

**Department für Zahnheilkunde der Universität Ulm**

**Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie**

**Ärztlicher Direktor (komm.):**

**Professor Dr. Dr. Stefan Haase**

# **Qualitativer Vergleich der Darstellung endodontisch behandelter Zähne in unterschiedlichen bildgebenden Verfahren**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

vorgelegt von:

Andreas Euchner

geb. in Tübingen

2013

Amtierender Dekan: Prof. Dr. Thomas Wirth

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Margit-Ann Geibel

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Volker Rasche

Tag der Promotion: 10. Juli 2014

**gewidmet meinen Eltern  
in Liebe und Dankbarkeit!**

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Was ist die Endodontologie? .....	1
1.2 2D-Röntgendiagnostik, Zahnfilm (ZF).....	2
1.3 Computertomographie (CT).....	4
1.4 Digitale Volumetomographie (DVT) .....	5
1.5 Magnetresonanztomographie (MRT).....	6
1.6 Artefakte .....	8
1.7 Zielsetzung .....	10
<b>2 Material und Methode</b> .....	<b>11</b>
2.1 Versuchszähne .....	11
2.2 Einteilung in Gruppen .....	12
2.3 Anfertigung der Mikro-CT-Aufnahmen.....	13
2.4 Anfertigung der MRT-Aufnahmen .....	14
2.5 Anfertigung der DVT-Aufnahmen .....	14
2.6 Anfertigung der Zahnfilme .....	15
2.7 Statistische Beratung.....	15
2.8 Festlegung der Befundungskriterien.....	16
2.9 Allgemeine Befundungsbedingungen .....	18
2.10 Befundung der Mikro-CT-Aufnahmen.....	19
2.11 Befundung der MRT-Aufnahmen.....	33
2.12 Befundung der DVT-Aufnahmen .....	34
2.13 Befundung der Zahnfilme .....	38
<b>3 Ergebnisse</b> .....	<b>41</b>
3.1 Deskriptive Beschreibung der Ergebnisse.....	41

3.2	Deskriptive Statistik der Ergebnisse .....	55
3.3	Checkliste zur Befundung und Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen mittels bildgebender Verfahren .....	74
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>77</b>
4.1	Methodenkritik .....	77
4.2	Besprechung und Diskussion der Ergebnisse .....	79
4.3	Aspekt Strahlenschutz .....	82
4.4	Welchen Mehrwert bietet ein 3D-Bild? .....	83
4.5	Qualitätssicherung .....	83
4.6	Schlussfolgerung .....	84
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>88</b>
<b>7</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>95</b>
<b>8</b>	<b>Tabellarischer Lebenslauf .....</b>	<b>96</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
CBCT	Cone Beam Computed Tomography
CCD	Charged Coupled Device
Curved MPR	Curved Multiplanare Reconstruction
CT	Computertomographie
DGET	Deutsche Gesellschaft für Endodontologie und Traumatologie
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn,- Mund- und Kieferheilkunde
dMRT	Dentale Magnetresonanztomographie
DVT	Digitale Volumentomographie
HE	Hounsfield-Einheit
Hz	Hertz
ICRP	International Commission On Radiological Protection
kV	Kilovolt
LCD	Liquid Cristal Display
$\mu$ A	Mikroampere
mA	Milliampere
$\mu$ CT	Mikro-Computertomographie
$\mu$ m	Mikrometer
mm	Millimeter
MPR	Multiplanare Reconstruction
MRI	Magnetic Resonance Imaging
MRT	Magnetresonanztomographie
$\mu$ s	Mikrosekunde

## ***Abkürzungsverzeichnis***

---

ms	Millisekunde
s	Sekunde
W	Watt
WW&WL	Window Width & Window Level
ZF	Zahnfilm

## 1 Einleitung

In der Zahnmedizin ist es, ebenso wie in der Medizin allgemein, von entscheidender Bedeutung sich für eine korrekte Diagnose und erfolgreiche Therapie ein Bild vom Körperinneren machen zu können.

Ganz besonders gilt das für einen Teilbereich der Zahnmedizin, die Endodontie. Dazu bedient sich die moderne Zahnmedizin heutzutage unterschiedlicher bildgebender Verfahren. Die meisten dieser bildgebenden Verfahren, wie etwa das konventionelle Röntgen, die Computertomographie (CT) sowie die Digitale Volumentomographie (DVT), beruhen auf dem Prinzip der Röntgenstrahlung, nutzen also ionisierende Strahlung. Da in der Zahnmedizin das Hauptinteresse dem Hartgewebe gilt, lässt sich damit für die meisten Indikationen eine ausreichende Bildgebung erzielen.

Richtet sich das Augenmerk eher auf das Weichgewebe, so sind anderen Techniken, wie etwa der Magnetresonanztomographie (MRT) oder dem Ultraschall, der Vorzug zu geben [19,46].

### 1.1 Was ist die Endodontologie?

Die Endodontologie bezeichnet die Lehre und Wissenschaft des Wurzelkanalsystems, dem Inneren des Zahnes oder auch dem Endodont. Dieses besteht aus der Zahnpulpa und dem sie umgebenden Dentin inklusive dem periapikalen Gewebe [49].

Die Endodontie ist ein Teilgebiet der Zahnmedizin, das sich mit der Anatomie und Physiologie sowie der Ätiologie, Pathologie, Diagnostik und Therapie des Endodonts nebst seiner Verletzungen befasst. Ziel der Endodontie ist es, eine Entzündung der Pulpa und des periapikalen Gewebes sowie eventuell daraus resultierende Schmerzen oder gar eine Erkrankung des gesamten Organismus zu be-

handeln und zu vermeiden. Dadurch kann ein erheblicher Beitrag dazu geleistet werden die Zähne langfristig zu erhalten [11,49].

Der Schlüssel zu einer erfolgreichen Wurzelkanalbehandlung liegt dabei in der adäquaten vollständigen Aufbereitung und Desinfektion einschließlich der anschließenden bakterien- und flüssigkeitsdichten Wurzelkanalfüllung [17]. Als Wurzelkanalfüllungsmaterial hat sich Guttapercha in Verbindung mit einem Sealer als geeignet und allgemein anerkannt erwiesen [16]. Das Ziel einer optimalen Wurzelkanalfüllung soll sein, das Kanalsystem in seiner Dreidimensionalität inklusive seiner Unregelmäßigkeiten und Aussackungen vollständig dicht zu versiegeln. Für einen dauerhaften Erfolg der Wurzelkanalbehandlung spielt neben der korrekten Länge der Füllung sowie einer perfekten Adaptation an die Kanalwand und der Homogenität der Füllung auch die Standfestigkeit des Materials eine entscheidende Rolle [38].

Die meisten Wurzelkanalfüllungen füllen das Kanalsystem nicht vollständig aus [22]. Nicht ausreichend oder gar nicht gefüllte Bereiche im Kanalsystem können jedoch Bakterien enthalten, die auf Dauer zu Problemen wie etwa Entzündungen, Knochenabbau und Schmerzen führen können und somit eine erneute Behandlung oder gar das Entfernen des betroffenen Zahnes notwendig machen könnten.

Es werden daher immer neue Materialien und Techniken entwickelt, um das Ziel einer perfekten Wurzelkanalfüllung einfacher, zuverlässiger und wirtschaftlicher erreichen zu können.

Dies bedarf aber auch Visualisierungstechniken, um das Ergebnis einer Wurzelkanalbehandlung exakter und vor allem dreidimensional beurteilen zu können.

### **1.2 2D-Röntgendiagnostik, Zahnfilm (ZF)**

In der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde gibt es heutzutage analoge und digitale Systeme in der Röntgendiagnostik. Je nach der Positionierung des Röntgenfilms,

beziehungsweise des Detektors, kann man weiter „extraorale Aufnahmen“ von „intraoralen Aufnahmen“, auch Zahnfilme oder Einzelröntgenbilder genannt, unterscheiden [34].

Die analogen Systeme lassen sich weiter in zwei Filmarten unterteilen:

- intraorale (folienlose) Filme
- extraorale (Folien-)Filme

Die intraoralen Filme sind immer folienlos und werden ausschließlich durch die aus der Röntgenröhre kommenden Röntgenstrahlen geschwärzt. Bei den extraoralen Filmen sind zusätzlich Verstärkerfolien eingebracht. Neben der Schwärzung des Filmes durch die direkt auftreffenden Röntgenstrahlen wird der Film zusätzlich durch die durch Röntgenstrahlen induzierte Fluoreszenz der Verstärkerfolie geschwärzt. Dies bringt den Vorteil der Dosisreduktion. Bei den intraoralen also folienlosen Filmen wird zu Gunsten der besseren Zeichenschärfe auf diesen Vorteil verzichtet [34].

Bei der obligaten anschließenden Filmverarbeitung muss das noch nicht sichtbare (latente) Bild des belichteten Films in ein sichtbares, bleibendes Bild verwandelt werden [34].

Der Schritt des „Filmentwickelns“ entfällt bei den modernen digitalen Systemen.

Hier kann man im Wesentlichen zwei Techniken unterscheiden:

- die Sensortechnik und
- die Speicherfolientechnik

Bei der Sensortechnik wird eine sich im Sensor befindliche Leuchtfolie durch die Strahlung zum Leuchten angeregt. Dieses Licht wird mit Hilfe eines CCD-Chips (Charged Coupled Device) in elektrische Signale transformiert. Diese Signale werden dann in einem Computer zu einem Monitorbild verarbeitet und gespeichert [34].

Die Speicherfolientechnik bedient sich der Lumineszenz-Radiographie. Dabei stellt die Speicherfolie eine Halbleiterplatte dar, die mit einer Bariumfluorhalid-Kristallschicht überzogen ist. Diese Kristalle sind mit zweiwertigem Europium dotiert. Treffen nun Röntgenquanten auf das Europium, so werden dessen Valenzelektronen auf einen höheren Energielevel angehoben und durch Energiehaftstellen im Leitungsband temporär fixiert.

Beim anschließenden Auslesevorgang der Speicherfolie in einem Lesegerät wird diese durch einen Helium-Neon-Laserstrahl systematisch abgetastet. Trifft der Laser auf die Stellen mit erhöhtem Energieniveau, so kommt es zu lichtemittierenden Entladungen, während die zuvor angeregten Elektronen wieder auf ihren energetischen Grundzustand zurückkehren. Diese Lichtemissionen werden gemessen und in elektrische Signale umgewandelt. Ein Computer verarbeitet und speichert diese dann zu einem digitalen Bild [34].

### **1.3 Computertomographie (CT)**

Bei der Computertomographie handelt es sich um ein computergestütztes bildgebendes Schichtverfahren, das mit Hilfe von Röntgenstrahlen arbeitet. Hierbei dreht sich je nach Gerätekonfiguration entweder die gesamte Röntgenröhre-Detektoreneinheit oder bei feststehendem Detektorenkranz nur die Röntgenröhre um das zu untersuchende Objekt. Mittels eines gefächerten Röntgenstrahls werden so von einer Schicht viele unterschiedliche Projektionen angefertigt. Durch die Abschwächung der Röntgenstrahlen beim Durchtritt der Probe lassen sich somit pro Projektion unterschiedliche Dichtewerte messen. Diese werden dann von einem Computer Schicht für Schicht zu einem Gesamtbild verarbeitet [35].

