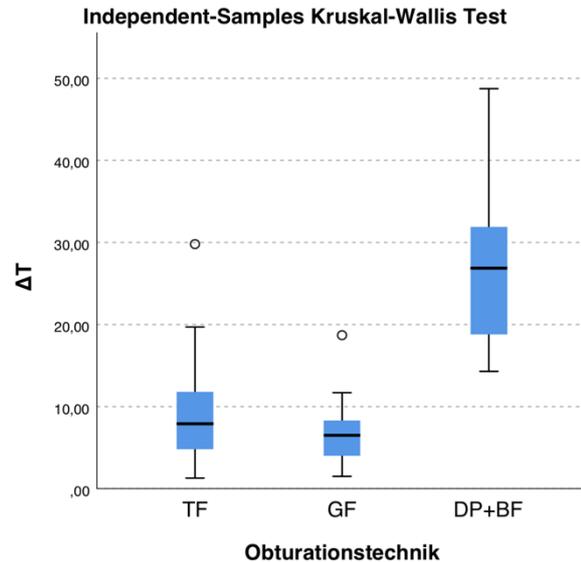


Abb. 46: Box-Plot von „ΔT“ über die Kategorie Obturationstechnik

Abb. 45 und Abb. 46 zeigen Box-Plot-Diagramme mit den drei Variablen der Kategorie „Obturationstechnik“. Thermafil und Guttafusion weisen entscheidend kleinere Maximaltemperaturen („Tmax“) bzw. Temperaturerhöhungen („ΔT“) auf als die warm vertikale Obturation.

Im den paarweisen Stichprobenvergleichen unterscheiden sich die Werte von Guttafusion und Thermafil statistisch nicht signifikant voneinander.

Die Werte von Thermafil und Guttafusion unterscheiden sich von den Werten der warm vertikalen Obturation signifikant. Sowohl bei „Tmax“ als auch bei „ΔT“ beträgt die angepasste Signifikanz 0,000.

Aussage 4: Die Verteilung von „Zeit über 47°C“, „Zeit über 53°C“ und „Zeit bis 37°C“ ist über die Variablen der Kategorie „Obturatorstechnik“ identisch.

Die Aussage 4 wird abgelehnt.

Die Zeiten, in denen die Wurzeloberflächen Temperaturen über 47°C und 53°C annehmen, sowie die Zeit, die die Wurzeloberfläche benötigt, um auf 37°C Körpertemperatur abzukühlen, ist abhängig von der Art des Obturators ($p < 0,001$).

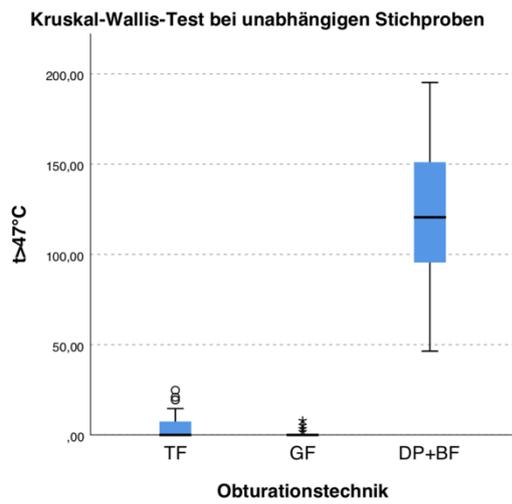


Abb. 47: Box-Plot von „ $t > 47^\circ\text{C}$ “ über die Kategorie Obturationstechnik

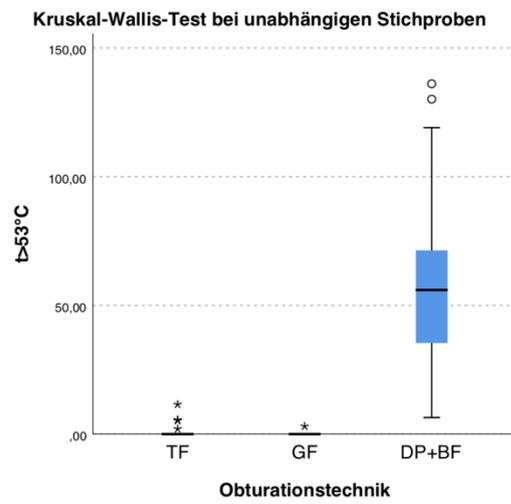


Abb. 48: Box-Plot von „ $t > 53^\circ\text{C}$ “ über die Kategorie Obturationstechnik

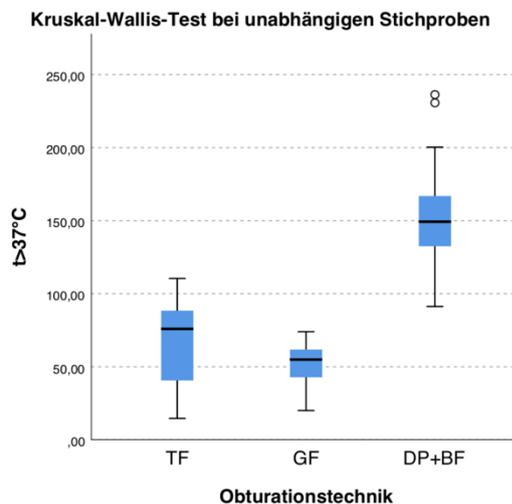


Abb. 49: Box-Plot von „ $t > 37^\circ\text{C}$ “ über die Kategorie Obturationstechnik

Hinsichtlich der gemessenen Werte zwischen Guttafusion und Thermafil ergaben sich keine signifikanten Unterschiede („Zeit über 47°C“ $p = 0,348$, „Zeit über 53°C“ $p = 1,000$, „Zeit bis 37°C“ $p = 0,138$). Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Werte von Thermafil und Guttafusion von den Werten der warm vertikalen Obturation signifikant (bei „Zeit über 47°C“, „Zeit über 53°C“ und „Zeit bis 37°C“ $p < 0,001$).

Aussage 5: Die Verteilung von „Zeit über 47°C“, „Zeit über 53°C“ und „Zeit bis auf 37°C abgekühlt“ ist über die Variablen der Kategorien „Obturatorstechnik“ und „ISO-Größe“ identisch.

Die Aussage 5 wird abgelehnt.

Die Zeiten, in denen die Wurzeloberfläche Temperaturen über 47°C und 53°C annehmen, sowie die Zeit, die die Wurzeloberfläche benötigt, um auf 37°C Körpertemperatur abzukühlen ist abhängig von der Art des Obturators und von der ISO Größe ($p < 0,001$).

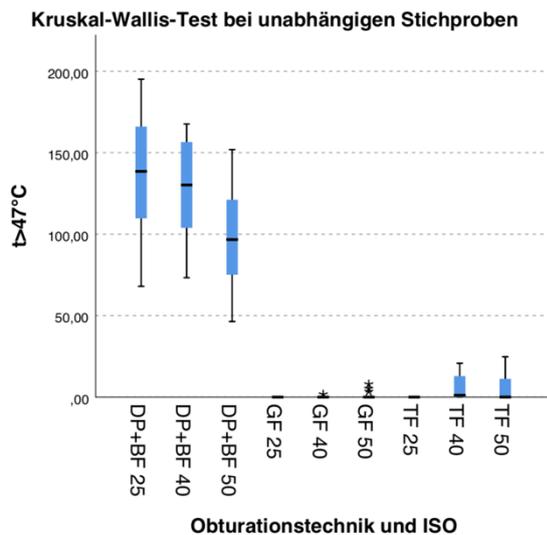


Abb. 50: Box-Plot von „ $t > 47^\circ\text{C}$ “ über die Kategorien Obturationstechnik und ISO-Größe

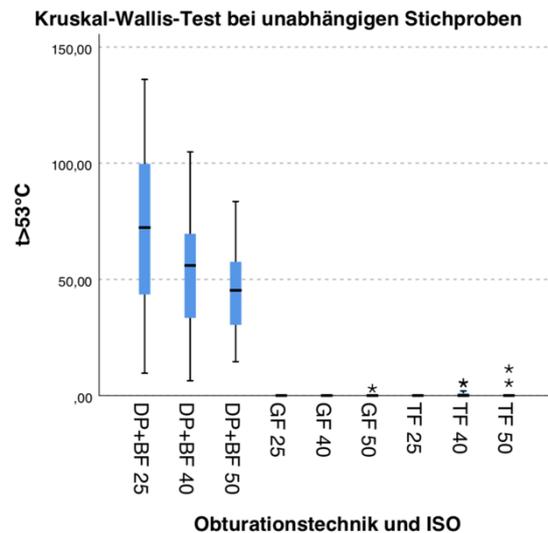


Abb. 51: Box-Plot von „ $t > 53^\circ\text{C}$ “ über die Kategorien Obturationstechnik und ISO-Größe

Der durchgeführte paarweise Stichprobenvergleich hat ergeben, dass die Werte für „Zeit über 47°C“ und „Zeit über 53°C“ zwischen Guttafusion und Thermoafil keine statistisch signifikanten Unterschiede zeigen ($p = 1,000$). Die Werte von Thermoafil und Guttafusion unterscheiden sich signifikant von den Werten der warm vertikalen Obturation ($p < 0,001$).

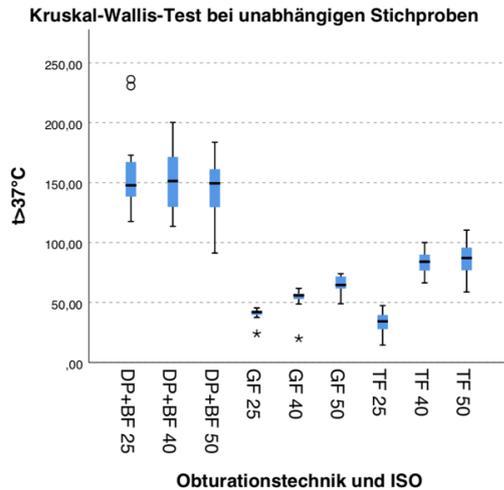


Abb. 52: Box-Plot von „ $t > 37^{\circ}\text{C}$ “ über die Kategorien Obturationstechnik und ISO-Größe

Der paarweise Stichprobenvergleich hat ergeben, dass sich die Werte für „Zeit bis 37°C “ bei Guttafusion und bei der warm vertikalen Obturation unabhängig von der ISO-Größe nicht signifikant voneinander unterscheiden ($p > 0,05$).

Signifikante Unterschiede ergibt der Vergleich der Thermafilobturatoren der ISO-Größe 025 mit Thermafilobturatoren der ISO-Größen 040 und 050 ($p < 0,001$).

Aussage 6: Die Zeit während der warm vertikalen Obturation, in der die Wurzeloberfläche Temperaturen über 60°C annimmt, ist abhängig von der ISO-Größe.

Die Aussage 6 wird abgelehnt.

Im Test der Zwischensubjekteffekte ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den ISO-Größen bei der warm vertikalen Obturation ($p=0,058$).

Dies wurde in den durchgeführten Post-hoc-Tests (Scheffè, Bonferroni, Games-Howell) durch paarweise Vergleiche in der Tabelle 32 bestätigt.

Scheffè: "Zeit über 60°C"			
	"DP+BF" 025	"DP+BF" 040	"DP+BF" 050
"DP+BF" 025	/	0,297	0,062
"DP+BF" 040		/	0,696
"DP+BF" 050			/
Bonferroni: "Zeit über 60°C"			
	"DP+BF" 025	"DP+BF" 040	"DP+BF" 050
"DP+BF" 025	/	0,364	0,058
"DP+BF" 040		/	1,000
"DP+BF" 050			/
Games-Howell: "Zeit über 60°C"			
	"DP+BF" 025	"DP+BF" 040	"DP+BF" 050
"DP+BF" 025	/	0,376	0,058
"DP+BF" 040		/	0,560
"DP+BF" 050			/

Tabelle 32: Post-hoc-Tests von „Zeit über 60°C“ über die Kategorie ISO-Größe bei der warm vertikalen Obturation

5.6 Hauptversuche: Kontrolle der Nullhypothesen

Nullhypothese 1: „Tmax“ und „ ΔT “ sind unabhängig von der Variable Zahn.

Nullhypothese 1 wird bestätigt (Aussage 1).

Nullhypothese 2: „Tmax“ und „ ΔT “ sind unabhängig von der ISO-Größe.

Nullhypothese 2 wird bestätigt (Aussage 2).

Nullhypothese 3: „Tmax“ und „ ΔT “ sind abhängig von der Art des Obturators/Füllmethode.

Nullhypothese 3 wird bestätigt (Aussage 3).

Nullhypothese 4: Die Zeit, in der die Wurzeloberfläche Temperaturen über 47°C bzw. 53°C annimmt und die Zeit bis zum Erreichen der Körpertemperatur 37°C sind abhängig von der Art des Obturators und der ISO-Größe.

Nullhypothese 4 wird bestätigt (Aussagen 4-5).

Nullhypothese 5: Die Zeit während der warm vertikalen Obturation, in der die Wurzeloberfläche Temperaturen über 60°C annimmt, ist abhängig von der ISO-Größe.

Nullhypothese 5 wird abgelehnt (Aussage 6).

6. Diskussion

Ziel dieser experimentellen Arbeit war die thermographische Untersuchung der trägerbasierten Obturationssysteme Thermafil® (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) und Guttafusion® (VDW GmbH, München, Deutschland) im Vergleich zum warm vertikalen Obturationssystem Super Endo α/β ® (B&L Biotech, Ansan, Südkorea).

In den Vorversuchen wurde das thermische Verhalten der trägerbasierten Systeme Guttafusion und Thermafil nach Entnahme aus dem jeweiligen Ofen aufgezeichnet.