Das Verfahren wurde erstmals 1971 von Cormack und Hounsfield beschrieben. Nach letzterem wurden auch die bekannten Hounsfield-Einheiten (HE) benannt. Diese kennzeichnen die unterschiedlichen Röntgendichtewerte bezogen auf die Dichte von Wasser mit 0 HE. In der entsprechenden Hounsfield-Scala werden den

unterschiedlichen Strukturen beziehungsweise Geweben gemäß ihrer Dichte unterschiedliche HE-Werte zugeteilt. So erhält zum Beispiel Luft den Wert -500 HE, Knochen 200 bis 2000 HE, Fett -85 bis -130 HE und Blut 50 bis 60 HE [35].

Da mit der Computertomographie bis zu 4000 Schwächungswerte gemessen und in die entsprechenden Grauwerte umgerechnet werden können, dieser enorme Grauwertumfang aber nicht vom menschlichen Auge erfasst werden kann, ist mit Hilfe der Hounsfield-Scala eine Einteilung in entsprechende sogenannte Fenster (Windows) möglich und wichtig. Nur so lassen sich die zur Untersuchung interessanten Gewebestrukturen auch richtig beurteilen [35]. Ein großer Vorteil der CT ist folglich die gleichzeitige Abbildung von Knochen und Weichteilen mittels der entsprechenden Knochen- und Weichteilfenster [13,35].

### **1.3.1 Mikro-Computertomographie ( $\mu$ CT)**

Mikro-Computertomographen unterscheiden sich von den „normalen“ Computertomographen lediglich durch ihr wesentlich höheres Auflösungsvermögen und ihren, verglichen zu humanen Ganzkörper-Computertomographen, geringeren Abmessungen. Für die höhere Auflösung werden wesentlich mehr und vor allem auch dünnere Schichten angefertigt. Dies bedingt folglich eine längere Scanzeit und somit auch eine höhere Strahlenbelastung für das zu untersuchende Objekt. Mikro-Computertomographen werden gerne in der Forschung, Industrie und Materialprüfung eingesetzt, eignen sich aber nur zum Untersuchen von kleineren Proben [24].

## **1.4 Digitale Volumentomographie (DVT)**

Bei der Digitalen Volumentomographie handelt es sich ebenfalls um ein computergestütztes Röntgenverfahren. Anders als bei der Computertomographie kommt hierbei jedoch ein dreidimensionales Strahlenbündel und ein Flächendetektor zum Einsatz. Man unterscheidet zwei Arten von Detektoren. Die ältere Bildverstärker-

technologie, bei der das Volumen sphärisch rekonstruiert wird, und die neuere Flatpanel-Technologie. Letztere ermöglicht mit ihren rechtwinkligen Sensoren die Rekonstruktion eines zylindrischen Volumens. Die Röntgenquelle umkreist auch hier mit der gegenüberliegenden Detektoreinheit den Patienten. In einem Umlauf werden mit einem pyramiden- oder kegelförmigen Strahl (cone-beam) mehrere hundert Projektionen gewonnen, die anschließend rechnerisch zu einem dreidimensionalen Volumen zusammengesetzt werden [20]. Daher wird die DVT im englischen Sprachgebrauch als Cone Beam Computed Tomography (CBCT) bezeichnet. Charakteristisch für dieses Verfahren ist die Konzentration der Darstellung auf Hartgewebe in isometrischer Ortsauflösung bei einer im Vergleich zur Computertomographie geringeren Strahlenbelastung [20].

### **1.5 Magnetresonanztomographie (MRT)**

Bei der Kernspintomographie, oder auch Magnetresonanztomographie (MRT), handelt es sich um ein nicht-invasives bildgebendes Verfahren, das anders als röntgenologische Verfahren ohne ionisierende Strahlung auskommt [32].

In einem starken Magnetfeld werden die Protonen von Wasserstoffatomen mittels gepulst eingestrahelter Radiowellen zur Kernspinresonanz angeregt. Diese Magnetresonanz-Signale werden wiederum von hochempfindlichen Empfängerspulen aufgenommen. Je nach Gewebzusammensetzung resultieren unterschiedlich starke Signale, die wiederum in Graustufen umgerechnet werden. Mit Hilfe eines Computers werden die so gewonnenen Informationen dann zu einem Schichtbild zusammengesetzt [14].

Die Magnetresonanztomographie hat sich seit 1980 als hervorragendes diagnostisches Instrument zur Darstellung von Weichgeweben in der Medizin bewährt. Jedoch ist sie derzeit den röntgen- und ultraschallbasierenden Verfahren, was die Darstellung von mineralisiertem Gewebe angeht, noch deutlich unterlegen. Dies und die erhöhte Artefaktanfälligkeit, besonders bei der Darstellung von zahnres-

taurativen Materialien, verhindern allerdings die breite Anwendung in der Zahnmedizin [42].

Zwar wurde bereits 1981 über das mögliche Potential für die Zahnheilkunde berichtet, aber bis jetzt beschränkt sich die Anwendung der MRT sowie der dentalen MRT (dMRT) hauptsächlich auf die Untersuchung des Kiefergelenks, der Identifikation und Darstellung extracranialer Tumore, der Anatomie und Pathologie des periapikalen Gewebes und der Lagebestimmung von retinierten Zähnen [4].

### **1.5.1 Ultrashort echo time (UTE)-MRT**

Der Grund warum gewöhnliche MRT-Techniken nur schlecht Hartgewebe darstellen können, liegt in dessen Mineralisierung.

Zähne bestehen aus stark mineralisierten Bestandteilen. Dentin (bis zu 70% Hydroxylapatit, ungefähr 20% organisches Material und nur etwa 10% Wasser) und Schmelz (mit einem Mineralanteil von bis zu 96%) enthalten nur eine geringe Menge an freien Protonen, was also nur zu einer schwachen Magnetisierung und somit einem schwachen Signal führt. Die  $T_2$  Relaxationszeit liegt für Dentin unter 1 ms, die für Schmelz unter 250  $\mu$ s [4,18,40].

Mit Hilfe der UTE-MRT-Technik gelang es jedoch, zumindest in der Kariesdiagnostik, die MRT auch für die Zahnmedizin nutzbar zu machen. Diese Verfahrensweise bedarf vor der Marktreife jedoch noch der weiteren technischen Entwicklung [4].

## 1.6 Artefakte

Unter Bildartefakten versteht man eine Abweichung in der Bildgebung, die von der Wirklichkeit abweicht und durch das bildgebende System oder äußere Einflüsse verursacht wird. Diese können zu Fehlinterpretationen sowie zur Unbrauchbarkeit der Aufnahmen, oder zumindest von Teilen davon, führen [15].

Artefakte lassen sich gemäß ihres Entstehungsprinzips in verschiedene Kategorien unterteilen. Man unterscheidet intrinsische (verfahrensbedingte), gerätebedingte und bewegungsbedingte Artefakte. Meist sind die Bildfehler an ihrem Entstehungsort am stärksten. Sie können jedoch auch noch in größerer Entfernung die korrekte Interpretation der Aufnahmen erschweren oder sogar verhindern [15].

### 1.6.1 Intrinsische (verfahrensbedingte) Artefakte

#### 1.6.1.1 Strahlaufhärtingsartefakte

Die Strahlaufhärtung stellt eine der Hauptquellen für Artefakte in der 3D-Bildgebung mit Röntgenstrahlen dar [41]. Das kommt daher, dass in der Röntgenröhre keine monochromatische Strahlung erzeugt wird, sondern Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge und somit unterschiedlicher Energetik. Beim Durchtritt von Strahlung durch Materie wird diese absorbiert: Strahlung mit niedrigerem energetischen Anteil stärker als solche mit höherer Energie. Die auf dem Detektor registrierte Strahlung ist also „härter“. Dies hat zur Folge, dass auf dem konstruierten Bild hinter stärker absorbierenden Objekten, wie zum Beispiel metallischen Strukturen, eine artifizielle Aufhellung, also Bildanteile mit höherer Schwärzung, auftreten können, sogenannte Strahlaufhärtingsartefakte [15,41].

#### 1.6.1.2 Auslöschungsartefakte im CT und DVT

In der Bildgebung mit Röntgenstrahlen können Auslöschungsartefakte hinter stark absorbierenden Materialien wie zum Beispiel dentalen Goldrestorationen auftreten [41]. Auf dem Detektor kommt dann keine beziehungsweise fast keine Strahlung mehr an, die ein elektronisches Signal produziert. Der Computer registriert

den Wert „0“ oder fast „0“. Das Resultat sind „weiße“ Auslöschungen in der Aufnahme [41].

### **1.6.1.3 Auslöschungsartefakte und Verzerrungsartefakte im MRT**

Im MRT können Auslöschungsartefakte oder Verzerrungsartefakte durch eine Störung des Magnetfelds verursacht werden. Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn in dem zu untersuchenden Objekt ferromagnetische Materialien, wie insbesondere Eisen, enthalten sind [3,37].

## **1.6.2 Gerätebedingte Artefakte**

### **1.6.2.1 Falsche Kalibrierung**

Bei einer falschen Kalibrierung der Röntgengeräte kann es zu sogenannten Streifen- oder Ringartefakten kommen, die leicht mit einem pathologischen Befund verwechselt werden können [6,15]. Speziell die konzentrischen Ringartefakte können durch defekte oder schlecht kalibrierte Detektorelemente auftreten. Die typische Ringstruktur resultiert aus der Drehbewegung der Röntgenröhre und/oder des Detektorenkranzes um das Objekt [41].

### **1.6.2.2 Aliasing**

Ein typisches Aliasing-Artefakt ist das so genannte Moiré-Muster, welches bei DVT-Aufnahmen häufig im Randbereich der Bildrekonstruktion vorkommt.

Dieses imponiert durch Linienmuster, die auf der Divergenz des Kegelstrahls im DVT beruhen [20,41].

## **1.6.3 Bewegungsbedingte Artefakte**

Bei hohen Auflösungen und damit verbundenen längeren Umlaufzeiten kann es, speziell bei schlecht fixierten Patienten, zu bewegungsbedingten Artefakten kommen. Durch eine Bewegung des Patienten während der Aufnahme kommt es zu „Verwacklungen“, die sich dann in unscharfen oder verwischten Bildern äußern können [20].

## 1.7 Zielsetzung

Das Ziel dieser Dissertation ist es die heutigen dem Zahnarzt zur Verfügung stehenden bildgebenden Verfahren hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Nutzbarkeit, speziell in der Endodontie, zu vergleichen. Die standardmäßig in der Zahnmedizin zur Anwendung kommende Bildgebung ist das klassische intraorale Röntgenbild. Dieses ist aber nur zweidimensional.

Ziel dieser Arbeit ist es daher folgende Fragestellungen zu untersuchen:

- Welchen Mehrwert bietet ein dreidimensionales Bild?
- Mit welchem bildgebenden Verfahren lassen sich die dentalen Fragestellungen am besten und exaktesten bildlich darstellen?
- Welche Rolle spielen dabei mögliche Artefaktbildungen?
- Welche Verfahren eignen sich für die praktische klinische Anwendung?

Auf der Basis der ausgewerteten Daten soll eine praxistaugliche Checkliste zur Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen mittels bildgebender Verfahren erstellt werden.

## **2 Material und Methode**

### **2.1 Versuchszähne**

Da diese Arbeit Teil einer größeren Studie ist, wurde ein Teil der Versuchszähne durch den Doktoranden Steffen Walker im Rahmen seiner Dissertation in Vorbereitung mit dem Titel: „Vergleichende Analyse unterschiedlicher Wurzelfüllmaterialien in der digitalen Volumetomographie (DVT)“, wurzelkanalbehandelt [47]. Der andere Teil der Versuchszähne wurde vom Doktoranden Alexander Walter ebenfalls im Zuge seiner Dissertation in Vorbereitung mit dem Titel: „Digitale Volumetomographie Artefakte bei der Verwendung von Wurzelstiftsystemen in der Endodontie“, wurzelkanalbehandelt und teils mit Wurzelkanalstiften versorgt [48]. Anschließend wurden deren Proben in dieser Arbeit mittels Mikro-CT, DVT, Zahnfilmen und MRT untersucht.

Von den beiden oben genannten Kollegen wurden 42 (24+18) extrahierte menschliche Zähne ausgewählt. Einschlusskriterien waren:

- bleibende Zähne
- abgeschlossenes Wurzelwachstum
- möglichst keine vorhandenen zahnärztlichen Restaurationen

Um der unterschiedlichen Wurzelkanalanatomie Rechnung zu tragen, wurden Frontzähne, Eckzähne, Prämolaren und Molaren zu gleichen Anteilen ausgewählt. Nach der Entfernung von Blut und Geweberesten wurden die Wurzeloberflächen mittels eines Scalers vom Typ „204SD“ der Firma „Hu-Friedy“ (P.O. Box 29025, 3001 GA Rotterdam, Niederlande) von Konkrementen und harten Belägen befreit.

Zur Desinfektion, Konservierung und auch um mögliche unbekannte Artefaktbildungen auszuschließen, wurden die Zähne nach der Extraktion in 3,5%iger Formalinlösung bei Raumtemperatur gelagert.

## **2.2 Einteilung in Gruppen**

### **2.2.1 Wurzelkanalbehandelte Zähne ohne Wurzelkanalstiftversorgung**

Diese 24 Zähne wurden von Steffen Walker in vier Gruppen eingeteilt. Jede Gruppe bestand aus jeweils einem Oberkieferfrontzahn und einem Unterkieferfrontzahn, einem Oberkieferprämolare und einem Unterkieferprämolare, einem Oberkiefermolar und einem Unterkiefermolar.

Den Frontzähnen wurde der Buchstabe „A“, den Prämolaren der Buchstabe „B“ und den Molaren der Buchstabe „C“ zugeteilt. Zur weiteren Unterscheidung wurden diese Buchstaben für Oberkieferzähne groß und für Unterkieferzähne klein geschrieben [47].

Anschließend hat er die Zähne entsprechend seinem Protokoll [47] wurzelkanalbehandelt. Pro Gruppe wurde eine andere maschinelle Aufbereitungstechnik und Obturationstechnik angewandt. Die Gruppen lauteten wie folgt:

- Gruppe 1 (laterale Kondensation mit Guttapercha und AH Plus)
- Gruppe 2 (konfektionierter Guttaperchamasterpoint mit Guttaflow2)
- Gruppe 3 (thermoplastische Guttapercha mit 2Seal)
- Gruppe 4 (Mtwo Guttaperchamasterpoint mit AH Plus)

### **2.2.2 Wurzelkanalbehandelte und mit Wurzelkanalstiften versorgte Zähne**

Alexander Walter hat 18 Zähne nach seinem Protokoll zuerst wurzelkanalbehandelt und danach verschiedene Wurzelkanalstifte unterschiedlicher Art eingebracht. Dabei handelte es sich ausschließlich um Oberkieferzähne. Dazu wurden sechs Gruppen mit jeweils drei Zähnen gebildet. Jeder Gruppe wurde ein Schneidezahn, ein Eckzahn und ein Prämolare zugeteilt. Die Beschriftung der einzelnen Proben markierte zuerst die Nummer der Gruppe gefolgt von einer „1“ für den Schneidezahn, einer „3“ für den Eckzahn und einer „5“ für den Prämolare [48]. Die Gruppen 1 bis 6 von Alexander Walter entsprechen in dieser Arbeit den Gruppen 5 bis 10, um eine fortlaufende Nummerierung der Gruppen zu gewährleisten. Die Zuteilung der Stiftsysteme zur jeweiligen Gruppe stellte sich wie folgt dar:

- Gruppe 5: Titanstift passiv
- Gruppe 6: Titanstift aktiv
- Gruppe 7: Keramikstift
- Gruppe 8: Glasfaserstift konisch
- Gruppe 9: Glasfaserstift zylindrisch
- Gruppe 10: Thermafil

Lediglich bei der Gruppe 10 handelte es sich nicht um ein Stiftsystem, sondern um eine spezielle Obturationstechnik.

### **2.3 Anfertigung der Mikro-CT-Aufnahmen**

Hier beginnen die eigenen Untersuchungen:

Die Mikro-CT-Aufnahmen von allen 42 Zähnen wurden mit dem Mikro-CT-Scanner „eXplore Locus“ der Firma „GE Healthcare“ (Bockenheimer Landstraße 2-4, 60306

Frankfurt am Main, Deutschland) angefertigt. Mit einer Röhrenleistung von 36 W, einer Röhrenspannung von 80 kV, einer Röhrenstromstärke von 450  $\mu$ A, einer Belichtungszeit von 400 ms und Rotationsschritten von 0,5 Grad erhielt man Aufnahmen mit einer Detailauflösung von 47  $\mu$ m.

### **2.4 Anfertigung der MRT-Aufnahmen**

Die MRT-Aufnahmen von allen 42 Zähnen wurden mit einem „Achieve 3.0T“ Ganzkörper Magnetresonanztomographen der Firma „Philips Healthcare“ (Veenpluis 4-6, 5684 PC Best, Niederlande) angefertigt. Bei allen Aufnahmen betrug die Repetitionszeit 48,53 ms und die Echozeit 3,78 ms. Die Bandbreite lag bei 328 Hz. So entstanden Aufnahmen mit einer Auflösung von 250  $\mu$ m.

#### **2.4.1 Einbettung der Proben in Agarose-Gel**

Um eine sichere, ruhige und stabile Lagerung der Proben während der MRT-Scans zu gewährleisten, wurden die einzelnen Zähne in 2%iges Agarose-Gel eingebettet.

### **2.5 Anfertigung der DVT-Aufnahmen**

Die DVT-Aufnahmen von allen 42 Zähne wurden mit dem „ProMax 3D“ der Firma „Planmeca“ (Walther-Rathenau-Str. 59, 33602 Bielefeld, Deutschland) angefertigt. Die Aufnahmeauflösung betrug bei allen Aufnahmen 150  $\mu$ m. Diese wurde bei einer einheitlichen Stromstärke von 5 mA und einer gleichbleibenden Röhrenspannung von 96 kV erreicht. Die Umlaufzeiten variierten je nach Zahn zwischen 12,1 s und 15,7 s.

### **2.6 Anfertigung der Zahnfilme**

Als Röntgengerät für alle Aufnahmen der 42 Zähne diente das „Focus“ der Firma „Instrumentarium Dental“ (Nahkelantie 160, P.O.Box 20, 04301 Tuusula, Finnland). Die Röntgenaufnahmen wurden mit einem Standard-Tubus mittels digitaler Technik angefertigt. Als Detektor wurde ein intraoraler Sensor der Firma „Gendex“ (KaVo Dental GmbH, Bismarckring 39, 88400 Biberach/Riß, Deutschland) verwendet. Der Fokus-Objekt-Abstand betrug einheitlich 23 cm. Bei einem konstanten Röhrenstrom von 7 mA betrug die Röhrenspannung bei allen Zähnen 60 kV. Lediglich die Belichtungszeit variierte je nach Art des Testzahnes zwischen 0,063 s und 0,16 s. Die Aufnahmen wurden alle mittels „Parallel-Technik“ angefertigt [12]. Der Zentralstrahl wurde hierbei immer orthoradial zur Bukkalfläche des jeweiligen Zahnes ausgerichtet [12].

### **2.7 Statistische Beratung**

Vor der Erhebung und Auswertung der Daten fand im Juli 2013 eine statistische Erstberatung im Institut für Epidemiologie und Medizinische Biometrie der Universität Ulm statt. Um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde beschlossen die Befundung der Aufnahmen nach vorhergehender Normierung und Festlegung der Bewertungskriterien nach dem Vier-Augen-Prinzip vorzunehmen. Eine statistische Auswertung der Daten erschien auf Grund ihrer Komplexität und schlechten Vergleichbarkeit als nicht sinnvoll. Daher wurde beschlossen lediglich eine deskriptive Statistik vorzunehmen. Das heißt, die Ergebnisse wurden in Excel-Tabellen festgehalten und mittels Diagrammen und Tabellen einander gegenübergestellt und miteinander verglichen.

### 2.8 Festlegung der Befundungskriterien

Eine gute Aufbereitung und Desinfektion sowie eine anschließende dichte Füllung der Wurzelkanäle ist entscheidend für den therapeutischen Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung [9,11]. Die vollständige Entfernung der im Wurzelkanal vorhandenen Bakterien trotz instrumenteller Aufbereitung und Spülung mit verschiedenen Spüllösungen ist jedoch nicht immer möglich [26-28,33]. Verbleibende Mikroorganismen könnten sich in den Hohlräumen ansiedeln und vermehren. Daher sollte eine „gute“ Wurzelkanalfüllung durch ihre korrekte Länge, ihre Homogenität und vor allem durch ihre Wandständigkeit eine Penetration dieser Bakterien und ihrer Toxine in das umliegende parodontale Gewebe verhindern [1,9,17,31,36,44]. Das ist auch der Grund, weshalb in dieser Arbeit unter anderem die Kriterien „Aufbereitung“ des Wurzelkanals sowie die „Länge“, „Homogenität“ und „Wandständigkeit“ der Wurzelkanalfüllung ausgewählt und beurteilt wurden.

#### 2.8.1 Exkurs zur Bestimmung der „korrekten“ Länge der Wurzelkanalfüllung

##### 2.8.1.1 Anatomische Grundlagen und Begriffe

Zum Verständnis der Begriffe *physiologischer Apex* beziehungsweise *Foramen physiologicum* oder auch *endodontischer Apex* genannt, *anatomischer Apex* sowie *röntgenologischer Apex* sollen die Abbildung 1 und die Abbildung 2 dienen.