In den Hauptversuchen wurde *in vitro* das thermische Verhalten von extrahierten einwurzeligen humanen Zähnen aufgezeichnet, nachdem sie mit den drei Obturationssystemen Thermafil, Guttafusion und Super Endo α/β gefüllt wurden.

6.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Messungen wurden mittels Infrarotmessverfahren ThermoImager TIM 450 (Micro-Epsilon Messtechnik, Ortenburg, Deutschland) durchgeführt.

Die Auflösung der mit der Standardoptik ausgestatteten Infrarotkamera thermoIMAGER TIM 450 beträgt 382 x 288 Pixel bei einer maximalen thermischen Empfindlichkeit von 40 mK. Ein Messintervall von 0,037 Sekunden ermöglicht die Aufzeichnung von 27 Messwerten pro Sekunde.

Die Temperaturmessung mittels Thermographie bietet zahlreiche Vorteile:

Die Thermographie ist ein kontaktloses, nicht invasives Verfahren. Es wird somit nicht in zu messende Vorgänge eingegriffen bzw. werden keine Strahlen ausgesandt. Die Infrarotmessung ist universell anwendbar und beliebig oft durchführbar. Außerdem kann die Maximaltemperatur einer Fläche gemessen werden (vgl. Kontaktpunkt beim Kontaktthermometer). Durch das aufgezeichnete Video kann bei der Thermographie die Temperaturentwicklung beobachtet werden [101].

Weiterentwicklungen in der Kamertechnologie und in der Software eröffnen zahlreiche Anwendungsgebiete. Im medizinischen Bereich stellt die infrarote Thermographie ein verlässliches und weit verbreitetes diagnostisches Verfahren dar. Temperaturerhöhungen, die oft Zeichen für Entzündungen, Malignitäten oder Infektionen sind, können somit auf der Hautoberfläche gemessen werden [101]. Die infrarote Thermographie wird außerdem zur Diagnose von Neuropathien bei Diabetes Mellitus [102], Gefäßerkrankungen und zur

Fiebertmessung verwendet. Die Fiebertmessung mittels infraroter Thermographie erfährt derzeit zur Früherkennung des neuartigen Coronavirus SARS-CoV-2 große Popularität [103, 104].

Außerdem spielt sie eine Rolle bei der Früherkennung und Monitoring von Brustkrebs, Bluthochdruck, rheumatischen Erkrankungen, Augenerkrankungen, Leber- und Nierenerkrankungen [105, 106]. In der Kardiologie kann die infrarote Thermographie ein Indikator für einen Herzinfarkt durch Früherkennung einer Arteriosklerose sein [101]. Auch in der Gynäkologie und in der Neurologie wird die infrarote Thermographie eingesetzt [107, 108].

Hussey et al. waren 1997 die Ersten, die eine Infrarotkamera in der dentalen Forschung eingesetzt haben. Sie maßen die Wurzeloberflächentemperatur über die gesamte Wurzellänge während der Stiftvorbohrung. Sie verwendeten die Infrarotkamera Thermovision 900 (Agema, Danderyd, Schweden), welche Bilder im Intervall von einer Sekunde aufzeichnete [109].

Die infrarote Thermographie wurde auch in weiteren zahnmedizinischen Studien als diagnostisches Mittel verwendet. Carson et al. untersuchten die Temperaturerhöhung bei der Kavitätenpräparation [110]. In anderen Studien wurde die Temperaturerhöhung in der Pulpa nach dem elektro-thermischen Ablösen von kieferorthopädischen Brackets an extrahierten Zähnen gemessen [111]. Außerdem wurde die Temperaturerhöhung an der äußeren Wurzeloberfläche nach chemomechanischer Aufbereitung mit dem Nd:YAG Laser gemessen [112, 113].

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Studien veröffentlicht, in denen die Temperaturmessung der Wurzeloberfläche mit einer Infrarotkamera durchgeführt wurde [49, 78, 82-86, 88, 96, 114].

Lipski verwendete in all seinen durchgeführten Studien die Infrarotkamera ThermoCam SC500 (Flir, Danderyd, Schweden) [78, 85, 86, 88, 96, 114]. Die Auflösung dieser Optik ist mit 320x240 Pixel geringer als die in unserer Studie verwendete Infrarotkamera. Außerdem wurden die Temperaturmaxima in allen Studien im Intervall von einer Sekunde [78, 85, 86, 88, 114] oder von zwei Sekunden [96] gemessen. Ulusoy verwendete die Infrarotkamera Fluke Ti55 (Fluke Corp., Plymouth, MN, USA) mit der Auflösung von 320x240 Pixel. Die Temperaturmessungen mit der Infrarotkamera wurden im 2-Sekunden-Intervall durchgeführt [84]. Auch die Infrarotkameras, welche von Behnia (Prism SP, FSI, Portland, OR) [82] und McCullagh (Thermovision 900, Agema Infrared systems, Danderyd, Schweden) [115] verwendet wurden, zeichnen die Maximaltemperatur im 1-Sekunden-Intervall auf. Die verglichen zu der in dieser Studie verwendeten Kamera TIM 450 (Messintervall von 0,037 Sekunden) geringeren

Messintervalle und geringere Pixelanzahl der Optik kann eine Erklärung für die gemessenen Temperaturunterschiede sein. So wurden in unseren Versuchsreihen starke Temperaturschwankungen vor allem bei hohen Temperaturen beobachtet. Eine hochfrequente Temperaturmessung vonseiten der Infrarotkamera ist zur qualitativen Aufwertung der generierten Daten notwendig.

Zu den Nachteilen der Messung mit der Infrarotkamera gehören, dass das zu messende Objekt während der Messung nicht in einem dem parodontalen Halteapparat nachgeahmten Medium eingebettet werden kann. Die zu messende Wurzeloberfläche muss wie in unseren Versuchsreihen in die Luft gehalten werden [79, 114, 115]. Nachteil dabei ist, dass die physiologische Wärmeableitung über das parodontale Gewebe und den parodontalen Blutfluss nicht simuliert werden kann [75].

Viapiana et al. bewiesen in ihren Studien, dass die Hitzeausstrahlung der Wurzeloberfläche in der Luft sich von der des parodontalen Halteapparats unterscheidet. Temperaturerhöhungen an der Wurzeloberfläche wurden in der Luft und zur Simulation des parodontalen Halteapparats getränkt in Hanks Salzlösung (BSS) bzw. gelatinisiert in Hanks Salzlösung (BSS) aufgezeichnet. Die maximal gemessene Temperaturerhöhung nach Einführen des Hitzepluggers war die in der Luft gemessene, sie betrug ca. 60°C, während an Wurzeloberflächen in Hanks Salzlösung maximale Temperaturerhöhungen von 12°C bzw. 23°C gemessen wurden [99].

Eine Alternative zur Thermographie, welche in der Literatur zur Messung der Wurzeloberfläche häufig Verwendung fand, ist die Messung mit einem Kontaktthermometer [69, 70, 75-77, 79-81].

Kontaktthermometer ermöglichen eine Temperaturmessung an mehreren Wurzelkanalabschnitten. So können beispielsweise die Temperaturmaxima am zervikalen, mittleren und apikalen Wurzeldrittel aufgezeichnet werden und miteinander verglichen werden [81]. Ein Vorteil dieser Messmethode ist, dass die Messung nicht in der Luft, sondern in einem Medium erfolgen kann. So wurde in mehreren Studien versucht, den parodontalen Halteapparat mit seiner abschwächenden Temperaturweiterleitung zu simulieren.

Romero et al. benutzten Alginat, das eine ähnliche Temperaturleitfähigkeit wie der parodontale Halteapparat haben soll [77]. Auch Donnermeyer et al. benutzten in Plastikbehältern eingebettetes Alginat zur Simulation des parodontalen Halteapparats [97]. Marroquin et al. fixierten die Versuchszähne in Harz [116], Bierma et al. simulierten den parodontalen

Halteapparat, indem sie den zu messenden Zahn in 37°C erwärmtes Wasser, welches durch eine Wärmepumpe bei konstanter Temperatur gehalten wurde, hielten [117].

Die Temperaturmessung mittels Kontaktthermometer bringt jedoch eine Reihe von Nachteilen mit sich. Durch die willkürliche Anbringung der Messfühler an die Zahnwurzel ist eine genaue Angabe über die Temperaturentwicklung an der Wurzeloberfläche nicht zu treffen. Der Punkt mit der höchsten Erwärmung („Hot-Spot“) an der Wurzeloberfläche kann daher nicht eindeutig bestimmt werden und somit kann keine sichere Aussage getroffen werden, ob die aufgezeichneten Temperaturen wirklich der Maximaltemperatur entsprechen. Mc Cullagh et al. fanden heraus, dass während derselben Obturation die Messfühler des Kontaktthermometers eine um 14,5°C geringere Maximaltemperatur aufzeichneten als die Infrarotkamera [115].

Lee et al. verwendeten zur Messung der Wurzeloberfläche gar nur einen einzelnen Messfühler, der 2 mm apikal von der Schmelz-Zement-Grenze befestigt wurde [79]. Eine differenziertere Temperaturmessung kann erreicht werden, wenn mehrere Messfühler am Zahn angebracht werden, um die Temperatur mehrerer Punkte zu messen [118].

Venturi et al. verwendeten beispielsweise ein Kontaktthermometer mit zwei Messfühlern. Ein Messfühler wurde 1,5 mm über dem Apex befestigt, der andere 2 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze [80]. Beraldo et al. verwendeten drei Messfühler, welche am apikalen, medialen und koronalen Drittel der Zahnwurzel befestigt wurden. Der Temperaturwert wurde alle fünf Sekunden gemessen und aufgezeichnet [81].

Auch Donnermeyer et al. verwendeten drei Messfühler, welche sie in die extra dafür gebohrten Seitenkanäle einführten [97]. Floren et al. verwendeten zehn Messfühler, welche am Versuchszahn angebracht wurden [119]. Selbst bei einer großen Anzahl an Messfühlern ist jedoch nicht davon auszugehen, dass einer der Messfühler vorhersagbar die höchste erzeugte Temperatur auf der Wurzeloberfläche misst.

Eine weitere Möglichkeit der Temperaturmessung am Zahnmodell besteht in der „Finite Elemente Analyse“ (FEA), einem numerischen, computergestütztem Verfahren, bei dem der Obturationsvorgang simuliert und die Temperaturerhöhung an der Wurzeloberfläche berechnet werden kann [120, 121]. Die FEA beruht jedoch auf bereits durch in vivo oder in vitro festgelegten Durchschnittswerten bzw. bei nicht vorhandenen Werten auf Schätzungen. So stellt die FEA eine Alternative zur Simulation des Versuchs dar. Die dabei generierten Werte sollten jedoch zur Validierung durch experimentelle Versuche bestätigt werden [122].

Die vorliegende Studie wurde unter strikt standardisierten Bedingungen durchgeführt. Die Versuche wurden in einer für diese Studie angefertigten, mit schwarzer Folie ausgekleideten Plexiglasbox durchgeführt, welche Lichtreflexionen verhindert und Messfehler minimiert. Die verwendete Infrarotkamera thermoIMAGER TIM (Micro-Epsilon) ragt in die Plexiglasbox und lässt keine Lichteinschlüsse zu. Versuchsreihen, die in einer extra dafür angefertigten Versuchsbox durchgeführt wurden, um einheitliche Versuchsabläufe unter standardisierten Bedingungen aufzuzeichnen, sind nicht bekannt.

Außerdem wurden alle Temperaturmessungen der Wurzeloberflächen in den Hauptversuchen einheitlich bei einer Temperatur von 37°C durchgeführt. Mit dem Mini-Keramikheizer (GO/ON, Hagebaumarkt, Soltau, Deutschland) wurde die Temperatur in der Versuchsbox vor Versuchsbeginn auf 37°C eingestellt, die Messungen wurden durchgeführt, sobald die Wurzeloberfläche ebenfalls eine Temperatur von 37°C erreicht hatte. Dabei orientierte sich die vorliegende Studie an den Versuchsreihen von Donnermeyer et al. und Hand et al., welche ebenso eine Umgebungstemperatur von 37°C während der Versuchsdurchführung wählten [75, 97], andere Versuchsreihen wurden bei 21°C [115], 27°C [81, 116] oder 28 °C [88] durchgeführt.

6.2 Einflussfaktoren

In den durchgeführten Vorversuchen wurden die Daten für die Maximaltemperatur („T_{max}“) und Zeit, die der Träger zum Abkühlen auf 64°C benötigt („Zeit über 64°C“) aufgezeichnet. Die Faktoren Emissionsgrad, ISO-Größe des Obturators und die Einstellungsstufe im Guttafusion-Ofen bzw. die Zeit nach dem ersten Signalton im Thermaprep-Ofen wurden dabei variiert.

Um die Abhängigkeit vom Emissionsgrad zu überprüfen, wurden die Versuche bei Emissionsgrad = 1 und Emissionsgrad = 0,95 durchgeführt. Der Emissionsgrad eines Objektes gibt an, wieviel Wärmestrahlung das Objekt im Vergleich zu einem schwarzen Strahler (Emissionsgrad 1, 100%/100%) abgibt [87].

Studien, welche den Emissionsgrad auf der Oberfläche der trägerbasierten Systeme Guttafusion oder Thermafil bestimmten, sind nicht bekannt.

Lipski et al. und Ulusoy et al. ermittelten in ihren Versuchsreihen für die Temperaturmessung der Wurzeloberflächen den Emissionsgrad 0,91 [84, 88].