Wie aus Abbildung 1 entnommen werden kann, ist die anatomische Wurzelspitze auch als *anatomischer Apex* definiert [23]. Die auf einem Röntgenbild erkennbare Wurzelspitze wird als *röntgenologischer Apex* bezeichnet [23].

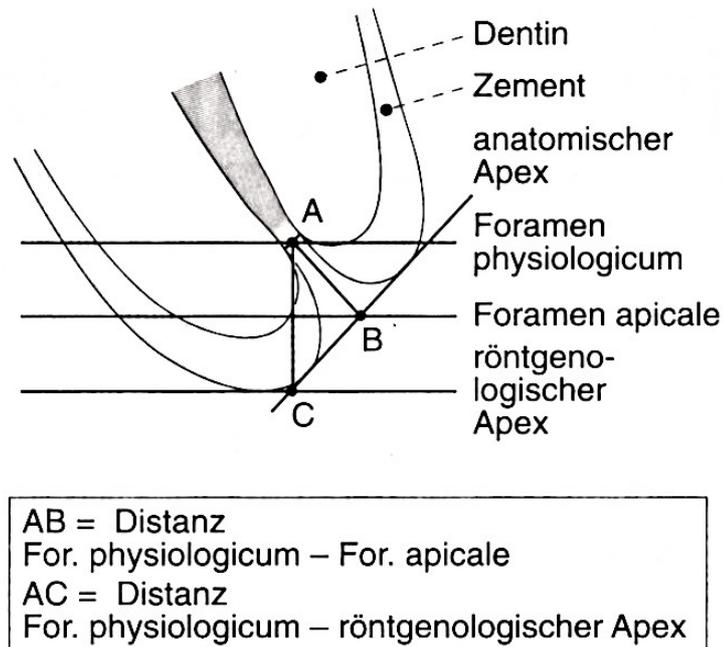


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Anatomie und Topographie der Wurzelspitze [23], S.296.

Das *Foramen physiologicum* stellt die engste Stelle des Wurzelkanals an der Spitze der Wurzel dar und liegt häufig auf Höhe der Zement-Dentin-Grenze [23]. Sie wird auch als *apikale Konstriktion* bezeichnet. „Die Zement-Dentin-Grenze wird häufig als *apikaler Endpunkt* der Wurzelkanalpräparation und –füllung bezeichnet“ [25]. Sie befindet sich, da die Mehrzahl der Wurzelkanäle seitlich an der Wurzelspitze enden, an unterschiedlichen Seiten der Wurzel und durchschnittlich 0,5-0,7 mm vom *anatomischen Apex* entfernt [25].

Die Strecke AC in Abbildung 1 ist die Distanz vom *Foramen physiologicum* und dem *röntgenologischen Apex* und beträgt durchschnittlich 1 mm [23].

Hülsmann schreibt in seinem Buch „Checklisten der Zahnmedizin Endodontie“ wörtlich: „Die Beschränkung aller Maßnahmen auf das Innere des Wurzelkanalsystems bei größtmöglicher Annäherung an das *Foramen physiologicum* reduzieren das Risiko einer bakteriellen Kontamination, einer mechanischen Reizung (Überinstrumentation) und einer chemischen Irritation (Spüllösungen, Füllmateria-

lien) der periradikulären Gewebe und erhöhen die Erfolgsaussicht einer endodontischen Behandlung.“ [25].

Aufgrund dieser Ausführungen wird in dieser Arbeit die „Länge“ der Wurzelkanalfüllungen als „korrekt“ bezeichnet, wenn deren apikales Ende 1 mm vor dem *radiologischen Apex* liegt.

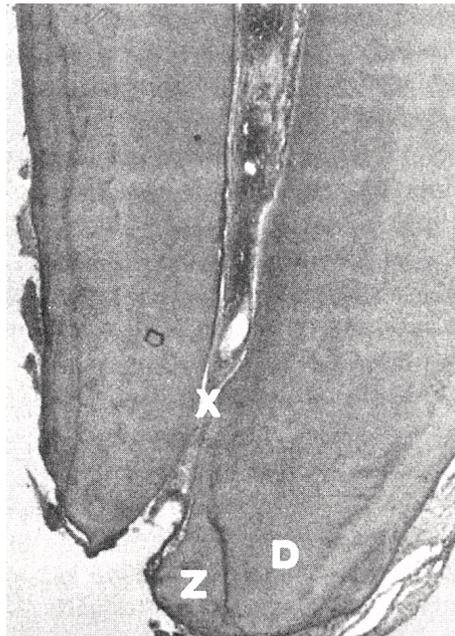


Abbildung 2: Mikroskopische Aufnahme eines histologischen Schnittes der Apikalregion eines Zahnes. D: Dentin, Z: Zement, X: apikale Konstriktion (Foramen physiologicum) [25], S.114.

### 2.9 Allgemeine Befundungsbedingungen

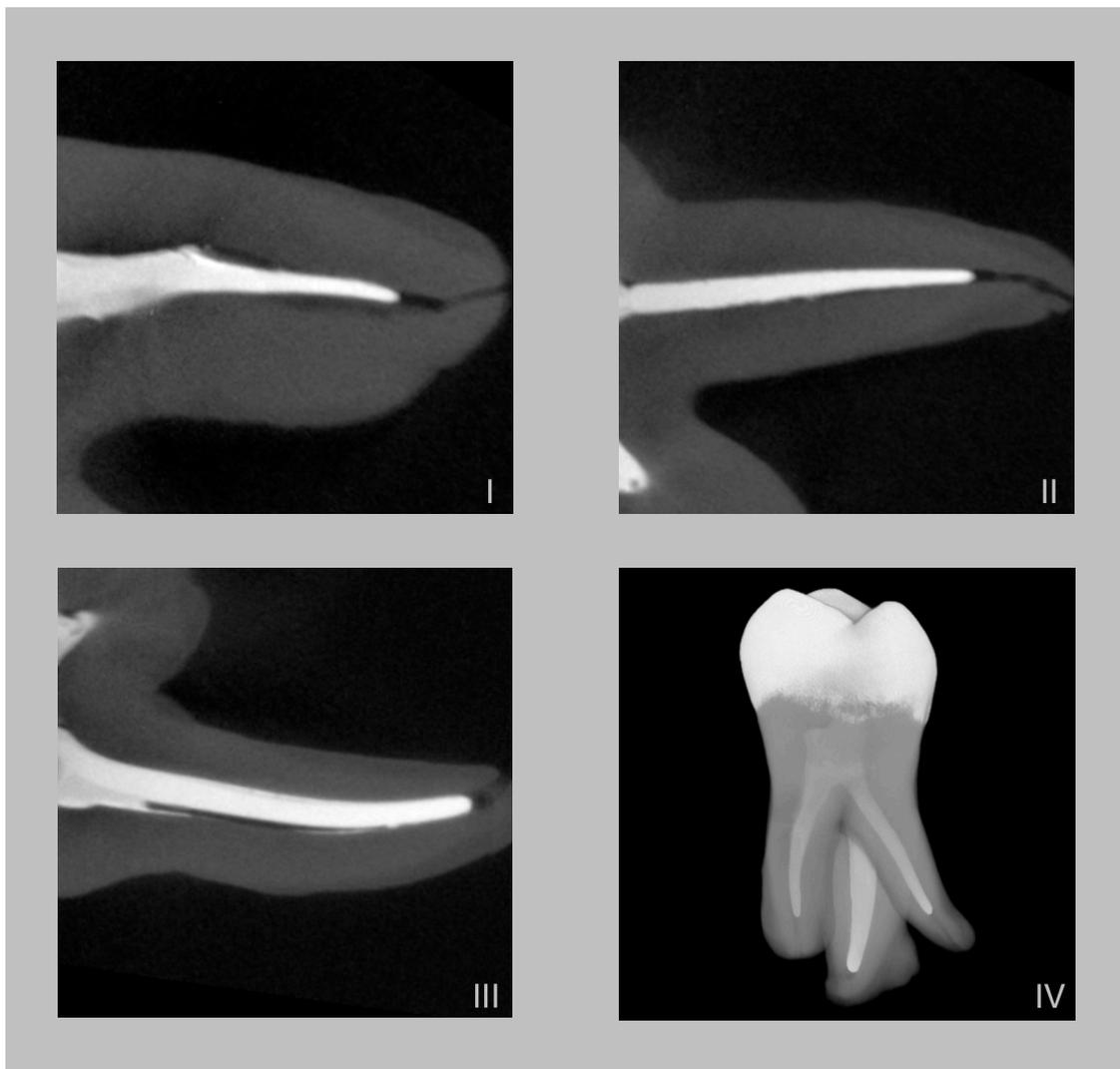
Die Befundung wurde immer von einer Zahnärztin und einem Zahnarzt gemeinsam durchgeführt. Bei Unstimmigkeiten wurde nach kurzer Diskussion ein Konsens hergestellt. Außerdem wurde immer an einem zertifizierten LCD-Befundungsmonitor der Firma „EIZO“ (EIZO Europe GmbH, Helmut-Grashoff-Straße 18, 41179 Mönchengladbach) gearbeitet.

### **2.10 Befundung der Mikro-CT-Aufnahmen**

Zum Betrachten und Befunden der Mikro-CT-Aufnahmen wurde der OsiriX-Viewer, eine Open-Source Software für Mac OS X in der Version 5.6 verwendet ([www.osirix-viewer.com](http://www.osirix-viewer.com)). Um eine gleichbleibende Helligkeits- und Kontrasteinstellung bei allen Befundungen zu gewährleisten, wurde bei der WW&WL-Einstellung „Standard“ gewählt.

Um standardisiert und systematisch auswerten zu können, wurde zunächst mittels der Curved-MPR-Funktion jeder einzelne Wurzelkanal in der axialen Schichtung zentrisch „durchgezeichnet“. Dafür wurde jeweils die Schmelz-Zementgrenze als Referenzmarkierung für den Anfang des Wurzelkanals herangezogen. Die Stelle an der der Wurzelkanal die Zahnwurzel an ihrer apikalsten Stelle verließ, wurde als Endpunkt definiert.

Die so gewonnene Curved-MPR-Ansicht zeigte also den gesamten Wurzelkanal immer in seiner zentralen Schicht und ermöglichte es somit einen genauen Eindruck von seinem Verlauf zu bekommen. In Abbildung 3 ist beispielhaft ein Oberkiefermolar in der 3D-Rekonstruktion und jeder seiner drei Wurzelkanäle in der Curved-MPR-Ansicht abgebildet.



**Abbildung 3: Mikro-Computertomographie-Aufnahmen eines Oberkiefermolaren. (I), (II) und (III) sind Curved-Multiplanare-Rekonstruktionen jeweils seines mesiobukkalen (I), distobukkalen (II) und seines palatinalen (III) Wurzelkanals. (IV) ist eine 3D-Rekonstruktion.**

Über die DICOM-Export-Funktion wurde dann eine Serie von axialen Schnittbildern der einzelnen Wurzelkanäle erstellt. Dabei wurde der Abstand der einzelnen Querschnitte auf 0,5 mm gesetzt. So erhielt man pro Wurzelkanal zwischen 16 und 42 Schnittbilder. Jedes einzelne dieser Schnittbilder wurde also senkrecht zur Wurzelkanallängsachse aufgezeichnet.

Die so gewonnenen Bilder wurden anschließend Bild für Bild nach den Kriterien: Länge, Wandständigkeit und Homogenität der Wurzelkanalfüllung beurteilt. Auch

wurde nach eventuellen Rissen oder Frakturen, Seitenkanälen, Artefakten oder Instrumentenbrüchen gesucht. Wurde ein Wurzelkanalstift gesetzt, dann wurde zusätzlich die Wandständigkeit und Homogenität des Stiftzementes sowie die zentrische Orientierung des Stiftes im Wurzelkanal bewertet. Sämtliche Befunde wurden pro Wurzelkanal tabellarisch festgehalten.

Im Anschluss sollen die Bewertungskriterien dargelegt werden.

### **Länge der Wurzelkanalfüllung:**

Unter „Länge“ wurde beurteilt, ob die Wurzelkanalfüllung die „korrekte“ Länge hatte. Die Wurzelkanalfüllung sollte den gesamten Wurzelkanal ausfüllen und 1 mm vor dem *radiologischen Apex* enden (siehe dazu auch unter Punkt 2.8.1).

Da die Abstände zwischen den einzelnen Schnittbildern exakt 0,5 mm betragen, durfte auf den letzten beiden apikalen Aufnahmen des betreffenden Wurzelkanals kein Wurzelfüllmaterial zu erkennen sein, um die Wertung „korrekt“ zu erhalten. War auf mehr als den beiden letzten Bildern kein Wurzelkanalfüllmaterial (mehr) zu erkennen, wurde ein „zu kurz“ vergeben. War jedoch auf dem vorletzten oder letzten Bild Wurzelfüllmaterial zu sehen, wurde dies mit „zu lang“ gewertet.

### **Homogenität der Wurzelkanalfüllung:**

Unter „Homogenität“ wurde beurteilt, ob die Wurzelkanalfüllmasse bestehend aus Sealer und Guttapercha oder auch Stiftzement und Stift homogen war, oder ob in ihr Lücken oder Blasen erkennbar waren.

Wurde mindestens eine Inhomogenität in einem Schnittbild festgestellt, so wurde eine „0“ vergeben. War keine Inhomogenität auffällig, wurde eine „1“ vergeben. Abbildung 4 zeigt eine Inhomogenität. Abbildung 5 zeigt eine homogene Wurzelkanalfüllung.

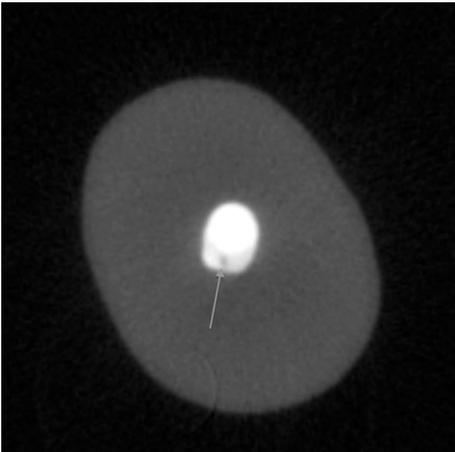


Abbildung 4: Mikro-Computertomographie-Schnittbild mit markierter Inhomogenität.

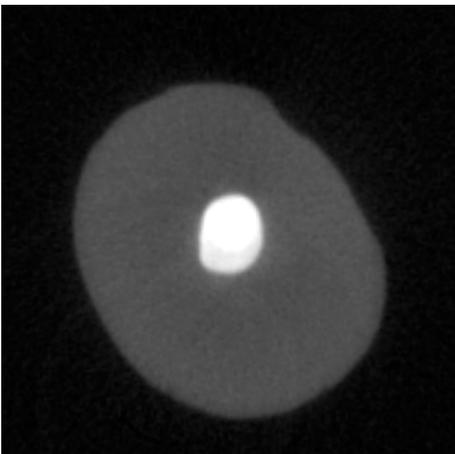


Abbildung 5: Mikro-Computertomographie-Schnittbild mit homogener Wurzelkanalfüllung.

### **Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllung:**

Unter „Wandständigkeit“ wurde beurteilt, ob die Wurzelkanalfüllmasse bestehend aus Sealer und Guttapercha oder auch Stiftzement und Stift wandständig war, oder ob zwischen ihr und der Kanalwand eine Lücke erkennbar war.

Wurde mindestens eine Lücke zwischen Kanalwand und Wurzelkanalfüllmaterial in einem Schnittbild festgestellt, so wurde eine „0“ vergeben. War keine Lücke zu erkennen, wurde eine „1“ vergeben. Abbildung 6 zeigt eine fehlende Wandständigkeit. Abbildung 7 zeigt eine wandständige Wurzelkanalfüllung.

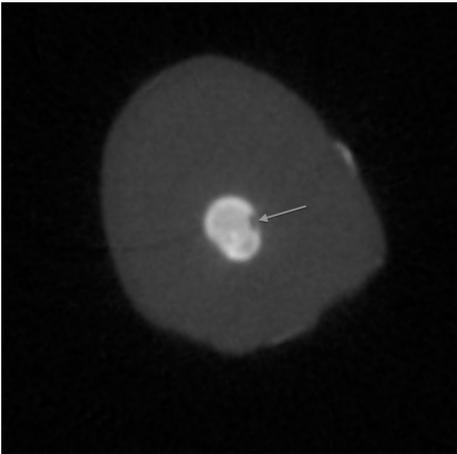


Abbildung 6: Mikro-Computertomographie-Schnittbild. Der Pfeil markiert eine fehlende Wandständigkeit.

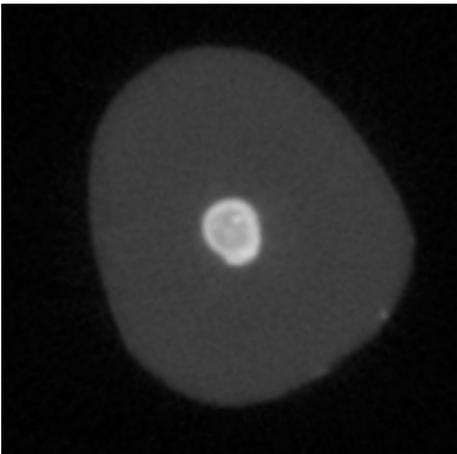
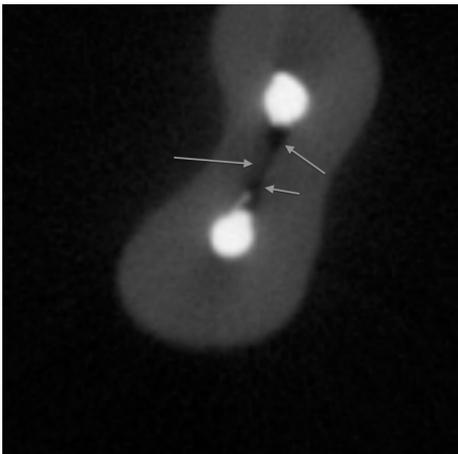


Abbildung 7: Mikro-Computertomographie-Schnittbild mit wandständiger Wurzelkanalfüllung.

### **Aufbereitung des Wurzelkanals:**

Unter „Aufbereitung“ wurde beurteilt, ob das gesamte ursprüngliche Wurzelkanallumen mit Wurzelkanalinstrumenten aufbereitet und somit gesäubert und für die Spüllösungen zugänglich gemacht wurde. Da die bei der Aufbereitung verwendeten Wurzelkanalinstrumente einen runden Querschnitt hatten, konnte man anhand der Form des Kanals Rückschlüsse auf eine erfolgte Aufbereitung ziehen. War eine runde und gleichmäßig ausgeformte Kanalwand auf dem jeweiligen Schnittbild zu erkennen, so wurde von einer ausreichenden Aufbereitung ausgegangen

und eine „1“ vergeben. Waren unregelmäßig oder spitz zulaufende Aussackungen zu erkennen, so wurde der Wert „0“ gesetzt. Ebenso wenn Isthmen nicht oder nicht genügend aufgezogen wurden. In Abbildung 8 kennzeichnen die beiden kürzeren Pfeile Aussackungen, die nicht ausreichend durch das Wurzelkanalinstrument ausgeformt wurden, und der längste Pfeil einen nicht aufgezogenen Isthmus, also eine Verbindung zwischen den beiden Hauptkanälen.



**Abbildung 8:** Mikro-Computertomographie-Schnittbild mit Markierungen von unzureichend aufbereiteten Wurzelkanalarealen.

### **Frakturen und Risse:**

Wurde in einem Schnittbild eine Fraktur beziehungsweise ein Riss festgestellt, so wurde eine „1“ vergeben, war auf dem Bild kein Riss oder keine Fraktur zu erkennen eine „0“. Abbildung 9 zeigt ein Bild mit Frakturen und einem Riss.

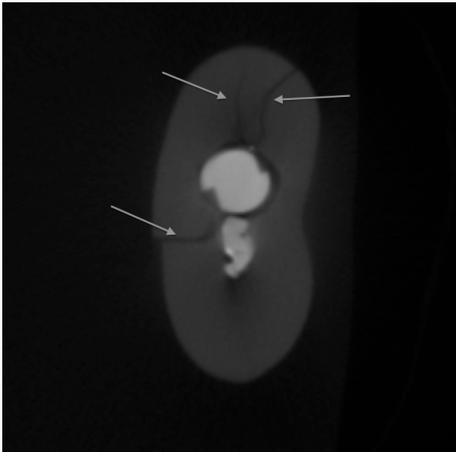


Abbildung 9: Mikro-Computertomographie-Schnittbild mit markierten Frakturen und einem Riss.

### Seitenkanäle:

Beim Vorhandensein eines Seitenkanals wurde eine „1“ vergeben ansonsten eine „0“. Lag zwischen zwei Bildern mit Seitenkanal ein Bild ohne Seitenkanal, so wurden diese als einzelne Seitenkanäle gewertet und in ihrer Anzahl addiert. Der Pfeil in Abbildung 10 markiert einen Seitenkanal.