Kells et al. setzten den Emissionsgrad für Schmelz bei 0,65 an. Dafür wurde ein Oberkiefer Frontzahn in einem 70°C heißen Ofen für 24 Stunden erhitzt. Nach 24 h wurde nach Öffnen

der Ofentür ein thermographisches Bild angefertigt. Über ein Kalibrierungsprogramm wurde der Emissionsgrad bestimmt [90].

Soori et al. fanden heraus, dass der Emissionsgrad für Schmelz 0,96 im Bereich zwischen 20°C und 40°C und 0,97 im Bereich zwischen 40°C und 60°C ist. Der Emissionsgrad von Dentin beträgt 0,92 im Bereich zwischen 20°C und 40°C und 0,93 im Bereich zwischen 40°C und 60°C [123].

Zur Bestimmung eines unbekanntem Emissionsgrades kann ein Kontaktthermometer mit einem Messfühler verwendet werden, der die Temperatur des Messobjektes bestimmt. Anschließend wird die Temperatur des Messobjektes mit der Infrarotkamera gemessen und der Emissionsgrad so lange verändert, bis die angezeigte Temperatur mit der mit dem Kontaktthermometer gemessenen Temperatur übereinstimmt.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Emissionsgrades eines unbekanntem Objekts besteht darin, spezielle Kunststoffaufkleber mit bekanntem Emissionsgrad auf dem Messobjekt zu positionieren. Die Temperatur wird mit dem Infrarotmessgerät bei entsprechendem Emissionsgrad gemessen. Anschließend wird die Temperatur des Messobjektes ohne Aufkleber gemessen und der Emissionsgrad so lange verstellt, bis der korrekte Temperaturwert angezeigt wird.

Außerdem kann der Emissionsgrad eines unbekanntem Objektes bestimmt werden, indem das Messobjekt mit einer matt schwarzen Farbe beschichtet wird, für die ein Emissionsgrad von 0,95 angegeben wird. Nun wird die Temperatur dieses „Schwarzen Strahlers“ gemessen. Anschließend wird die Infrarotkamera auf eine nicht beschichtete Stelle des Objektes gerichtet und der Emissionsgrad solange verändert, bis die Temperatur mit der zuvor am „Schwarzen Strahler“ gemessenen Temperatur übereinstimmt [124].

Der Einflussfaktor ISO-Größe wurde in keiner bisher veröffentlichten Studie variiert und miteinander verglichen. So erhält Lipski bei Zähnen, welche mit Thermafilträgern der ISO-Größe 040 abgefüllt wurden eine durchschnittlich um 1°C geringere Maximaltemperatur als Behnia, welcher die Zähne mit Thermafilträgern der ISO-Größe 045 abgefüllt hat [82, 86].

In vielen Studien wurden die Zähne auf dieselbe Größe aufbereitet und abgefüllt. Die Abhängigkeit der Aufbereitung auf die Temperaturerhöhung der äußeren Wurzeloberfläche wurde nicht untersucht.

Diegritz et al. bereiteten alle Zähne mit dem MTwo System bis 40.04 auf, bevor sie mit drei verschiedenen warmen Obturationssystemen gefüllt wurden [89].

Beraldo et al. bereiteten ihre 45 Prämolaren mit Reciproc Blue auf ISO 040 auf [81].

Ulusoy et al. bereiteten ihre Versuchszähne mit ProTaper ebenfalls auf ISO 040 auf [84].

Auch in anderen Studien wurden alle Versuchszähne auf ISO 040 aufbereitet [78, 88].

Marroquin et al. bereiteten die sechs Frontzähne mit der „Crown-down-technique“ auf die Größen 30/.04, 30/.06, 35/.04, 35/.06, 40/.04 und 40/.06 mit ProFile® (Dentsply Maillefer, Ballaiques, Switzerland) auf [116].

Lipski et al. erweiterten in einer ihrer Studien die Oberkiefer Frontzähne auf ISO 045 und die Unterkiefer Frontzähne auf ISO 035 mit Handfeilen [114].

Versuchsreihen zu den Auswirkungen auf die Temperatur des Obturators durch Variierung der Einstellungsstufe im Guttafusion-Ofen hat es bis dato noch nicht gegeben.

Auch die Herstellerangabe, die besagt, dass der Obturator für einen Zeitraum von maximal 120 Sekunden nach dem akustischen Signalton aus dem Thermanprep-Ofen entnommen werden kann, wurde bisher in keiner veröffentlichten Publikation experimentell überprüft.

6.3 Messproben

Für die Hauptversuche wurden 90 einwurzelige humane Prämolaren verwendet. Prämolaren mit zwei Kanälen oder zwei Wurzeln, Furkationskanälen, offenen Foramina oder bereits endodontisch vorbehandelte Prämolaren wurden nicht verwendet. In vielen Studien wurden für die Messungen ebenfalls Prämolaren verwendet [78, 81, 84, 86, 89, 99, 115], andere Studien wurden nur mit Frontzähnen durchgeführt [96, 98, 114, 116, 119]. In weiteren Studien wurden Versuche an Frontzähnen und Molaren kombiniert durchgeführt [77, 80, 82].

Der Grund für die Verwendung von ausschließlich Prämolaren ist neben der einfachen Verfügbarkeit (z.B. Extraktionen aus kieferorthopädischen Gründen) eine möglichst hohe Standardisierung der Wurzelgeometrie. Den Autoren der vorliegenden Arbeit ist bewusst, dass sich die Wurzelgeometrie unterschiedlicher Zähne in Länge, Dicke und Zusammensetzung unterscheidet. Ziel der vorliegenden Studie war es jedoch, den direkten Vergleich der Obturationssysteme unter einheitlichen Bedingungen zu ermöglichen. So konnte in den vorliegenden Untersuchungen bewiesen werden, dass die unterschiedliche Wurzelkanalanatomie der Prämolaren und somit der Faktor Zahn keinen signifikanten Einfluss auf die Messwerte hatte (Siehe Aussage 1, Hauptversuche).

Silver et al. führten ihre Versuche an standardisierten Epoxidharzblöcken mit einem Hauptkanal und jeweils fünf lateralen Kanälen durch. Dabei wurden die Wurzelfüllqualität und die Temperaturerhöhung an der internen und externen Dentinwand nach Obturation mit System B®

(SybronEndo, Orange, USA) und Touch'n Heat[®] (beide SybronEndo, Orange, USA) gemessen und verglichen [76]. Dieser Versuchsaufbau erlaubt den direkten Vergleich zwischen den Obturationssystemen, da Variablen wie die verschiedenen Dentindicken von humanen Zähnen ausgeschlossen werden können. Die Verwendung von Epoxidharzblöcken stellt jedoch nur eine Annäherung an die klinische Situation dar. Epoxidharz hat andere physikalische Eigenschaften und besitzt nicht dieselbe Wärmeleitfähigkeit wie Dentin.

In vielen anderen Studien wurde das thermographische Verhalten von Wurzelfüllsystemen während der Obturation an nicht humanen Zähnen untersucht.

Molyvdas et al. füllten in vivo Zähne von Hunden, wobei 26 Wurzelkanäle mit der kalten lateralen Obturation gefüllt wurden und 30 Wurzelkanäle mit Obtura II[®] (Obtura Spartan, Fenton, USA). Die Zähne mitsamt Zahnhalteapparat wurden in einem Zeitraum von 1, 3, 7, 28 und 56 Tagen röntgenologisch beobachtet und nach Einschlafen der Hunde in mikroskopischen Schnittbildern untersucht [91].

Eine ähnliche Versuchsreihe führten Castelli et al. durch, als sie in vivo die Auswirkung der lateralen thermoplastischen Obturationsmethode mit Endotec[®] (Castolin Eutetic, Kriftel, Deutschland) im Vergleich zu einer warm vertikalen Kondensationstechnik auf das parodontale Gewebe von Affen studierten.

Die Versuche von Castelli et al. und Molyvdas et al. sind in vivo Versuche und ähneln so der klinischen Realität an humanen Zähnen. Umwelteinflüsse wie die Umgebungstemperatur oder die Anatomie des Zahnes mitsamt Zahnhalteapparat müssen nicht simuliert werden. Nachteilig ist neben der unterschiedlichen Zahnanatomie von Tierzähnen gegenüber Menschenzähnen auch der mögliche ethische Aspekt von Tierversuchen anzuführen.

Großes Augenmerk wurde zudem auf die Standardisierung der Untersuchungsgruppen gelegt. Die Aufteilung der 90 Prämolaren in die drei Gruppen A, B und C erfolgte nach dem apikalen Durchmesser des Wurzelkanals, nach der die Zähne mit dem Reciproc Blue System auf ihre endgültige Aufbereitungsgröße aufbereitet wurden. Alle Zähne, bei denen die K-Feile mit ISO-Größe 015 nach Trepanation nicht auf Arbeitslänge in den Wurzelkanal eingebracht werden konnte, kamen in Gruppe A. Diese Zähne wurden mit der R25 Feile aufbereitet. Zähne, bei denen die K-Feile mit ISO-Größe 025 problemlos auf Länge eingeführt werden konnte, kamen in Gruppe C. Diese Zähne wurden mit der R50 Feile aufbereitet. All jene Zähne, bei denen die K-Feile mit ISO-Größe 015 auf Arbeitslänge in den Wurzelkanal eingebracht werden konnte, die K-Feile mit ISO-Größe 025 jedoch nicht, kamen in Gruppe B. Sie wurden mit der R40 Feile aufbereitet.

Einen ähnlichen Ansatz wählte Venturi et al. Die Einteilung der Versuchszähne in zwei Gruppen erfolgte nach der apikalen Beschaffenheit. Zähne mit einer apikalen Dicke von 0,20-0,25 mm kamen in Gruppe 1, Zähne mit einer apikalen Dicke von 0,3-0,35 mm wurden Gruppe 2 zugeteilt [80].

Beraldo et al. verzichteten hingegen auf diese Standardisierung. Die Einteilung der 45 verwendeten Prämolaren in drei Gruppen erfolgte willkürlich, alle Zähne wurden einheitlich mit der R40 Reciproc Feile aufbereitet [81].

Um für alle Prämolaren dieselbe Arbeitslänge zu verwenden und um die Versuchsdurchführung weiter zu vereinheitlichen, wurde die Zahnlänge auf 18 mm gekürzt, sodass jeder Obturator auf Arbeitslänge 18 mm eingestellt werden konnte. Ziel des standardisierten Vorbereitens der Zähne war es, eine einheitliche Wurzelkanallänge zu garantieren.

Beraldo et al. gingen in ihrer Studie ähnlich vor und trennten die verwendeten Prämolaren an der Schmelz-Zement-Grenze. Die Wurzellänge wurde so auf 12 mm vereinheitlicht [81].

In unseren Versuchsreihen wurde der Zahn nicht an der Schmelz-Zement-Grenze gekappt, sondern die Arbeitslänge wurde unabhängig davon auf beschriebene 18 mm festgelegt. Eine im Vergleich zu Beraldo um 6 mm längere Arbeitslänge wurde aufgrund des Versuchsaufbaus gewählt. Der weiter koronal liegende Anteil des Zahnes wurde in die Tofflemire-Matrize eingespannt, während die komplette Zahnwurzel in die Luft und somit in das Messfeld der Infrarotkamera ragte. Vorteil dieser Vorgangsweise war, dass ausschließlich die Wurzeloberfläche in die Temperaturmessung einbezogen wurde und keine Messfehler durch Messungen an der Zahnkrone entstanden sind.

Um den möglichen Einfluss eines Wurzelkanalsealers auf die Temperaturerhöhung an der Wurzeloberfläche einzubeziehen, wurde die Kanalinnenwand des jeweiligen Zahns vor der Obturation mit einer dünnen Schicht Sealer, AH Plus® (DentsplyDeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland), bestrichen.

Die Wärmeleitfähigkeit von Sealer wird in der Literatur kontrovers diskutiert.

Keles et al. überprüften in ihren Versuchsreihen die Wärmeleitfähigkeit der fünf Sealer AH Plus®, Sealapex® (Kerr, Bioggio, Schweiz), AH 26® (Dentsply Maillefer, Ballaiques, Switzerland), Endomethasone® (Septodont, Niederkassel, Deutschland) und RoekoSeal® (Coltene, Altstätten, Schweiz). Generell sind Sealern schlechte Wärmeleiter, wobei AH Plus über die beste Wärmeleitfähigkeit der genannten Sealer verfügt [125].

Barkhordar et al. bewiesen, dass endodontischer Zement die Temperatur an der Wurzeloberfläche um 1-2°C senken kann [126].

Hardie et al. haben hingegen herausgefunden, dass Sealer die Temperaturweiterleitung nicht beeinflusst. Dafür wurden humane Oberkiefer Eckzähne in vitro gefüllt, in einer Versuchsreihe mit Verwendung eines Wurzelkanalsealers, in einer anderen Versuchsreihe ohne Verwendung eines Wurzelkanalsealers. Die Temperatur an der Wurzeloberfläche wurde im apikalen und mittleren Wurzeldrittel mit Kontaktthermometern gemessen. Die Maximaltemperaturen, welche nach Wurzelfüllungen mit Sealer gemessen wurden zeigten keine signifikanten Unterschiede zu den Maximaltemperaturen, welche bei Wurzelfüllungen ohne Sealer gemessen wurden [70].

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Temperaturmessungen an der Oberfläche des Obturators

Untersucht wurden die Träger verschiedener ISO-Größen der Obturationssysteme Guttafusion® von VDW Dental und Thermafil® von Dentsply Maillefer. Das Ziel der Untersuchung war zum einen die Überprüfung der Herstellerangaben bzgl. der Verarbeitungsdauer bzw. Zeit, in der die Guttapercha noch in einer fließfähigen Form vorliegt und zum anderen die Messung der tatsächlichen Temperatur der Obturatoren nach Entnahme aus dem Ofen. Diese Temperatur hat maßgeblichen Einfluss auf die werkstoffkundlichen Eigenschaften nicht nur der Guttapercha, sondern auch auf die Materialeigenschaften des verwendeten Sealers.