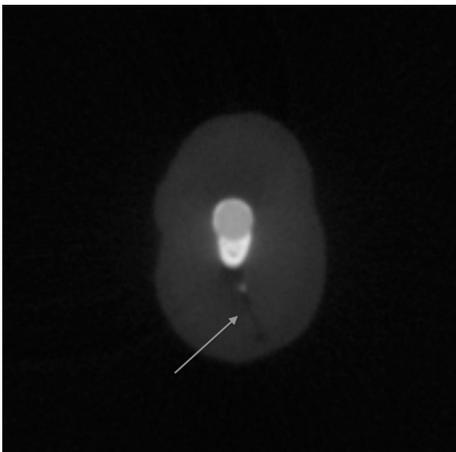
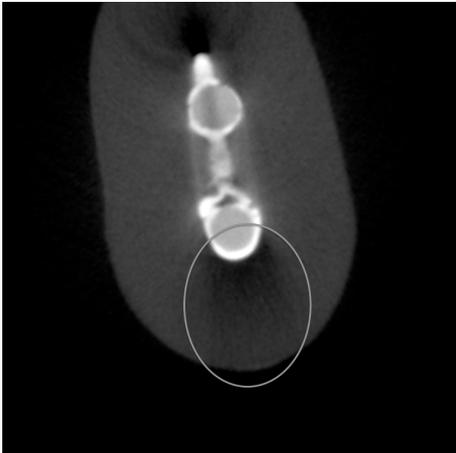


Abbildung 10: Mikro-Computertomographie-Schnittbild mit markiertem Seitenkanal.

### Strahlaufhärtingsartefakte:

Vorhandene Strahlaufhärtingsartefakte wurden mit einer „1“ gekennzeichnet. Waren auf dem jeweiligen Bild keine Strahlaufhärtingsartefakte erkennbar, wurde

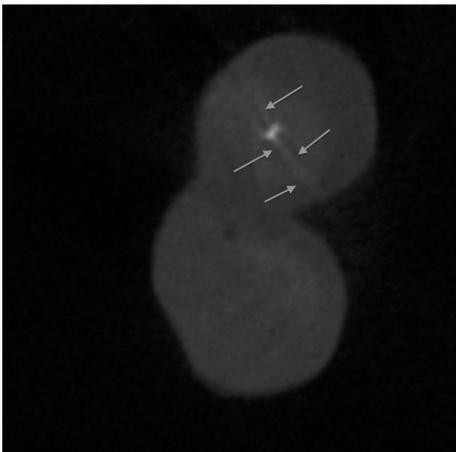
eine „0“ vergeben. Die für ein Strahlaufhärungsartefakt typische dunkle und fächerförmige Aufhellung ist in Abbildung 11 durch einen Kreis markiert.



**Abbildung 11: Mikro-Computertomographie-Schnittbild. Der Kreis markiert ein Strahlaufhärungsartefakt.**

### **Auslöschungsartefakte:**

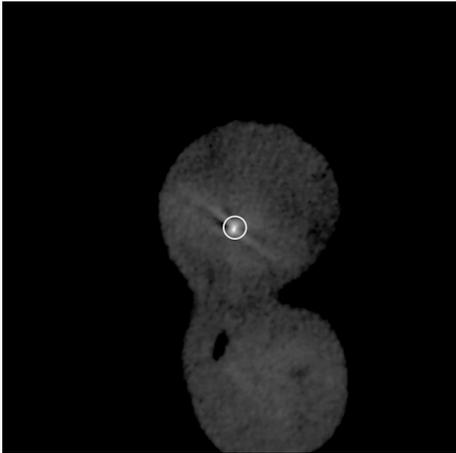
Auslöschungsartefakte wurden, wenn in einem Bild vorhanden, mit einer „1“ ansonsten mit einer „0“ bewertet. Die für ein Auslöschungsartefakt typischen weißen Strahlen sind in Abbildung 12 mit Pfeilen gekennzeichnet.



**Abbildung 12: Mikro-Computertomographie-Schnittbild. Die Pfeile markieren ein Auslöschungsartefakt.**

### **Wurzelkanalinstrumentenbruch:**

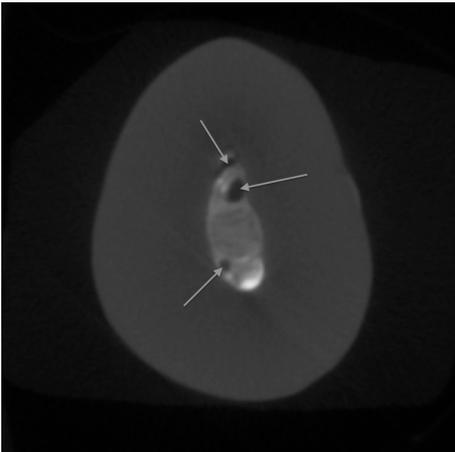
War in einem axialen Schnittbild ein abgebrochenes Wurzelkanalinstrument zu erkennen, so wurde eine „1“ vergeben, wenn nicht eine „0“. In Abbildung 13 ist ein abgebrochenes Wurzelkanalinstrument mit einem Kreis markiert. Man beachte auch die durch das Metall verursachten strahlenförmigen Auslöschungsartefakte.



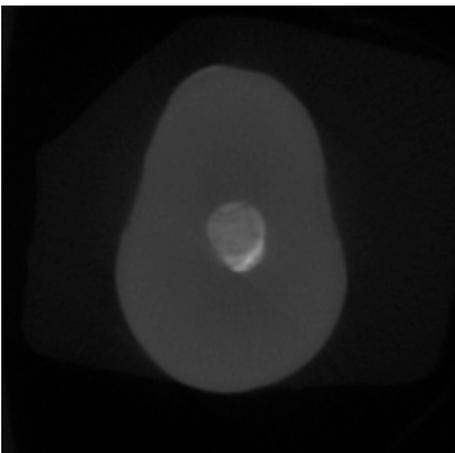
**Abbildung 13: Mikro-Computertomographie-Schnittbild. Der Kreis markiert ein abgebrochenes Wurzelkanalinstrument.**

### **Stiftzement homogen:**

Des Weiteren wurde der Stiftzement bezüglich seiner Homogenität beurteilt. Das heißt, waren Blasen oder Hohlräume im Stiftzement ersichtlich, so wurde eine „0“ vergeben. War der Stiftzement hingegen frei von Blasen oder Hohlräumen, wurde dies mit einer „1“ gewertet. Die Pfeile in Abbildung 14 kennzeichnen beispielhaft Inhomogenitäten im Stiftzement. Abbildung 15 zeigt zum Vergleich ein Schnittbild mit vollständig homogenem Stiftzement.



**Abbildung 14:** Mikro-Computertomographie-Schnittbild. Die Pfeile markieren Inhomogenitäten im Stiftzement. Der Wurzelkanalstift aus Glasfaser ist als dunkler zentraler Kreis zu erkennen.

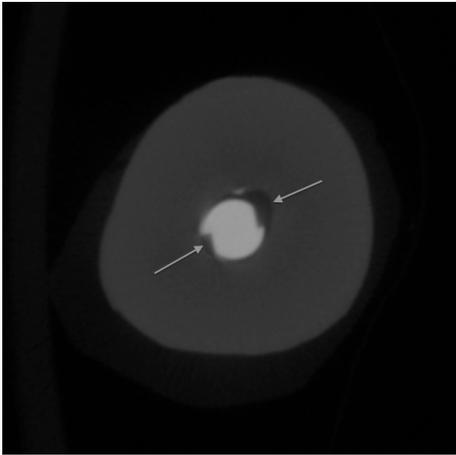


**Abbildung 15:** Mikro-Computertomographie-Schnittbild mit homogenem Stiftzement. Der Wurzelkanalstift aus Glasfaser ist als dunkler zentraler Kreis zu erkennen.

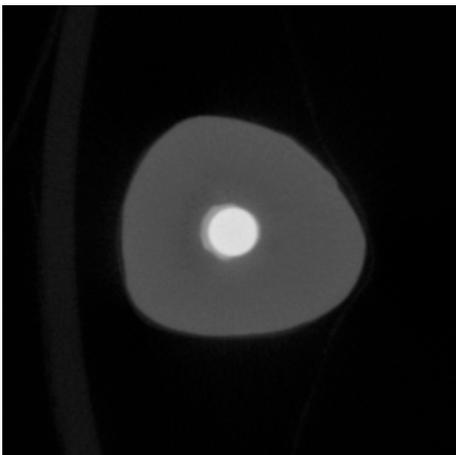
### **Stiftzement wandständig:**

Mit diesem Kriterium wurde bewertet, ob der Zement zum Verkleben des Wurzelstiftes im Wurzelkanal überall wandständig an der Kanalwand anhaftete oder nicht. War kein Spalt oder Hohlraum zwischen Stiftzement und Kanalwand zu erkennen, so wurde eine „1“ vergeben. Eine „Nichtwandständigkeit“ hatte eine „0“ zur Folge. Die Pfeile in Abbildung 16 markieren den Spalt zwischen dem zentral gelegenen Wurzelkanalstift aus Titan und der Kanalwand. Der Stiftzement ist in

diesem Schnittbild also nicht wandständig. Abbildung 17 hingegen zeigt zum Vergleich ein Schnittbild mit vollständig wandständigem Stiftzement.



**Abbildung 16: Mikro-Computertomographie-Schnittbild. Die Pfeile markieren den Spalt zwischen Wurzelkanalstift und Kanalwand. Der Stiftzement ist also nicht wandständig.**

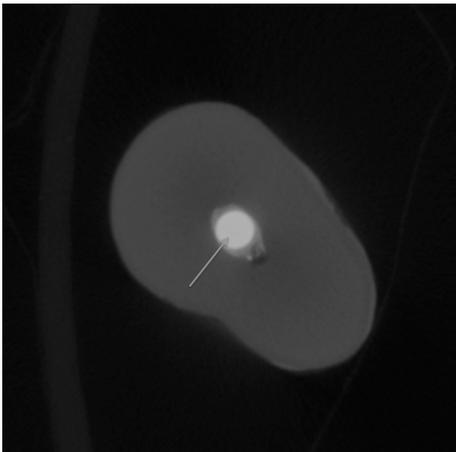


**Abbildung 17: Mikro-Computertomographie-Schnittbild mit wandständigem Stiftzement um den zentralen Wurzelkanalstift.**

### **Stift zentrisch im Kanal:**

Unter diesem Kriterium wurde darauf geschaut, ob der Wurzelkanalstift zentral im Wurzelkanal oder ob er in einer zur originalen Wurzelkanalachse divergierenden Richtung eingebracht wurde. Abbildung 18 zeigt ein Mikro-CT-Schnittbild, auf dem ersichtlich ist, dass der durch einen Pfeil markierte Wurzelkanalstift mittig im Wur-

zelkanal eingebracht wurde. In diesem Fall wurde eine „1“ vergeben, andernfalls eine „0“. Da in allen Proben die Wurzelkanalstifte mittig im Kanalsystem platziert wurden, gibt es kein beispielhaftes Schnittbild mit einem exzentrischen Wurzelkanalstift.



**Abbildung 18: Mikro-Computertomographie-Schnittbild. Der Pfeil markiert den Wurzelkanalstift, der zentral im Wurzelkanal eingebracht wurde.**

### **Perforation durch den Wurzelkanalstift:**

Dieses letzte Merkmal sollte Perforationen der Probenzähne durch den Wurzelkanalstift aufdecken. Da in keiner der Proben eine Perforation festgestellt wurde, gibt es auch hier kein Beispielschnittbild. Daher wurden alle Proben unter „Perforation durch Stift“ mit „0“ bewertet.