VDW Dental gibt in ihren Produktbeschreibungen für das System Guttafusion eine Schritt-für-Schritt Anleitung zur korrekten Verwendung der Obturatoren an. Dabei wird darauf hingewiesen, dass die „Guttafusion for Reciproc blue“ Träger R25, R40 und R50 allesamt auf Einstellungsstufe 1 erhitzt werden sollen. Der Ofen selbst erkennt jedoch nicht, welcher Träger erhitzt wird, der technische Vorgang der Erwärmung ist für jede Einstellungsstufe stets derselbe. Einstellungsstufe 2 und 3 sollen explizit nicht für Guttafusionsträger verwendet werden. VDW gibt an, dass beispielsweise bei Verwendung des kunststoffträgerbasierten Systems GuttaMaster® die Träger der Größe 30-60 in der Aufheizeinstellung 2 erhitzt werden sollen.

VDW macht keine Angaben bezüglich einer Maximaltemperatur oder der Dauer, in der der Träger nach Entnahme aus dem Ofen in den Wurzelkanal eingebracht werden muss.

Aus den Vorversuchen geht hervor, dass die Träger R25, R40 und R50 auf Stufe 1 erhitzt Maximaltemperaturen zwischen 77,34°C beim Träger der ISO-Größe 025 und 93,48°C beim Träger mit ISO-Größe 050 erreichen. Die Träger halten sich durchschnittlich zwischen 4,62 und 11,67 Sekunden über 64°C.

Auffallend ist, dass der Träger R50 auf Stufe 1 eine deutlich höhere Maximaltemperatur annimmt als die beiden Träger R25 und R40, die sich auf einem ähnlichen Temperaturniveau halten. Dementsprechend länger hält sich dieser über 64°C.

Obturatoren auf Stufe 1 und auf Stufe 2 erhitzt liefern bei den Trägern R25 und R40 statistisch nicht signifikant unterschiedliche Daten für Maximaltemperatur „Tmax“ und „Zeit über 64°C“. Stufe 3 liefert bei diesen Trägern höhere Daten für die Maximaltemperatur „Tmax“ und die „Zeit über 64°C“.

Bei R50 ähneln sich die Daten für die Maximaltemperatur „Tmax“ und die „Zeit über 64°C“ für Stufe 1 und Stufe 3. Stufe 2 zeigt deutlich geringere Ergebnisse.

Diese Diskrepanz zwischen den Stufen 1, 2 und 3 findet sich sowohl bei Emissionsgrad 0,95 als auch bei Emissionsgrad 1. Die Ergebnisse beruhen auf Mittelwerte aus 15 einzelnen Messungen und der Begrenzung auf die doppelte Standardabweichung. Eine mögliche Begründung für die unterschiedlichen Maximaltemperaturen könnte der nicht immer perfekt mittig liegende Kern aus kreuzvernetzten Polymerketten-Guttapercha sein, welcher nicht an jedem Träger homogen mit Alpha-Guttapercha ummantelt ist.

Außerdem könnte die nicht standardisierte Umgebungstemperatur bei der Versuchsdurchführung einen gewissen Einfluss auf die unterschiedlichen Messungen zwischen Stufe 1 und den Stufen 2-3 erklären.

Wir stellen fest, dass, trotz der Diskrepanzen bei der Messung am Träger R50, alle Träger mit allen verfügbaren Größen nach Entnahme aus dem Ofen unter der von Marciano et al. als kritisch angesehenen Temperatur von 100°C blieben [127]. Dies war unabhängig von der ausgewählten Stufe im Ofen und unabhängig vom ausgewählten Emissionsgrad. Alle drei Stufen im Guttafusion-Ofen erhitzen die Obturatoren der drei Größen R25, R40 und R50 ausreichend stark. Die Träger halten sich 4,62-11,67 Sekunden in einer fließfähigen und viskösen Form. Der Behandler hat somit zwischen 4,62 und 11,67 Sekunden Zeit, um den Obturator nach Entnahme aus dem Ofen im Wurzelkanal zu platzieren.

Jedoch können 4-5 Sekunden im klinischen Alltag möglicherweise nicht ausreichen, den Obturator aus dem Ofen zu entnehmen und bis auf Arbeitslänge in den Wurzelkanal einzubringen. Dies wäre eine mögliche Erklärung für die Schwierigkeit, stärker gekrümmte Kanäle dicht und homogen zu füllen, was bereits die Studie von Neuhaus et al. aufzeigt [128].

Auch Dentsply Maillefer gibt in ihrer Produktbeschreibung für Thermafil eine Schritt-für-Schritt Anleitung. Im Unterschied zu VDW gibt hier der Hersteller an, dass 8-10 Sekunden nach Entnahme aus dem Ofen die Obturation erfolgen sollte.

Am Thermaprep-Ofen kann im Gegensatz zum Guttafusion-Ofen die Heizdauer der verschiedenen Trägergrößen reguliert werden. ISO-Größe 25 werden laut Hersteller 20 Sekunden vorgeheizt, die ISO-Größen 30-60 werden 41 Sekunden vorgeheizt. Der Hersteller gibt an, der Thermaprep-Ofen schalte sich nach 90 Sekunden automatisch ab.

Auch in den Versuchsreihen mit dem System Thermafil wurden die Maximaltemperatur „Tmax“ und die Zeit über 64°C erfasst. Variiert wurde der Emissionsgrad, die ISO-Größe des

Trägers und die Zeit, die nach dem ersten Signalton gewartet wurde, nachdem der Träger aus dem Ofen entnommen wurde.

Die erreichten durchschnittlichen Maximaltemperaturen erzielen Werte von 82,35°C bis 124,1°C und die Zeit über 64°C reicht von 5,22 Sekunden bis hin zu 23,89 Sekunden.

Der Thermafilträger mit ISO-Größe 025 erreicht Maximaltemperaturen von 82,35°C-96,61°C. Erfolgte die Entnahme des Trägers direkt oder 120 Sekunden nach Ertönen des Signaltons ist die Maximaltemperatur deutlich geringer. Den Maximalwert erreicht der Träger bei Entnahme 30 Sekunden nach dem Signalton.

Der Thermafilträger mit ISO-Größe 040 nimmt höhere Temperaturen an (98,69°C-124,1°C) als der Träger mit ISO-Größe 025. Er hält sich zwischen 15,7 und 23,89 Sekunden über 64°C. Die Maximaltemperatur wird bei sofortiger Entnahme (E=1, 116,93°C) bzw. nach 30 Sekunden (E=0,95, 124,1°C) gemessen.

Sehr ähnlich verhält es sich mit dem Thermafilträger der ISO-Größe 050. Erreichte Maximaltemperaturen liegen zwischen 98,71°C und 120,69°C. Auch hier wurden die geringsten Maximaltemperaturen beim Herausnehmen des Trägers 120 Sekunden nach dem akustischen Signalton gemessen.

Emissionsgrad 0,95 weist stets die höheren Maximaltemperaturen auf.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die gemessenen Daten für „Tmax“ und die „Zeit über 64°C“ bei Guttafusion signifikant geringer sind als bei Thermafil.

Dabei sind es vor allem die Thermafilträger der Größen 040 und 050, welche höhere Maximaltemperaturen annehmen und sich somit auch länger über 64°C halten als der Thermafilträger der Größe 025 und die drei Guttafusionsträger R25, R40 und R50.

Auch der Thermaprep-Ofen erhitzt die Thermafilträger verlässlich. Der Träger kann sowohl direkt nach dem Signalton, aber auch 15, 30, 60, 90 oder 120 Sekunden nach dem Signalton aus dem Ofen entnommen werden.

In den ersten 90 Sekunden nach dem akustischen Signal halten sich die Thermafilträger nach der Entnahme zwischen 7,95 und 23,89 Sekunden über der Temperatur von 64°C. Dies entspricht den vom Hersteller angegebenen 8-10 Sekunden, nach denen die Obturation erfolgen sollte. Der Träger kann für die ISO-Größen 040 und 050 sogar 120 Sekunden im Ofen belassen werden, er bleibt zwischen 14,36 und 18,49 Sekunden über der Temperatur von 64°C. Der Thermafilträger der ISO-Größe 025 bleibt nach 120 Sekunden 7,69 (E=1) bzw. 5,22 (E=0,95) Sekunden über 64°C. Bei dem Träger dieser ISO-Größe sollte die Entnahme daher innerhalb der vorgegebenen 90 Sekunden erfolgen.

Vergleichbare Studien, bei denen trägerbasierte Wurzelfüllmaterialien nach Entnahme aus dem Ofen thermographisch gemessen wurden, sind nicht bekannt. Auch Studien zu den Einstellungsstufen im Guttafusion-Ofen und zur verstrichenen Zeit nach dem Signalton im Thermaprep-Ofen sind nicht bekannt.

Marciano et al. konnten in ihren Studien beweisen, dass eine Erhitzung von Guttapercha auf über 100°C zu irreversiblen Veränderungen in der molekularen Struktur führt [127]. Maniglia-Ferreira et al. fanden heraus, dass eine Erhitzung der Guttapercha über 130°C zu physikalischen Veränderungen und in den durchgeführten thermogravimetrischen Analysen wurde gezeigt, dass eine Erhitzung zu Masseverlust und somit zur Schwächung in der Struktur der Guttapercha führt [129].

Welche Auswirkungen die beschriebenen Veränderungen in der Guttapercha haben und wie sich diese auf die Homogenität, Dichtigkeit und Fließfähigkeit der Wurzelkanalfüllung auswirken, bleibt Gegenstand weiterer Forschung.

Auch der Einfluss von Temperatur auf die chemomechanischen Eigenschaften der epoxidharzbasierten und calciumsilikatbasierten Wurzelkanalsealer ist Gegenstand zahlreicher aktueller Studien [130-135]. Vipapiana et al. stellten eine reduzierte Druckfestigkeit, Abbindezeit und Fließfähigkeit von epoxidharzbasierten Sealern unter Hitzeeinwirkung bei 100°C fest [134, 136]. Camilleri et al. fanden heraus, dass die Anzahl der Aminogruppen, die als Initiatoren für die Polymerisationsreaktion gelten, im epoxidharzbasierten Sealer AH Plus bei Hitzeeinwirkung verringert wird. So sinkt die komplexe Viskosität des Sealers AH Plus bei Wärmezufuhr [136].

Auch Atmeh et al. untersuchten chemische Veränderungen an epoxidharzbasierten Sealern bei Erwärmung über 100°C, hervorgerufen durch Brüche im Epoxidring und durch strukturelle Veränderungen im Harz. Zinkoxideugenolbasierte Sealer erfahren bei Erhitzung über 100°C einen irreversiblen Wasserverlust. Die Verwendung der genannten Sealergruppen in Kombination mit der warm vertikalen Obturation wird von den Autoren nicht empfohlen [131].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl bei Emissionsgrad 1 als auch bei Emissionsgrad 0,95 keine durchschnittliche Maximaltemperatur der Guttafusionsträger R25, R40 und R50 größer als 100°C gemessen wurde.

Auch wenn nach Herstellerangaben die Träger nach dem 1. Signalton entnommen werden, erreichen Thermafilträger der Größen 040 und 050 Maximaltemperaturen von deutlich mehr

als 100°C und können somit theoretisch Einfluss auf die materialkundlichen Eigenschaften der Wurzelfüllmaterialien haben.

Die in den Vorversuchen gemessenen Temperaturen direkt nach Entnahme des Trägers aus dem jeweiligen Ofen sind entscheidend für die Temperaturerhöhung auf der Wurzeloberfläche nach erfolgter Obturation [72].

Diese Temperaturerhöhung wurde in den Hauptversuchen untersucht.

6.4.2 Temperaturmessungen an der Wurzeloberfläche

Eine Temperaturerhöhung von über 10°C am periradikulären Gewebe wird in der Literatur als gewebeschädigend beschrieben [68-72].

Eriksson et al. stellten 1983 in einer Studie fest, dass eine Erwärmung der Wurzeloberfläche über 47°C zu irreversiblen Schäden am Knochengewebe führt. Dabei wurden die Schienbeine (Tibiae) von 15 Hasen auf verschiedene Temperaturen erhitzt. Die Hasenknochen der Gruppe A wurden auf 50°C für eine Minute, die Hasenknochen der Gruppe B wurden auf 47°C für fünf Minuten und die Hasenknochen der Gruppe C wurden auf 47°C für eine Minute erhitzt. Die Erhitzung des Hasenknochens brachte in den ersten beiden Stunden nach der Erwärmung keine histologischen Gewebeveränderungen. Nach 2-5 Tagen verfärbten sich die Fettzellen. Nach zwei Wochen wurden diese verfärbten Fettzellen resorbiert. In den Gruppen A und B kam es im Anschluss zu einer Fettzellinvasion, diese blieb in Gruppe C aus. Nach 20-30 Tagen begann in Gruppe A und Gruppe B eine Knochenresorption, wobei 30-40% des Knochens resorbiert wurden. Der resorbierte Knochen wurde 40 Tage nach Erhitzung von weiteren Fettzellen eingenommen. So wurde der Knochen durch Fettzellen ersetzt. In Gruppe C kam es zu keiner initialen Fettzelleinwanderung und die Knochenresorption war langsamer und weniger stark ausgeprägt, ca. 10% des Knochens wurden resorbiert [68].

Eriksson zeigte in einer weiteren Untersuchung, dass eine Erhitzung über 53°C über eine Minute zur Denaturierung der Alkalinphosphate und somit zu irreversiblen Knochenschäden führt [73].