### **2.10.1 Auswertung der Mikro-CT-Befunde**

Die oben aufgeführten Kriterien wurden mit Hilfe der Microsoft-Software „Excel für Mac 2011“ in einer Excel-Tabelle festgehalten und ausgewertet. Dabei wurde jeweils berechnet bei wie viel Prozent der Schnittbilder das betreffende Merkmal positiv auftrat. Zudem wurde die Wurzel noch in ein coronales, mediales und apikales Wurzel Drittel unterteilt, um eine praxistaugliche, genauere Unterteilung und Beschreibung der Lokalisation zu ermöglichen. Da für diese Unterteilung eine Schnittbildanzahl, die glatt durch drei teilbar ist, nicht immer gegeben war, wurde

die Vereinbarung getroffen, nur die durch drei teilbare und ganz nach apikal orientiert gelegene Menge an Schnittbildern zu berücksichtigen. Für die Gesamtbeurteilung wurde jedoch die Gesamtzahl der Schnittbilder des jeweiligen Wurzelkanals herangezogen.

In Abbildung 19 ist beispielhaft das Auswertungsblatt für die Probe 5 3 dargestellt.

Zahn/Kanal: 53  
 Anzahl der Kanäle: 1 von 1  
 Bildgebendes Verfahren: Micro-CT  
 Befunder: AE  
 Aufbereitungsart: manuell  
 Fülltechnik/Stift: Gutta Percha ISO 40+Sealer / Glasfaserstift zylindrisch  
 Datum: 30.07.2013

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34			
Homogenität	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0			
Wandständigkeit	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0			
Aufbereitung ausreichend	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
Fraktur/Risse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Seitenkanal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Beamharding-Artefakt	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0		
Auslöschungsartefakt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Instrumentenbruch	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Stiftzement randständig	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Stiftzement homogen	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Stift zentrisch im Kanal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Perforation durch Stift	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Gesamt																																					

### 2.11 Befundung der MRT-Aufnahmen

Zum Betrachten und Befunden der MRT-Aufnahmen wurde ebenfalls der OsiriX-Viewer für Mac OS X in der Version 5.6 verwendet. Dabei wurden die Zähne in allen Schichtungen also axialer, coronaler sowie sagittaler betrachtet und befundet. Abbildung 20 zeigt beispielhaft einen Versuchszahn in axialer, coronaler und sagittaler Schichtung.

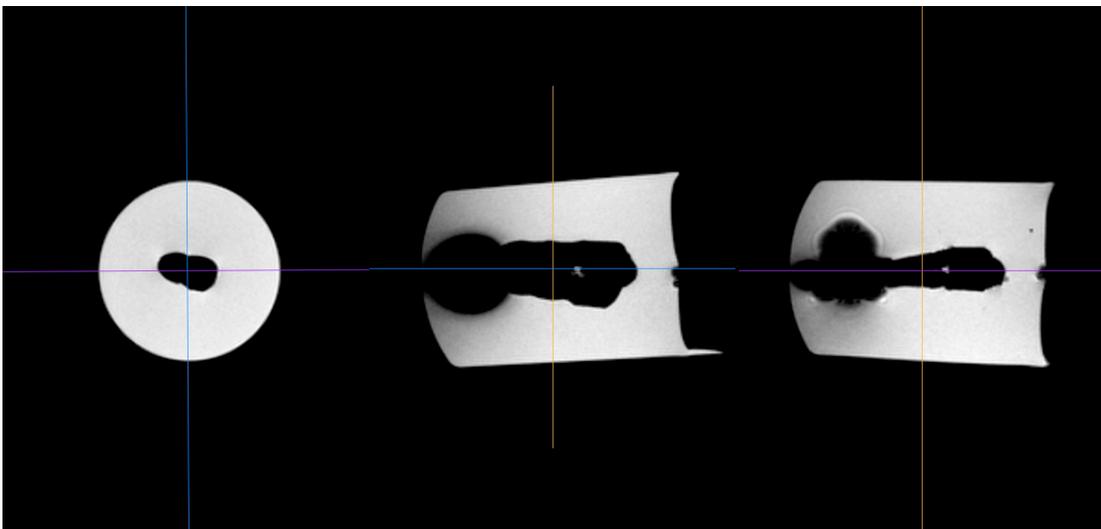


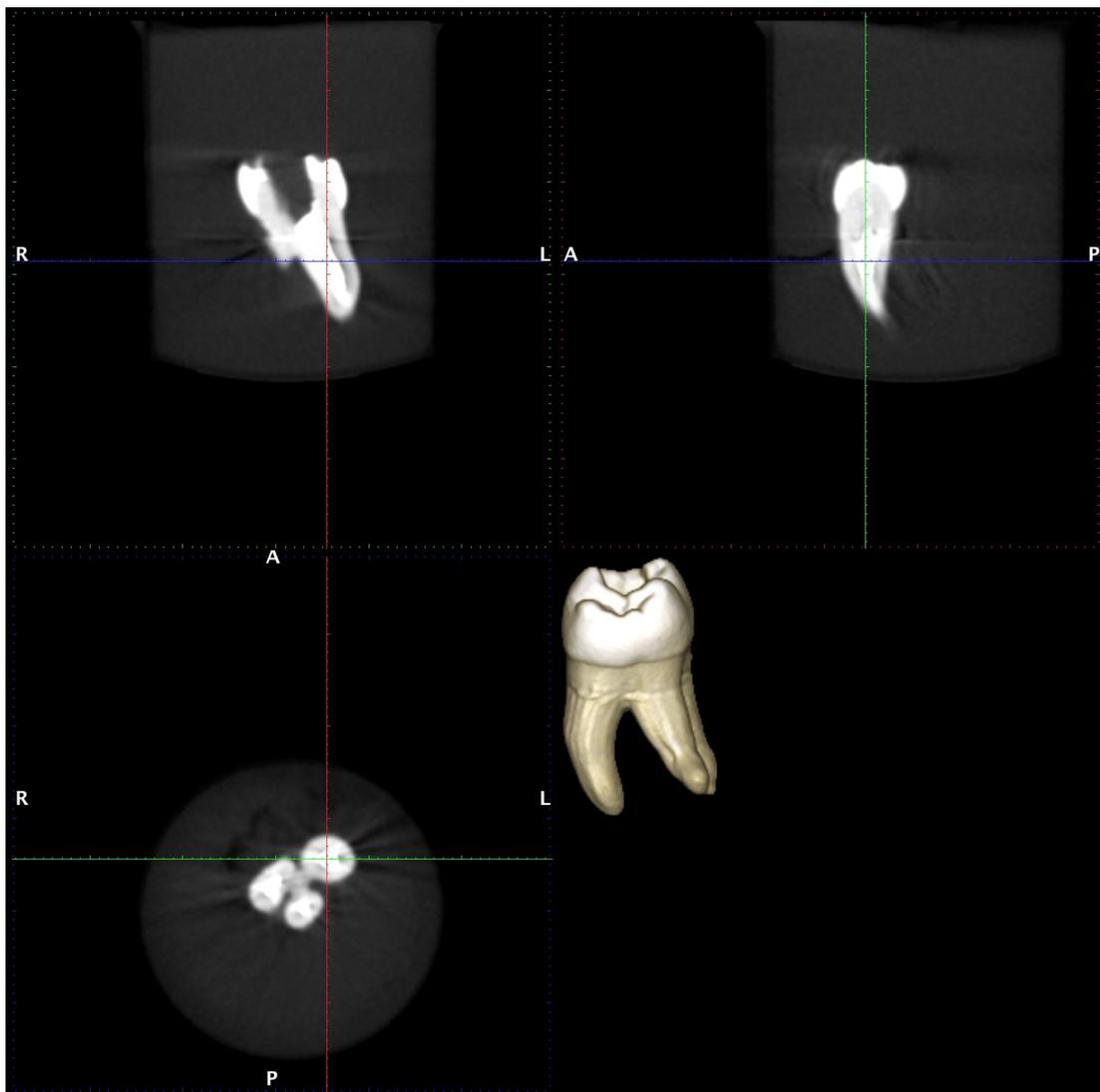
Abbildung 20: Magnetresonanztomographie-Aufnahme in axialer, coronaler und sagittaler Schichtung (von links nach rechts).

#### 2.11.1 Auswertung der MRT-Befunde

Da technisch bedingt die Wurzelkanalfüllungen nicht zu erkennen waren, wurde das Hauptaugenmerk auf die Befundung vorhandener Artefakte beschränkt. War bei einer Aufnahme eines Probezahnes ein Artefakt zu erkennen, so wurde dies mit einer „1“ beurteilt. Außerdem wurde bei einem auftretenden Artefakt tabellarisch festgehalten, welches Wurzelkanalfüllmaterial beziehungsweise welches Stiftsystem verwendet wurde, und ob ein eventuell frakturiertes Wurzelkanalinstrument in einem Wurzelkanal steckte.

### ***2.12 Befundung der DVT-Aufnahmen***

Die DVT-Aufnahmen wurden mit der Software Romexis Version: 3.2.0.R 20.06.13 des ProMax 3D-Herstellers Planmeca befundet und bewertet. Dabei wurden axiale, coronale und sagittale Schnittbilder gleichermaßen gesichtet und dann für jedes Kriterium eine Schulnote von 1 bis 6 vergeben. Diese Noten wurden in einer Excel-Tabelle festgehalten und später ausgewertet. Abbildung 21 zeigt beispielhaft einen Oberkiefermolar in der coronalen, sagittalen und axialen Schichtung sowie in der 3D-Rekonstruktion.



**Abbildung 21: Digitale Volumentomographie-Aufnahme eines Oberkiefermolars in coronaler, sagittaler (oben von links nach rechts) sowie axialer Schichtung und in der 3D-Rekonstruktion (unten von links nach rechts).**

Zur Befundung wurden die einzelnen Wurzelkanäle jeweils in ihrer Gesamtheit betrachtet sowie zur besseren Lokalisationsbeschreibung visuell in ein coronales, ein mediales und ein apikales Wurzel Drittel unterteilt. Dabei wurden folgende Kriterien beurteilt und mit Hilfe des nachstehenden „Benotungssystems“ bewertet.