Wiederum andere Studien belegen, dass eine Erwärmung des Knochens über 60°C zu einer definitiven Knochennekrose führt [73, 74].

In der vorliegenden experimentellen Studie wurden drei verschiedene Obturationstechniken auf die von Eriksson beschriebenen kritischen Temperaturen untersucht: Die trägerbasierten

Systeme Thermafil von Dentsply/Maillefer und Guttafusion von VDW Dental sowie das warm vertikale Obturationssystem Super Endo α/β von B&L Biotech.

Mehrere thermographische Studien untersuchten ebenfalls die Obturation mit trägerbasierten Materialien [82, 86, 93-95, 98].

Behnia et al. maßen in vitro mit einer Infrarotkamera durchschnittliche Temperaturerhöhungen an der äußeren Wurzeloberfläche eines Oberkiefermolaren von 4,26°C im mesiobukkalen Kanal, 4,58°C im distobukkalen Kanal und 4,76°C im palatinalen Kanal nach Wurzelfüllung mit dem Thermafil Plus System. Außerdem wurde eine durchschnittliche Temperaturerhöhung von 4,87°C an Oberkiefer Inzisiven gemessen. Der mögliche Einfluss der Umgebungstemperatur wurde in dieser Untersuchung nicht beachtet, die Ausgangstemperatur der Wurzeloberflächen betrug durchschnittlich 19,15°C [82].

Lipski et al. untersuchten die Temperaturerhöhung an Prämolaren nach Obturation mit vier verschiedenen Obturationssystemen. Untersucht wurden die trägerbasierten Systeme Thermafil und Soft-Core® (SybronEndo, Orange, USA), welches einen dünneren Kunststoffkern als Thermafil besitzt. Außerdem wurden die Systeme Ultrafil® (Coltene, Altstätten, Schweiz) und Trifecta® (Hygenic Corp., OH, USA) untersucht.

Die mittleren Temperaturerhöhungen auf der Wurzeloberfläche betrugen 2,03°C bzw. 2,14°C für Trifecta und Ultrafil und 3,67°C bzw. 3,87°C für Soft-Core und Thermafil [86].

In einer weiteren Studie fanden Lipski et al. heraus, dass eine Obturation mit Thermafil zu einer Temperaturerhöhung an der Wurzeloberfläche von 2,1-6,1 °C führt [94].

Song et al. führten in-vitro Obturationen mit Thermafil an Oberkieferschneidezähnen durch. Dabei betrug die durchschnittlich gemessene Temperaturerhöhung 4,8°C [93].

Die publizierten ΔT -Werte der beschriebenen Studien sind somit geringer als der von Eriksson als kritisch angesehener ΔT -Wert von 10°C, sie nehmen Werte von 2°C-6,1°C an.

In unseren Versuchsreihen liegen einzig die nach Wurzelfüllung mit Obturatoren der ISO-Größe 025 gemessenen Temperaturerhöhungen ($\Delta T = 3,6^\circ\text{C}$ bei Thermafil und $\Delta T = 4,9^\circ\text{C}$ bei Guttafusion) im Bereich der bisher publizierten Daten. Die deutlich höheren ΔT -Werte bei den Obturationsgrößen 040 (11,9°C bei Thermafil, 6,7°C bei Guttafusion) und 050 (11,4°C bei Thermafil, 8,1°C bei Guttafusion) zeigen einen signifikanten Einfluss der ISO-Größe auf die Temperaturerhöhung auf der Wurzeloberfläche.

Die Unterschiede in den auf den Wurzeloberflächen gemessenen ΔT -Werten lassen sich bereits aus den Messergebnissen der Vorversuche herleiten. Träger der ISO-Größen 040 und 050 werden mit einer bis zu 13°C (Guttafusion) bzw. 33°C (Thermafil) höheren Maximaltemperatur aus dem Ofen entnommen als Träger der ISO-Größe 025.

Diese Unterschiede in den Messergebnissen lassen sich auf die unterschiedlichen Versuchsaufbauten und Versuchsdurchführungen zurückführen. Lipski ließ den Thermafilträger für fünf Minuten im Thermaprep-Ofen erwärmen. Wir konnten jedoch zeigen, dass sich die Maximaltemperatur des Trägers bei Entnahme nur bis 90 Sekunden nach dem ersten Signalton im Thermaprep-Ofen konstant hält. Bereits bei der Entnahme 120 Sekunden nach dem Signalton sinkt die Maximaltemperatur bei Entnahme bei allen drei gemessenen ISO-Größen ab. Diese Beobachtung deckt sich mit den Herstellerangaben, die besagen, dass der Träger spätestens 90 Sekunden nach dem ersten Signalton aus dem Ofen zu entnehmen ist. Außerdem spielt das deutlich geringere Aufzeichnungsintervall (1 Sekunde) der in seinen Versuchsreihen verwendeten Infrarotkamera ThermoCam SC500 (Flir, Danderyd, Sweden) eine wohl entscheidende Rolle. Auch Behnia et al. verwendeten eine Infrarotkamera mit einem Messintervall von 1 Sekunde. Wie bereits beschrieben ermöglicht das Messintervall von 0,037 Sekunden unserer Infrarotkamera ThermoImager TIM 450 (Micro-Epsilon) eine präzisere Messung, Temperaturmaxima werden durch das sehr hohe Messintervall zuverlässig aufgezeichnet.

Ob und inwieweit der Zeitraum von 6,4 Sekunden (Träger mit ISO-Größe 040) bzw. 5,9 Sekunden (Träger mit ISO-Größe 050), in der die Wurzeloberfläche die kritische Temperatur von 47°C annimmt, von klinischer Bedeutung ist, werden weitere Untersuchungen zeigen müssen. Festzustellen ist jedoch, dass die kritische Temperatur von 53°C, bei der es zur Entstehung von irreversiblen periradikulären Knochenschäden kommen kann [73], keine der trägerbasierten Systeme in diesem Setup überschritten hat.

Eine deutliche Überschreitung der kritischen Temperatur von 47°C wurde jedoch bei der warm vertikalen Obturationstechnik nach Schilder verzeichnet. Im „Downpack“ Schritt werden je nach aufbereiteter ISO-Größe durchschnittliche Maximaltemperaturen an der Wurzeloberfläche von 64,3°C, 65,8°C und 56,8°C erreicht. Beim „Backfill“ erreichen die Wurzeloberflächen je nach aufbereiteter ISO-Größe Maximaltemperaturen von durchschnittlich 70,2°C, 67,8°C und 70,6°C. Die Zähne halten sich für die drei Aufbereitungsgrößen 025, 040 und 050 durchschnittlich 86,3 Sekunden, 78,1 Sekunden und 69,5 Sekunden in der längsten Intervalldauer über 47°C.

Diese Ergebnisse unterstützen die histologischen Beobachtungen im Wurzelzement, im parodontalen Gewebe und im Alveolarknochen nach Obturationen mit thermoplastifizierter Guttapercha [92, 137]. Castelli et al. stellten einen periradikulären Entzündungsprozess nach warm vertikaler Obturation im parodontalen Geweben von Affen fest. Die mit der warm

vertikalen Obturationsmethode gefüllten Zähne führten zu periapikalen Entzündungsprozessen [92]. Auch Molyvdas et al. zeigten histologisch eine periapikale Entzündung nach der Obturation von erwärmter Guttapercha mit dem System Obtura II® (Obtura Spartan, Fenton, USA) an Hunden [91].

Es gilt jedoch festzuhalten, dass die an der Wurzeloberfläche gemessenen Temperaturmaxima in vivo wegen der Flüssigkeit in den Dentintubuli und der parodontalen Membran noch erniedrigt werden können [72, 79]. Aufgrund des dadurch erhöhten Wärmeabtransports konnte Saunders et al. eine schneller sinkende Temperatur in vivo als in vitro feststellen [137]. Bei Wärmezufuhr kommt es zu einer Dilatation der Blutgefäße, einer verstärkten Durchblutung im parodontalen Gewebe und somit zu einem verstärkten Wärmeabtransport. Außerdem reduziert der geringe Wärmeleitkoeffizient des parodontalen Gewebes die Weiterleitung der Wärme [69]. Somit bleibt die Frage, ob und inwieweit diese histologisch festgestellten Schäden auf der Wurzeloberfläche von temporärer oder dauerhafter Natur sind.

Eine weitere Einschränkung bezüglich der bisher veröffentlichten thermographischen Untersuchungen zur warm vertikalen Obturation ist, dass häufig klinische Sonderformen untersucht wurden und somit wenig Aussagekraft über die Temperaturerhöhung nach regulärer Wurzelfüllung mit einer warm vertikalen Obturation enthalten.

Ulusoy et al. analysierten beispielsweise die Temperaturerhöhung an Zähnen mit internen Resorptionen anhand der Obturationssysteme Obtura II® (Obtura Spartan, Fenton, USA), SoftCore® (Kerr Dental, Bioggio, Schweiz) und der „continuous-wave-of-condensation-Technik“ mit System B® (SybronEndo, Orange, USA). Aufgrund der Restdentinstärke erwärmte sich die Wurzeloberfläche von Zähnen mit internen Resorptionen nach der Obturation mit warmen Füllmethoden stärker als bei Zähnen ohne internen Resorptionen. Die gemessenen Temperaturerhöhungen betragen für System B 21,1°C, für Obtura II 13,6°C und für SoftCore 8,5° bei Zähnen mit internen Resorptionen. Die deutlich geringeren ΔT -Werte in der Studie führen darauf zurück, dass in den mit Obtura II gefüllten Zähnen nur der Backfill ohne Downpack durchgeführt wurde. Die Temperatur beim Injizieren betrug zudem 160°C, in unseren Versuchen betrug sie 200°C. An den mit System B gefüllten Zähnen wurde ein Downpack durchgeführt. Jedoch wurde hierbei die „continuous-wave-of-condensation-Technik“ nach Buchanan angewandt, der eingeführte Guttaperchastift wurde nur einmal 5 mm vor dem Apex abgetrennt [84]. In unseren Versuchsreihen wurde er nach dem initialen Trennen am Wurzelkanaleingang noch zwei Mal getrennt (Schilder Technik).

Lipski et al. hingegen simulierten den Downpack bei der Revision von Thermafil-Wurzelfüllungen. Mit dem Hitzeplugger (System B, SybronEndo, Orange, USA) mit eingestellter Temperatur von 225°C wurden Temperaturerhöhungen von 26,7°C bis 46,0°C erreicht. Die im Vergleich zu Ulusoy et al. höheren Werte sind darauf zurückzuführen, dass der System B Hitzeplugger zweimal für jeweils 5 Sekunden (Gruppe 1) bzw. 8 Sekunden (Gruppe 2) in den Kanal eingeführt wurden und somit die Wurzeloberflächen nicht ausreichend Zeit zum Abkühlen hatten. Jedoch lässt die fehlende Wurzelfüllung (Backfill) in dieser Studie keine Vergleiche zu unseren Versuchen zu [96].

Donnermeyer et al. verglichen die Temperaturerhöhung an extrahierten Zähnen anhand drei verschiedener Obturationstechniken: der „continuous-wave-of-condensation-Technik“ mit dem warmen Backfill, Thermafil und der Einstifttechnik. Die von Donnermeyer et al. publizierte Studie ist somit die einzige, welche sowohl den Downpack als auch den Backfill untersucht hat. Die drei Messfühler des verwendeten Kontaktthermometers wurden in 0,5 mm tiefe Löcher, welche mit einem Abstand von 3 mm in die Zahnwurzel gebohrt wurden, eingebracht. Die Wurzelfüllung mit der „continuous-wave-of-condensation-Technik“ führte zu größeren Temperaturerhöhungen als mit dem warmen Backfill. Die maximale Temperaturerhöhung betrug 19,1°C. Die Temperaturerhöhung mit Thermafil war vernachlässigbar gering [97]. Im beschriebenen Versuchsaufbau ist die invasive Anbringung der Messfühler und der damit reduzierten Integrität des Wurzeldentins sowie der grundsätzliche Einsatz des Kontaktthermometers als problematisch zu sehen.

Sweatman et al. verwendeten in ihren Versuchen System B[®] (SybronEndo, Orange, USA) und Obtura II[®] (Obtura Spartan, Fenton, USA). Dabei wurde, anders als in unserer Untersuchung, keine Temperaturerhöhung auf der äußeren Wurzeloberfläche von mehr als 10°C gemessen. Die Temperaturmessungen wurden mit Kontaktthermometern durchgeführt. Die Messfühler wurden dafür in vier gebohrte Löcher im Zahn (in 2 mm Abständen) eingebracht, um die Temperatur an der inneren Wurzelkanalwand zu messen. Vier weitere Messfühler maßen die Temperatur auf der äußeren Wurzeloberfläche. Außerdem wurde nur der Downpack mit der „continuous-wave-of-condensation-Technik“ mit System B gemessen, nicht der darauffolgende Backfill. Die Versuche wurden an nur drei Zähnen durchgeführt, welche jeweils zehn Mal gefüllt wurden [98]. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung unterscheiden sich in dieser Arbeit deutlich zu dem in dieser Studie gewählten Vorgehen, weswegen ein Vergleich der Temperaturmaxima nur eingeschränkt möglich ist.

Verschiedene Parameter beeinflussen die Hitzeentwicklung der erwärmten Guttapercha auf das periradikuläre Gewebe. Dentin besitzt eine schlechte Wärmeweiterleitungskapazität ($1.36 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) [138], außerdem spielt die Dentindicke [139] und der periradikuläre Blutfluss [70] eine entscheidende Rolle für die Hitzeweiterleitung an die äußere Wurzeloberfläche.

Der Einfluss der Dentindicke kann aus den Ergebnissen der Kontrollgruppe für Guttafusion herausgelesen werden. Die Werte für die Temperaturmaxima sind in der Kontrollgruppe für Guttafusion bei mit ISO 025 gefüllten Zähnen $1,0^\circ\text{C}$ geringer, bei mit ISO 040 gefüllten Zähnen um $3,1^\circ\text{C}$ geringer und bei mit ISO 050 gefüllten Zähnen um $2,5^\circ\text{C}$ geringer als in der Hauptgruppe. Die ursprünglich mit Thermafil gefüllten Zähne wurden revidiert, gespült, die Kanalwände wurden mit Handfeilen gesäubert und gängig gemacht und im Anschluss mit Guttafusion gefüllt. Der Vorgang der Revision bringt Dentinabrieb mit sich. Durch die verringerte Dentindicke erhöht sich bei der Obturation mit erwärmter Guttapercha die Temperatur an der Wurzeloberfläche.

In den von Lipski et al. durchgeführten Obturationen mit Obtura II[®] (Obtura Spartan, Fenton, USA) an jeweils 15 Oberkiefer- und Unterkieferschneidezähnen ist zu erkennen, dass an der äußeren Wurzeloberfläche von Oberkieferschneidezähnen eine mittlere Temperaturerhöhung von $8,5^\circ\text{C}$ gemessen wurde. An den Unterkieferschneidezähnen betrug die mittlere Temperaturerhöhung $22,1^\circ\text{C}$. Somit wurde bestätigt, dass die Dicke des Wurzeldentins einen Einfluss auf die Hitzeweiterleitung hat [114].

In einer anderen Studie füllten Lipski et al. jeweils 15 mittlere Oberkieferschneidezähne, mittlere Unterkieferschneidezähne und Oberkiefer-Eckzähne mit System B[®] (SybronEndo, Orange, USA). Die durchschnittliche maximale Temperaturerhöhung betrug für die Oberkieferschneidezähne $6,8^\circ\text{C}$, für die Unterkieferschneidezähne $21,5^\circ\text{C}$ und für die Oberkiefer-Eckzähne $5,6^\circ\text{C}$. Die Temperaturerhöhung wurde dabei sowohl an der vestibulären als auch an der mesialen Wurzeloberfläche gemessen. An den rundlichen Oberkiefer Schneidezähnen unterschieden sich die Temperaturerhöhungen von mesial und von vestibulär gemessen kaum. Die Oberkiefer-Eckzähne zeigen mesial einen größeren Temperaturanstieg, da Oberkiefer-Eckzähne in ihrer mesio-distalen Ausbreitung dünner sind als in ihrer oro-vestibulären Ausbreitung. Auch die Unterkieferschneidezähne zeigten eine deutliche Diskrepanz zwischen der dünneren mesialen und der dickeren vestibulären Wurzeloberfläche. An der mesialen Oberfläche wurde beim Downpack ein im Mittel um $8,3^\circ\text{C}$ höherer Temperaturanstieg gemessen, beim Separation-Schritt wurde ein im Mittel um 11°C höherer Temperaturanstieg gemessen. Die deutlichen Temperaturanstiege lassen sich somit auf die unterschiedlichen Wurzelentindicken zurückführen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Separation stets einen höheren Temperaturanstieg an der äußeren Wurzeloberfläche als der Downpack mit sich bringt. Jedoch wurde auch in dieser Studie auf den Backfill verzichtet [88].

Die Zeitdauer, bei dem die Wurzeloberflächen nach warm vertikaler Obturation nach Schilder kritische Temperaturen annahmen, wurde bisher in keiner bekannten Studie untersucht. In unseren Versuchsreihen nahmen bei der warm vertikalen Obturation die Zähne, welche auf ISO 025 aufbereitet wurden, für 44 Sekunden Temperaturen über 53°C an. Die Zähne, welche auf ISO 040 bzw. auf ISO 050 aufbereitet wurden, nahmen für 31,5 bzw. 35,5 Sekunden Temperaturen über 53°C an. Der kritische Wert von 53°C wurde zwar überschritten, jedoch für jede Aufbereitungsgröße kürzer als eine Minute.

Der kritische Wert von 60°C wurde bei den mit der warm vertikalen Obturation auf die Größen 025 bzw. 040 bzw. 050 aufbereiteten Zähnen für 21,1 Sekunden bzw. 15,7 Sekunden bzw. 15,3 Sekunden überschritten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass diese Untersuchung die erste bekannte in vitro Studie ist, die alle klinischen Schritte sowie möglichen Einflussfaktoren zweier trägerbasierte Systeme (Guttafusion und Thermafil) und einem System für die warm vertikalen Obturation (Super Endo Alpha II und Beta) systematisch mithilfe der Thermographie analysiert hat.

Die experimentell gewonnenen Ergebnisse sind jedoch nicht direkt auf die klinische Situation zu übertragen. Der durch den erhöhten Blutfluss geförderte Wärmeabtransport lässt diese Temperaturerhöhung auf der Wurzeloberfläche möglicherweise nicht oder nur temporär zu [69].

Die in dieser Arbeit publizierten Ergebnisse sollen als Grundlage für weitere notwendige thermographische Untersuchungen dienen. Außerdem sind weitere Studien notwendig, um die klinische Bedeutung der Daten zu überprüfen.

7. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit wurde in zwei Abschnitte eingeteilt, in beiden Abschnitten wurden unterschiedliche Ziele verfolgt.

Ziel des ersten Abschnitts war es, die effektive Temperatur an der Oberfläche der Thermafil- und Guttafusionobturatoren nach Entnahme aus dem jeweiligen Ofen und die Zeit, bis diese sich auf 64°C abgekühlt haben, aufzuzeichnen. Außerdem wurden Herstellerangaben überprüft, nach denen der Guttafusionsträger ausschließlich bei Einstellungsstufe 1 im Ofen erwärmt werden soll und nach denen der Thermafilträger bis zu 90 Sekunden nach dem 1. Signalton im Ofen belassen werden kann.

Ziel des zweiten Abschnitts war es, die Temperatur auf der Wurzeloberfläche während und nach der Obturation mit den trägerbasierten Systemen Thermafil und Guttafusion sowie mit der warm vertikalen Obturation nach Schilder mit dem System Super Endo α/β aufzuzeichnen.

Alle Versuchsreihen wurden in einer für die Arbeit gefertigten Plexiglasbox durchgeführt, welche durch Verkleidungen keine Lichteinschlüsse bzw. Reflexionen zuließ und so standardisierte Versuchsdurchführungen unter gleichen Bedingungen ermöglichte.

Die Temperaturmessungen wurden mit der Infrarotkamera thermoIMAGER TIM 450 der Firma Micro-Epsilon durchgeführt.

In den durchgeführten Versuchsreihen wurde bestätigt, dass die Einstellungsstufe am Guttafusion-Ofen Einfluss auf die gemessene Maximaltemperatur des Trägers hat. Je nach Einstellungsstufe am Ofen, Emissionsgrad und ISO-Größe des Obturators wurden Maximaltemperaturen von 77,34°C bis 97,89°C am Guttafusionsträger gemessen. Die Träger hielten sich zwischen 4,62 und 11,67 Sekunden über 64°C, der Temperatur, bei der die Guttapercha eine fließfähige und visköse Form annimmt [32].

Außerdem wurde die Herstellerangabe bestätigt, nach welcher der Thermafilträger 90 Sekunden im Ofen belassen werden kann, bevor er zur Obturation entnommen werden muss. Die Maximaltemperatur am Thermafilträger wurde zum Zeitpunkt des Signaltons des Ofens sowie 15, 30, 60, 90 und 120 Sekunden nach dem Signalton gemessen. Hier wurden je nach ISO-Größe des Thermafilträgers und je nach eingestelltem Emissionsgrad Maximaltemperaturen von 82,35°C bis 124,1°C gemessen. Die Träger hielten sich zwischen 5,22 und 23,89 Sekunden über der Temperatur von 64°C.

Die Hauptversuche wurden *in vitro* bei 37°C Umgebungstemperatur an extrahierten einwurzeligen Prämolaren durchgeführt. Dabei wurde die von Eriksson et al. [68] kritisch angesehene Temperatur von 47°C bei der Wurzelfüllung mit den drei Guttafusionsträgern R25, R40 und R50 und dem Thermafilträger der Größe 025 nicht überschritten. Die durchschnittlichen Temperaturerhöhungen nahmen Werte zwischen 3,6°C und 8,1°C an. Obturationen mit Thermafilträgern der Größe 040 und 050 führten zu Temperaturmaxima von 48,7°C bzw. 48,3°C auf der Wurzeloberfläche. Sie überschritten somit die Temperatur von 47°C für durchschnittlich 6,4 bzw. 5,9 Sekunden.

Bei der warm vertikalen Obturation wurde zwischen dem Downpack und dem Backfill unterschieden. Der Downpack führte bei den auf ISO 025, ISO 040 und ISO 050 aufbereiteten Zähnen zu Temperaturerhöhungen von durchschnittlich 26,3°C, 28,3°C und 19,5°C und somit zu Maximaltemperaturen von 64,3°C, 65,8°C und 56,8°C. Der im Anschluss durchgeführte Backfill führte zu Maximaltemperaturen von 70,2°C, 67,8°C und 70,6°C. Durchschnittlich nahmen die Wurzeloberflächen für die ISO-Größen 025, 040 und 050 für 86,3, 78,1 und 69,5 Sekunden Temperaturen über 47°C an bzw. für 44,0, 31,5 und 35,5 Sekunden Temperaturen über 53°C an. Weitere Studien müssen jedoch zeigen, ob und inwieweit die *in vitro* gemessenen Maximaltemperaturen an der Wurzelkanaloberfläche und die Zeitdauer, in der diese kritische Temperaturen (47°C, 53°C) angenommen haben, auf die klinische Situation übertragbar sind. Die Ergebnisse zeigen, dass, bezogen auf die Studienergebnisse von Eriksson, allein die Obturation mit der warm vertikalen Obturationsmethode nach Schilder mit dem System Super Endo α/β , unabhängig von der ISO-Größe, zu Temperaturerhöhungen an der äußeren Wurzeloberfläche von mehr als 47°C für länger als 60 Sekunden führte. Die Temperatur von 53°C wurde jedoch für weniger als 60 Sekunden überschritten.

8. Literaturverzeichnis

1. Simmank, J., *Des Menschen härteste Stelle*, in *ZEIT Wissen*. 2017.
2. Hülsmann, M., *Endodontie*. 2008: Georg Thieme Verlag.
3. Endodontology, E.S.o., *Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology*. International endodontic journal, 2006. **39**(12): p. 921-930.
4. Witzel, A. *Die antiseptische Behandlung der Pulpakrankheiten des Zahnes: mit Beiträgen zur Lehre von den Neubildungen in der Pulpa*. 1879. Ash.
5. Skinner, R.L. and V.T. Himel, *The sealing ability of injection-molded thermoplasticized gutta-percha with and without the use of sealers*. Journal of endodontics, 1987. **13**(7): p. 315-317.
6. Tagger, M., A. Katz, and A. Tamse, *Apical seal using the GPII method in straight canals compared with lateral condensation, with or without sealer*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1994. **78**(2): p. 225-31.
7. Clinton, K. and V.T. Himel, *Comparison of a warm gutta-percha obturation technique and lateral condensation*. Journal of endodontics, 2001. **27**(11): p. 692-695.
8. Anantula, K. and A.K. Ganta, *Evaluation and comparison of sealing ability of three different obturation techniques - Lateral condensation, Obtura II, and GuttaFlow: An in vitro study*. J Conserv Dent, 2011. **14**(1): p. 57-61.
9. Grieves, C.J., *A classification of teeth the diseased pulps and apices of which are related to infective focal and systemic sequelae*. Journal of Dental Research, 1920. **2**(3): p. 327-355.
10. Schroeder, H.E., *Pathobiologie oraler Strukturen*. 1997: Karger Medical and Scientific Publishers.
11. Gängler, P., *Lehrbuch der konservierenden Zahnheilkunde*. 1995: Ullstein Mosby Berlin Wiesbaden.
12. Kim, S., *Neurovascular interactions in the dental pulp in health and inflammation*. Journal of endodontics, 1990. **16**(2): p. 48-53.
13. Steiniger, B., H. Schwarzbach, and V. Stachniss, *Mikroskopische Anatomie der Zähne und des Parodonts*. 2010: Thieme.
14. Weine, F.S., *The enigma of the lateral canal*. Dent Clin North Am, 1984. **28**(4): p. 833-52.
15. Ricucci, D. and J.F. Siqueira, Jr., *Fate of the tissue in lateral canals and apical ramifications in response to pathologic conditions and treatment procedures*. J Endod, 2010. **36**(1): p. 1-15.
16. Bystrom, A. and G. Sundqvist, *Bacteriologic evaluation of the effect of 0.5 percent sodium hypochlorite in endodontic therapy*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1983. **55**(3): p. 307-12.
17. Hellwig, E., J. Klimek, and T. Attin, *Einführung in die Zahnerhaltung*. 2009: Deutscher Ärzteverlag.
18. Schwenger, N. and M. Ehrenfeld, *Zahnärztliche Chirurgie*. 2009: Georg Thieme Verlag.
19. Siqueira, J.F. and H. Lopes, *Treatment of endodontic infections*. 2011: Quintessence London.
20. Hülsmann, M., *Entwicklung einer Methodik zur standardisierten Überprüfung verschiedener Aufbereitungsparameter und vergleichende In-vitro-Untersuchung unterschiedlicher Systeme zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung*. 2000: Quintessenz-Verlag.

21. Keppel, R., *Die endodontische Spüllösung Natriumhypochlorit*. ZWR-Das Deutsche Zahnärzteblatt, 2014. **123**(10): p. 480-486.
22. de Gregorio, C., et al., *Effect of EDTA, sonic, and ultrasonic activation on the penetration of sodium hypochlorite into simulated lateral canals: an in vitro study*. J Endod, 2009. **35**(6): p. 891-5.
23. De Moor, R.J., et al., *Laser induced explosive vapor and cavitation resulting in effective irrigation of the root canal. Part 2: evaluation of the efficacy*. Lasers Surg Med, 2009. **41**(7): p. 520-3.
24. Prakash, R., V. Gopikrishna, and D. Kandaswamy, *Gutta-percha—an untold story*. Endodontology, 2005. **17**(2): p. 32-36.
25. Felter, H.W. and J.U. Lloyd, *Gutta-Percha*. King's American Dispensatory. **2**.
26. Klencke, H., *Gutta-Percha, ein neuer Stoff für die Industrie, in seiner naturhistorischen und technischen Bedeutung dargestellt: auf äußere Veranlassung herausgegeben*. 1848: Hotop.
27. Graves, R.I., *On the Application of Gutta Percha in the Treatment of Diseases of the Skin*. The Western Journal of Medicine and Surgery (1840-1855), 1853. **12**(3): p. 242.
28. Cruse, W.P. and R. Bellizzi, *A historic review of endodontics, 1689–1963, part 1*. Journal of endodontics, 1980. **6**(3): p. 495-499.
29. Castellucci, A., *A brief history of endodontics*. Italy: Endodontics Prato, 2004: p. 2-5.
30. Hoffmann-Axthelm, W., *Die Geschichte der Zahnheilkunde*. 1985: Quintessenz.
31. Friedman, C.M., et al., *Composition and mechanical properties of gutta-percha endodontic points*. Journal of Dental Research, 1975. **54**(5): p. 921-925.
32. Goodman, A., H. Schilder, and W. Aldrich, *The thermomechanical properties of gutta-percha. Part IV. A thermal profile of the warm gutta-percha packing procedure*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1981. **51**(5): p. 544-51.
33. Leeper, H. and W. Schlesinger, *Gutta. II. Interconversion of alpha and beta forms*. Journal of Polymer Science, 1953. **11**(4): p. 307-323.
34. Schäfer, E. and R. Hickel, *Wurzelkanalfüllpasten und-füllstifte*. Stellungnahme der DGZMK, 1999. **1**.
35. Paque, F. and G. Sirtes, *Apical sealing ability of Resilon/Epiphany versus gutta-percha/AH Plus: immediate and 16-months leakage*. Int Endod J, 2007. **40**(9): p. 722-9.
36. Wu, M.K. and P.R. Wesselink, *Endodontic leakage studies reconsidered. Part I. Methodology, application and relevance*. Int Endod J, 1993. **26**(1): p. 37-43.
37. Leonardo, M.R., et al., *Tissue response to an epoxy resin-based root canal sealer*. Dental Traumatology, 1999. **15**(1): p. 28-32.
38. Leyhausen, G., et al., *Genotoxicity and cytotoxicity of the epoxy resin-based root canal sealer AH plus*. Journal of endodontics, 1999. **25**(2): p. 109-113.
39. Spångberg, L.S., S.V. Barbosa, and G.D. Lavigne, *AH26 releases formaldehyde*. Journal of endodontics, 1993. **19**(12): p. 596-598.
40. Cailleateau, J.G. and T.P. Mullaney, *Prevalence of teaching apical patency and various instrumentation and obturation techniques in United States dental schools*. J Endod, 1997. **23**(6): p. 394-6.
41. Cohen, S., et al., *Pathways of the Pulp (1)*. Learning, 1998. **30**: p. 10.
42. Tamse, A., *Iatrogenic vertical root fractures in endodontically treated teeth*. Dental Traumatology, 1988. **4**(5): p. 190-196.
43. Lertchirakarn, V., J.E. Palamara, and H.H. Messer, *Load and strain during lateral condensation and vertical root fracture*. Journal of endodontics, 1999. **25**(2): p. 99-104.
44. Ozer, S. and B. Aktener, *Outcome of root canal treatment using soft-core and cold lateral compaction filling techniques: a randomized clinical trial*. J Contemp Dent Pract, 2009. **10**(1): p. 74-81.

45. Connert, T., M. Amato, and R. Weiger, *Wurzelkanalfüllung: Alternativen zur lateralen Kondensation*. Zahnmedizin update, 2016. **10**(03): p. 209-227.
46. Harris, G.Z., et al., *Apical seal: McSpadden vs lateral condensation*. Journal of endodontics, 1982. **8**(6): p. 273-276.
47. Kersten, H., R. Fransman, and S.T. Van Velzen, *Thermomechanical compaction of gutta-percha. II. A comparison with lateral condensation in curved root canals*. International Endodontic Journal, 1986. **19**(3): p. 134-140.
48. Ingle, J.I., L.K. Bakland, and J.C. Baumgartner, *Ingle's endodontics/John I. Ingle, Leif K. Bakland, J. Craig Baumgartner*. 2008: Hamilton, Ont.: BC Decker.
49. McCullagh, J., et al., *Thermographic assessment of root canal obturation using thermomechanical compaction*. International endodontic journal, 1997. **30**(3): p. 191-195.
50. Schilder, H., *Filling root canals in three dimensions*. Journal of endodontics, 2006. **32**(4): p. 281-290.
51. Buchanan, L.S., *The continuous wave of condensation technique: a convergence of conceptual and procedural advances in obturation*. Dent Today, 1994. **13**(10): p. 80, 82, 84-5.
52. Torabinejad, M., R.E. Walton, and A. Fouad, *Endodontics-e-book: Principles and practice*. 2014: Elsevier Health Sciences.
53. Kaiser E, G.C., Bauer F, *Wurzelfüllmaterialien und -techniken: Ein Überblick*. Bayerisches Zahnärzteblatt BZB, 2017: p. 56-61.
54. Wu, M., L. Van der Sluis, and P. Wesselink, *A preliminary study of the percentage of gutta-percha-filled area in the apical canal filled with vertically compacted warm gutta-percha*. International Endodontic Journal, 2002. **35**(6): p. 527-535.
55. Schilder, H., *Vertical compaction of warm gutta-percha*. Techniques in clinical endodontics, 1983: p. 76-98.
56. Schaeffer, M.A., R.R. White, and R.E. Walton, *Determining the optimal obturation length: a meta-analysis of literature*. Journal of endodontics, 2005. **31**(4): p. 271-274.
57. Yee, F.S., et al., *Three-dimensional obturation of the root canal using injection-molded, thermoplasticized dental gutta-percha*. Journal of Endodontics, 1977. **3**(5): p. 168-174.
58. Perry, S., *Preparing and filling the roots of teeth*. Dent Cosmos, 1883. **25**: p. 185.
59. Gutmann, J.L. and L.A. Dees, *Historical Perspectives on Core-Carrier Gutta-Percha Obturation*. Journal of the History of Dentistry, 2016. **64**(1): p. 22-25.
60. Negm, M. and N. MM, *A newly designed root canal filling material*. 1980.
61. SE, W., *Gutta percha coated silver cones as root canal filling material*. Illinois dental journal, 1978. **47**(11): p. 604-610.
62. Johnson, W.B., *A new gutta-percha technique*. Journal of Endodontics, 1978. **4**(6): p. 184-188.
63. von Schroeter, C., *Wurzelkanalobturation mit der Thermafiltechnik–eine Übersicht*. Endodontie, 2009. **18**(2): p. 119-30.
64. Goldberg, F., L.P. Artaza, and A. De Silvio, *Effectiveness of different obturation techniques in the filling of simulated lateral canals*. Journal of Endodontics, 2001. **27**(5): p. 362-364.
65. Wolcott, J., et al., *Effect of two obturation techniques on the filling of lateral canals and the main canal*. Journal of Endodontics, 1997. **23**(10): p. 632-635.
66. Dummer, P., et al., *An in vitro study of the quality of root fillings in teeth obturated by lateral condensation of gutta-percha or Thermafil obturators*. International Endodontic Journal, 1993. **26**(2).
67. Arnold, M., *Techniken zur wurzelkanalfüllung. Bewertung und praktische hinweise*. BZB, 2010: p. 60-65.

68. Eriksson, A. and T. Albrektsson, *Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: a vital-microscopic study in the rabbit*. Journal of prosthetic dentistry, 1983. **50**(1): p. 101-107.
69. Fors, U., et al., *Measurements of the root surface temperature during thermo-mechanical root canal filling in vitro*. International Endodontic Journal, 1985. **18**(3): p. 199-202.
70. HARDIE, E.M., *Heat transmission to the outer surface of the tooth during the thermo-mechanical compaction technique of root canal obturation*. International Endodontic Journal, 1986. **19**(2): p. 73-77.
71. Gutmann, J.L., et al., *Evaluation of heat transfer during root canal obturation with thermoplasticized gutta-percha. Part II. In vivo response to heat levels generated*. Journal of endodontics, 1987. **13**(9): p. 441-448.
72. Weller, R. and K. Koch, *In vitro radicular temperatures produced by injectable thermoplasticized gutta-percha*. International endodontic journal, 1995. **28**(2): p. 86-90.
73. Eriksson, A., et al., *Thermal injury to bone: a vital-microscopic description of heat effects*. International journal of oral surgery, 1982. **11**(2): p. 115-121.
74. Eriksson, A. and T. Albrektsson, *Bone tissue reactions to heating above 60 C. An experimental study in the rabbit*. Stand J Plast Reconstr Surg (To be submitted.).
75. Hand, R.E., E.F. Huget, and P.J. Tsaknis, *Effects of a warm gutta-percha technique on the lateral periodontium*. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, 1976. **42**(3): p. 395-401.
76. Silver, G., R. Love, and D. Purton, *Comparison of two vertical condensation obturation techniques: Touch'n Heat modified and System B*. International endodontic journal, 1999. **32**(4): p. 287-295.
77. Romero, A.D., D.B. Green, and A.L. Wucherpfennig, *Heat transfer to the periodontal ligament during root obturation procedures using an in vitro model*. Journal of endodontics, 2000. **26**(2): p. 85-87.
78. Lipski, M., *Root surface temperature rises in vitro during root canal obturation using hybrid and microseal techniques*. Journal of Endodontics, 2005. **31**(4): p. 297-300.
79. Lee, F.S., J.E. Van Cura, and E. BeGole, *A comparison of root surface temperatures using different obturation heat sources*. Journal of Endodontics, 1998. **24**(9): p. 617-620.
80. Venturi, M., et al., *Temperature change within gutta-percha induced by the System-B Heat Source*. Int Endod J, 2002. **35**(9): p. 740-6.
81. Beraldo, D.Z., et al., *Temperature Changes on External Root Surfaces with the Use of Several Thermoplastic Filling Techniques*. Journal of endodontics, 2016. **42**(7): p. 1131-1134.
82. Behnia, A. and N. McDonald, *In vitro infrared thermographic assessment of root surface temperatures generated by the thermafil plus system*. Journal of endodontics, 2001. **27**(3): p. 203-205.
83. Anicé, I. and K. Matsumoto, *Dentinal heat transmission induced by a laser-softened gutta-percha obturation technique*. Journal of endodontics, 1995. **21**(9): p. 470-474.
84. Ulusoy, Ö., M. Yilmazoğlu, and G. Görgül, *Effect of several thermoplastic canal filling techniques on surface temperature rise on roots with simulated internal resorption cavities: an infrared thermographic analysis*. International endodontic journal, 2015. **48**(2): p. 171-176.
85. Lipski, M., *The temperature rise on the outer root surface of teeth during root canal filling using injected gutta-percha technique Obtura: an in vitro study*. Czas Stom, 2003. **56**: p. 379-385.

86. Lipski, M., *Root surface temperature rises in vitro during root canal obturation with thermoplasticized gutta-percha on a carrier or by injection*. Journal of endodontics, 2004. **30**(6): p. 441-443.
87. Glückert, U., *Erfassung und Messung von Wärmestrahlung: eine praktische Einführung in die Pyrometrie und Thermographie*. 1992: Franzis.
88. Lipski, M., *Root surface temperature rises during root canal obturation, in vitro, by the continuous wave of condensation technique using System B HeatSource*. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 2005. **99**(4): p. 505-510.
89. Diegritz, C., et al., *Temperature changes on the root surface during application of warm vertical compaction using three different obturation units*. Odontology, 2019: p. 1-8.
90. Kells, B., et al., *Computerized infrared thermographic imaging and pulpal blood flow: Part I. A protocol for thermal imaging of human teeth*. International endodontic journal, 2000. **33**(5): p. 442-447.
91. Molyvdas, I., et al., *Periodontal tissue reactions following root canal obturation with an injection-thermoplasticized gutta-percha technique*. Dental Traumatology, 1989. **5**(1): p. 32-37.
92. Castelli, W.A., et al., *Periodontium response to a root canal condensing device (Endotec)*. Oral surgery, oral medicine, oral pathology, 1991. **71**(3): p. 333-337.
93. SONG, L., P. LIU, and J. ZHANG, *In vitro assessment of root surface temperature generated by Thermafil system*. Journal of Modern Stomatology, 2007: p. 02.
94. Lipski, M., D. Deboa, and D. Lichota, *Thermal imaging for measuring the temperature of dental hard tissues*. Thermol int, 1999. **9**: p. 160.
95. Levitan, M.E., V.T. Himel, and J.B. Luckey, *The effect of insertion rates on fill length and adaptation of a thermoplasticized gutta-percha technique*. Journal of endodontics, 2003. **29**(8): p. 505-508.
96. Lipski, M. and K. Woźniak, *In vitro infrared thermographic assessment of root surface temperature rises during thermafil retreatment using system B*. Journal of endodontics, 2003. **29**(6): p. 413-415.
97. Donnermeyer, D., E. Schäfer, and S. Bürklein, *Real-time intracanal temperature measurement during different obturation techniques*. Journal of endodontics, 2018. **44**(12): p. 1832-1836.
98. Sweatman, T.L., J.C. Baumgartner, and R.L. Sakaguchi, *Radicular temperatures associated with thermoplasticized gutta-percha*. Journal of Endodontics, 2001. **27**(8): p. 512-515.
99. Viapiana, R., et al., *Investigation of the effect of sealer use on the heat generated at the external root surface during root canal obturation using warm vertical compaction technique with System B heat source*. Journal of endodontics, 2014. **40**(4): p. 555-561.
100. Kiefner, P., *Erfolgreiche Endodontie im Praxisalltag*. Der Freie Zahnarzt, 2012. **56**(12): p. 68-77.
101. Lahiri, B.B., et al., *Medical applications of infrared thermography: A review*. Infrared Phys Technol, 2012. **55**(4): p. 221-235.
102. Bharara, M., J. Schoess, and D.G. Armstrong, *Coming events cast their shadows before: detecting inflammation in the acute diabetic foot and the foot in remission*. Diabetes/metabolism research and reviews, 2012. **28**: p. 15-20.
103. Chiu, W., et al., *Infrared thermography to mass-screen suspected SARS patients with fever*. Asia Pacific Journal of Public Health, 2005. **17**(1): p. 26-28.
104. Silvino, V.O., et al., *Identifying febrile humans using infrared thermography screening: Possible applications during COVID-19 outbreak*. Revista Contexto & Saúde, 2020. **20**(38): p. 5-9.

105. Chang, C. and C. CH, *BREAST THERMOGRAPHY: IDENTIFICATION OF DIFFERENTIAL VASCULAR PATTERNS IN BREAST CARCINOMA*. 1977.
106. Diakides, N. and D. Jenkins. *Medical uses of infrared sensors*. in *Proceedings, National Infrared Information Symposium*. 1995.
107. Gershon-Cohen, J., J. Haberman-Brueschke, and E. Brueschke, *Obstetric and gynecologic thermography*. *Obstetrics & Gynecology*, 1965. **26**(6): p. 842-847.
108. Gorbach, A.M., et al., *Intraoperative infrared imaging of brain tumors*. *Journal of neurosurgery*, 2004. **101**(6): p. 960-969.
109. Hussey, D., et al., *Thermographic assessment of heat generated on the root surface during post space preparation*. *International endodontic journal*, 1997. **30**(3): p. 187-190.
110. Carson, J., T. Rider, and D. Nash, *A thermographic study of heat distribution during ultra-speed cavity preparation*. *Journal of dental research*, 1979. **58**(7): p. 1681-1684.
111. Cummings, M., et al., *Thermal image analysis of electrothermal debonding of ceramic brackets: an in vitro study*. *European Journal of Orthodontics*, 1999. **21**(2).
112. Nasher, R. and N. Gutknecht, *Temperature changes on the surface of curved root canals during endodontic debridement and disinfection with a dual wavelength laser Er, Cr: YSGG and diode 940 nm protocol*.
113. Madura, H., et al., *Thermographic method for evaluation of thermal influence of Nd: YAG laser on a tooth root during sterilization process*. *Infrared physics & technology*, 2004. **46**(1-2): p. 167-171.
114. Lipski, M., *In vitro infrared thermographic assessment of root surface temperatures generated by high-temperature thermoplasticized injectable gutta-percha obturation technique*. *Journal of endodontics*, 2006. **32**(5): p. 438-441.
115. Mc Cullagh, J., et al., *A comparison of thermocouple and infrared thermographic analysis of temperature rise on the root surface during the continuous wave of condensation technique*. *International Endodontic Journal*, 2000. **33**(4): p. 326-332.
116. Marroquín, B.B., et al., *Thermoplastic properties of endodontic gutta-percha: a thermographic in vitro study*. *Journal of endodontics*, 2015. **41**(1): p. 79-82.
117. Bierma, M.M., et al., *Comparison of heat-testing methodology*. *Journal of endodontics*, 2012. **38**(8): p. 1106-1109.
118. Jurcak, J.J., et al., *In vitro intracanal temperatures produced during warm lateral condensation of gutta-percha*. *Journal of endodontics*, 1992. **18**(1): p. 1-3.
119. Floren, J.W., et al., *Changes in root surface temperatures with in vitro use of the system B HeatSource*. *Journal of Endodontics*, 1999. **25**(9): p. 593-595.
120. Er, Ö., S.D. Yaman, and M. Hasan, *Finite element analysis of the effects of thermal obturation in maxillary canine teeth*. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 2007. **104**(2): p. 277-286.
121. Zhou, X., et al., *Heat transfers to periodontal tissues and gutta-percha during thermoplasticized root canal obturation in a finite element analysis model*. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 2010. **110**(2): p. 257-263.
122. Cen, R., R. Wang, and G.S. Cheung, *Periodontal blood flow protects the alveolar bone from thermal injury during thermoplasticized obturation: a finite element analysis study*. *Journal of endodontics*, 2018. **44**(1): p. 139-144.
123. Soori, A., F. Kowsary, and S. Kasraei, *Experimental estimation of the emissivity of human enamel and dentin*. *Infrared Physics & Technology*, 2020. **106**: p. 103234.
124. Quesada, J.I.P., *Application of infrared thermography in sports science*. 2017: Springer.
125. Keles, A., et al., *Heat conductive properties of set root canal sealers*. *Acta Odontologica Scandinavica*, 2013. **71**(3-4): p. 751-755.

126. Barkhordar, R.A., et al., *Evaluation of temperature rise on the outer surface of teeth during root canal obturation techniques*. Quintessence International, 1990. **21**(7).
127. Marciano, J. and P.M. Michailesco, *Dental gutta-percha: chemical composition, X-ray identification, enthalpic studies, and clinical implications*. Journal of endodontics, 1989. **15**(4): p. 149-153.
128. Neuhaus, K., A. Schick, and A. Lussi, *Apical filling characteristics of carrier-based techniques vs. single cone technique in curved root canals*. Clinical oral investigations, 2016. **20**(7): p. 1631-1637.
129. Maniglia-Ferreira, C., et al., *Brazilian gutta-percha points. Part II: thermal properties*. Brazilian oral research, 2007. **21**(1): p. 29-34.
130. Atmeh, A., M. Hadis, and J. Camilleri, *Real-time chemical analysis of root filling materials with heating: guidelines for safe temperature levels*. International Endodontic Journal, 2020. **53**(5): p. 698-708.
131. Atmeh, A.R. and E. AlShwaimi, *the effect of heating time and temperature on epoxy resin and calcium silicate-based endodontic sealers*. Journal of endodontics, 2017. **43**(12): p. 2112-2118.
132. Aksel, H., et al., *Effect of heat application on the physical properties and chemical structure of calcium silicate-based sealers*. Clinical Oral Investigations, 2020: p. 1-9.
133. de Freitas, J.V., et al., *Temperature changes affect the rheological properties of a silicone-based and an epoxy resin-based root canal sealers*. Australian Endodontic Journal, 2020.
134. Chen, B., et al., *Cytotoxicity and the Effect of Temperature on Physical Properties and Chemical Composition of a New Calcium Silicate-based Root Canal Sealer*. Journal of Endodontics, 2020. **46**(4): p. 531-538.
135. Viapiana, R., et al., *Investigation of chemical changes in sealers during application of the warm vertical compaction technique*. International endodontic journal, 2015. **48**(1): p. 16-27.
136. Camilleri, J., *Sealers and warm gutta-percha obturation techniques*. Journal of endodontics, 2015. **41**(1): p. 72-78.
137. Saunders, E., *In vivo findings associated with heat generation during thermomechanical compaction of gutta-percha. Part I. Temperature levels at the external surface of the root*. International endodontic journal, 1990. **23**(5): p. 263-267.
138. Craig, R. and F. Peyton, *Thermal conductivity of tooth structure, dental cements, and amalgam*. Journal of Dental Research, 1961. **40**(3): p. 411-418.
139. Figdor, D., D. Beech, and J. Waterson. *FACTORS AFFECTING HEAT-GENERATION IN THE MCSPADDEN COMPACTION TECHNIQUE*. in *Journal of Dental Research*. 1983. AMER ASSOC DENTAL RESEARCH 1619 DUKE ST, ALEXANDRIA, VA 22314.

9. Anhang

9.1 Materialien

- AH Plus (DentsplyDeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland)
- C-Pilotfeile (VDW GmbH, München, Deutschland)
- Glyde EDTA-Gel (Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland)
- Guttafusionobturatoren, ISO-Größen 025, 040, 050 (VDW GmbH, München, Deutschland)
- Guttafusionofen (VDW GmbH, München, Deutschland)
- Guttapercha-Stifte, ISO-Größen 025, 040, 050 (VDW GmbH, München, Deutschland)
- Infrarotkamera thermoIMAGER TIM (MicroEpsilon Messtechnik, Ortenburg, Deutschland)
- K-Feilen der Größen 015, 020, 025 (VDW GmbH, München, Deutschland)
- Kontaktthermometer PL-120 T1 (Voltcraft, Wollerau, Schweiz)
- Matrize nach Tofflemire (Omnident, Rodgau, Deutschland)
- Mini-Keramikheizer (GO/ON, Hagebaumarkt, Soltau, Deutschland)
- Natriumchlorit, Konzentration 0,9% (Fresenius Kabi Deutschland GmbH, Bad Homburg, Deutschland)
- Natriumhypochlorit, Konzentration 3% (Wunderlichs Apotheke, München, Deutschland)
- Papierspitzen (Roeko, Coltène/Whaledent GmbH & Co. KG, Langenau, Deutschland)
- Plexiglasbox mit verschiedenen Bauteilen (Obi, Vahrn, Italien)
- Recipro Blue Feilen der ISO-Größen 025, 040, 050 (VDW GmbH, München, Deutschland)
- SuperEndo- α^2 -Pen mit Hitzeplugger (40/.04) (B&L Biotech, Ansan, Südkorea)
- SuperEndo- β Pistole (B&L Biotech, Ansan, Südkorea)
- Thermafilobturatoren, ISO-Größen 025, 040, 050 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz)
- Thermaprep-2-Ofen (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz)
- VDW Gold Motor (VDW GmbH, München, Deutschland)
- Zylinder, diamantiert (Komet Dental, Lemgo, Deutschland)

9.2 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

9.2.1 Verzeichnis der Abbildungen

- A <https://slideplayer.com/slide/4744908/>
- B <https://www.vdw-dental.com/fileadmin/Dokumente/Sortiment/Fuellung/GuttaFusion/VDW-Dental-GUTTAFUSION-Produktbroschuere-DE.pdf>
- C <https://www.vdw-dental.com/en/products/detail/guttafusion-for-reciprocating-systems/>
- D <https://botelli.rs/product/dentsply-thermaprep-oven-2/>
- E <https://www.promeddental.de/Shop/Praxisbedarf/Wurzelbehandlung/Guttaperchaspitzen/ProTaper-Gold-Thermafil-Obturatoren/619693/p/619693>
- F <https://www.hanchadent.de/superendo-alpha-ii-und-superendo-beta-starterkit-schwarz.html>
- G <https://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--thermoIMAGER-TIM--de.pdf>

9.2.2 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Kategorien, unter welchen die Messungen in den Vorversuchen aufgezeichnet wurden, mit den jeweils zugehörigen Variablen

Tabelle 2: Kategorien, unter welchen die Messungen in den Hauptversuchen aufgezeichnet wurden, mit den jeweils zugehörigen Variablen

Tabelle 3: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 4: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 5: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 6: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 7: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 8: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 9: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 10: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 11: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 12: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 13: „Tmax“ an Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 14: „Zeit über 64°C“ bei Guttafusionobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 15: „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ der Guttafusionobturatoren bei Emissionsgrad = 1 und Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 16: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 17: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 18: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 19: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 20: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 21: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 1

Tabelle 22: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 23: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 025 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 24: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 25: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 040 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 26: „Tmax“ an Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 27: „Zeit über 64°C“ bei Thermafilobturatoren mit ISO-Größe 050 bei Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 28: „Tmax“ und „Zeit über 64°C“ der Guttafusionobturatoren bei Emissionsgrad = 1 und Emissionsgrad = 0,95

Tabelle 29: Messergebnisse der auf ISO 025 aufbereiteten Zähne

Tabelle 30: Messergebnisse der auf ISO 040 aufbereiteten Zähne

Tabelle 31: Messergebnisse der auf ISO 050 aufbereiteten Zähne

Tabelle 32: Post-hoc-Tests von „Zeit über 60°C“ über die Kategorie ISO-Größe bei der warm vertikalen Obturation

10. Danksagung

Ich möchte Herrn Prof. Dr. med. dent. R. Hickel, Direktor der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der LMU München, für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas danken.

Außerdem bedanke ich mich herzlichst bei OA Dr. med. dent. Christian Diegritz für den kollegialen Austausch in allen Abschnitten der Dissertation und die hervorragende fachliche und konstruktive Betreuung.

Frau Dr. med. dent. Katrin Heck danke ich für die Unterstützung und für ihr offenes Ohr bei der statistischen Auswertung.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester, die mich im Rahmen meines Studiums, auf meinem beruflichen Werdegang und beim Verfassen dieser Dissertationsarbeit stets mit großer Motivation unterstützt haben. Ihr seid in jeder Hinsicht Vorbilder für mich.