### **Länge der Wurzelkanalfüllung:**

- 0 Länge der Wurzelkanalfüllung entspricht dem radiologischen Apex abzüglich 1 mm
- Länge der Wurzelkanalfüllung ist mehr als 1 mm kürzer als der radiologische Apex
- + Die Wurzelkanalfüllung ragt über den radiologischen Apex hinaus

### **Homogenität der Wurzelkanalfüllung:**

- 1 keine Blasen erkennbar und Länge entspricht dem radiologischen Apex abzüglich 1 mm
- 2 eine kleine Blase und/oder Länge zu kurz
- 3 mehrere Blasen und/oder Länge zu kurz bzw. nicht eindeutig zu befunden
- 4 noch mehr Blasen
- 5 sehr viele und/oder große Blasen
- 6 nicht beurteilbar, da der Kanal nicht zu erkennen ist

### **Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllung:**

- 1 überall wandständig und Länge entspricht dem radiologischen Apex abzüglich 1 mm
- 2 überall wandständig aber Länge zu kurz
- 3 nicht ganz wandständig und/oder Länge zu kurz bzw. nicht eindeutig zu befunden
- 4 mehrere Stellen nicht wandständig
- 5 über große Teile nicht wandständig
- 6 nicht beurteilbar, da der Kanal nicht zu erkennen ist

### **Aufbereitung des Wurzelkanalsystems:**

- 1 perfekt aufbereitet und Länge entspricht dem radiologischen Apex abzüglich 1 mm
- 2 gut aufbereitet aber Länge zu kurz
- 3 nicht ganz vollständig aufbereitet bzw. nicht eindeutig zu befunden
- 4 unvollständig aufbereitet oder Instrumentenbruch im apikalen Wurzeldrittel
- 5 nicht aufbereitet oder Instrumentenbruch schon im coronalen oder medialen Wurzeldrittel
- 6 nicht beurteilbar, da der Kanal nicht zu erkennen ist

### **Wandständigkeit des Wurzelstiftzementes:**

- 1 überall wandständig
- 2 an nur einer kleinen Stelle nicht ganz wandständig
- 3 nicht ganz wandständig oder nicht eindeutig zu beurteilen
- 4 mehrere Stellen nicht wandständig
- 5 über große Teile nicht wandständig
- 6 nicht beurteilbar

### **Homogenität des Wurzelstiftzementes:**

- 1 keine Blasen erkennbar
- 2 eine kleine Blase
- 3 mehrere Blasen oder nicht eindeutig zu beurteilen
- 4 noch mehr Blasen
- 5 sehr viele und/oder große Blasen
- 6 nicht beurteilbar

### **Seitenkanäle, Risse, Auslöschungs- bzw. Aufhärtungsartefakte, Instrumentenfrakturen, Perforation durch den Wurzelstift:**

Wurde an einem Wurzelkanal eines dieser Kriterien festgestellt, so wurde dieses mit einer „1“ gekennzeichnet anderenfalls mit einer „0“.

### **2.13 Befundung der Zahnfilme**

Die Zahnfilme wurden in vestibulo-oraler Blickrichtung betrachtet. Um auch hier der Praxistauglichkeit im zahnärztlichen Alltag Rechnung zu tragen, wurden die Zahnwurzeln visuell in Wurzeldrittel unterteilt und für die nachfolgenden Kriterien Schulnoten von 1 bis 6 vergeben. Diese Noten wurden ebenfalls in einer Excel-Tabelle festgehalten und später ausgewertet.

Der „Notenschlüssel“ soll im Folgenden dargestellt werden:

#### **Länge der Wurzelkanalfüllung:**

- 0 Länge der Wurzelkanalfüllung entspricht dem radiologischen Apex abzüglich 1 mm
- Länge der Wurzelkanalfüllung ist mehr als 1 mm kürzer als der radiologische Apex
- + Die Wurzelkanalfüllung ragt über den radiologischen Apex hinaus

### **Homogenität der Wurzelkanalfüllung:**

- 1 keine Blasen erkennbar und Länge entspricht dem radiologischen Apex abzüglich 1 mm
- 2 eine kleine Blase und/oder Länge zu kurz
- 3 mehrere Blasen und/oder Länge zu kurz
- 4 noch mehr Blasen
- 5 sehr viele und/oder große Blasen
- 6 nicht beurteilbar, da der Kanal nicht zu erkennen ist

### **Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllung:**

- 1 überall wandständig und Länge entspricht dem radiologischen Apex abzüglich 1 mm
- 2 überall wandständig aber Länge zu kurz
- 3 nicht ganz wandständig und/oder Länge zu kurz
- 4 mehrere Stellen nicht wandständig
- 5 über große Teile nicht wandständig
- 6 nicht beurteilbar, da der Kanal nicht zu erkennen ist

### **Aufbereitung des Wurzelkanalsystems:**

- 1 perfekt aufbereitet und Länge entspricht dem radiologischen Apex abzüglich 1 mm
- 2 gut aufbereitet aber Länge zu kurz
- 3 nicht ganz vollständig aufbereitet
- 4 unvollständig aufbereitet oder Instrumentenbruch im apikalen Wurzeldrittel
- 5 nicht aufbereitet oder Instrumentenbruch schon im coronalen oder medialen Wurzeldrittel
- 6 nicht beurteilbar, da der Kanal nicht zu erkennen ist

### **Wandständigkeit des Wurzelstiftzementes:**

- 1 überall wandständig
- 2 an nur einer kleinen Stelle nicht ganz wandständig
- 3 nicht ganz wandständig oder nicht eindeutig zu beurteilen
- 4 mehrere Stellen nicht wandständig
- 5 über große Teile nicht wandständig
- 6 nicht beurteilbar

### **Homogenität des Wurzelstiftzementes:**

- 1 keine Blasen erkennbar
- 2 eine kleine Blase
- 3 mehrere Blasen oder nicht eindeutig zu beurteilen
- 4 noch mehr Blasen
- 5 sehr viele und/oder große Blasen
- 6 nicht beurteilbar

### **Seitenkanäle, Risse, Auslöschungs- bzw. Aufhärtungsartefakte, Instrumentenfrakturen, Perforation durch den Wurzelstift:**

Wurde an einem Wurzelkanal eines dieser Kriterien festgestellt, so wurde dieses mit einer „1“ gekennzeichnet anderenfalls mit einer „0“.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Deskriptive Beschreibung der Ergebnisse

Zunächst sollen im Folgenden ein paar grundlegende Ergebnisse beziehungsweise Beobachtungen und Eindrücke deskriptiv festgehalten werden:

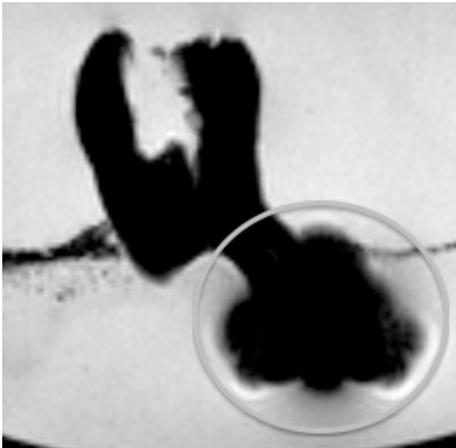
#### 3.1.1 Mikro-CT

Das Mikro-CT hat sich durch seine hohe Detailauflösung und geringe Artefaktbildung objektiv als das genaueste der in dieser Arbeit untersuchten bildgebenden Verfahren erwiesen. Mit diesem Verfahren ließen sich alle festgelegten Kriterien zuverlässig und reproduzierbar bewerten. Daher wurde es in dieser vergleichenden Arbeit als Referenzverfahren eingesetzt.

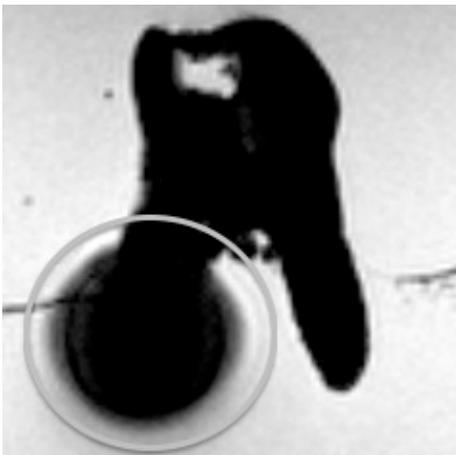
#### 3.1.2 MRT

Auf keiner der Aufnahmen konnte man eine Wurzelkanalfüllung erkennen. Eine Differenzierung von unterschiedlichen Zahnstrukturen war ebenfalls nicht möglich. Insgesamt traten bei den MRT-Aufnahmen vier Artefakte auf. Bei zwei von insgesamt vier Zähnen, bei denen ein Wurzelkanalinstrument im Kanal abgebrochen war, imponierten Artefakte wie die Abbildung 22 und die Abbildung 23 zeigen.

Bei den beiden Proben 3b und 4C, bei denen ebenfalls ein Wurzelkanalinstrument frakturierte, waren jedoch keine Artefakte im MRT zu erkennen.



**Abbildung 22: Magnetresonanztomographie-Aufnahme der Probe 1C. Der Kreis markiert ein Artefakt.**



**Abbildung 23: Magnetresonanztomographie-Aufnahme der Probe 3C. Der Kreis markiert ein Artefakt.**

Die beiden anderen Artefakte bei den MRT-Aufnahmen sind in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt und traten bei der Probe 2 5 (Titanstift passiv) und der Probe 3 5 (Keramikstift) auf. Die übrigen mit Titan- oder Keramikstift versorgten Proben zeigten keine Artefakte im MRT.

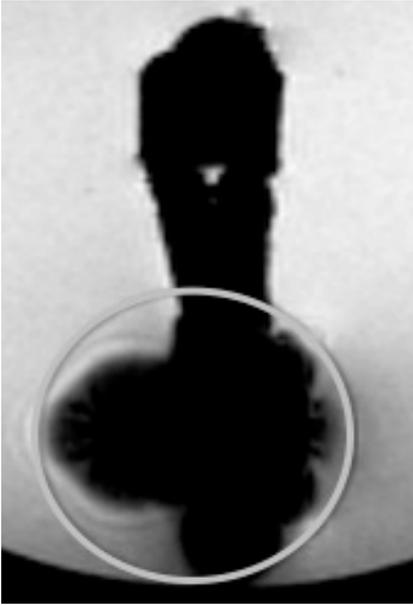


Abbildung 24: Magnetresonanztomographie-Aufnahme der Probe 3 5. Der Kreis markiert ein Artefakt.

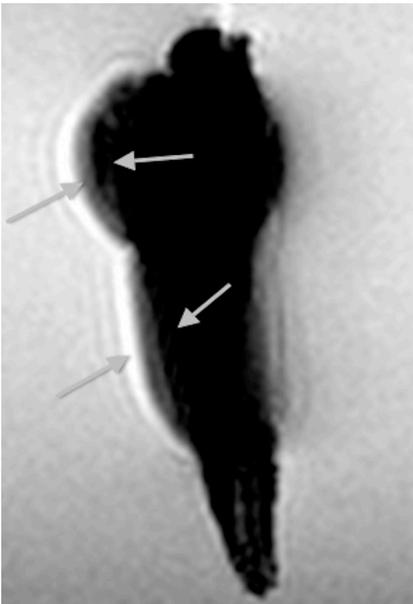


Abbildung 25: Magnetresonanztomographie-Aufnahme der Probe 2 5. Die Pfeile markieren ein Artefakt in Form einer Doppelkontur.

Die Tabelle 1 fasst die im MRT vorkommenden Artefakte nochmals zusammen.

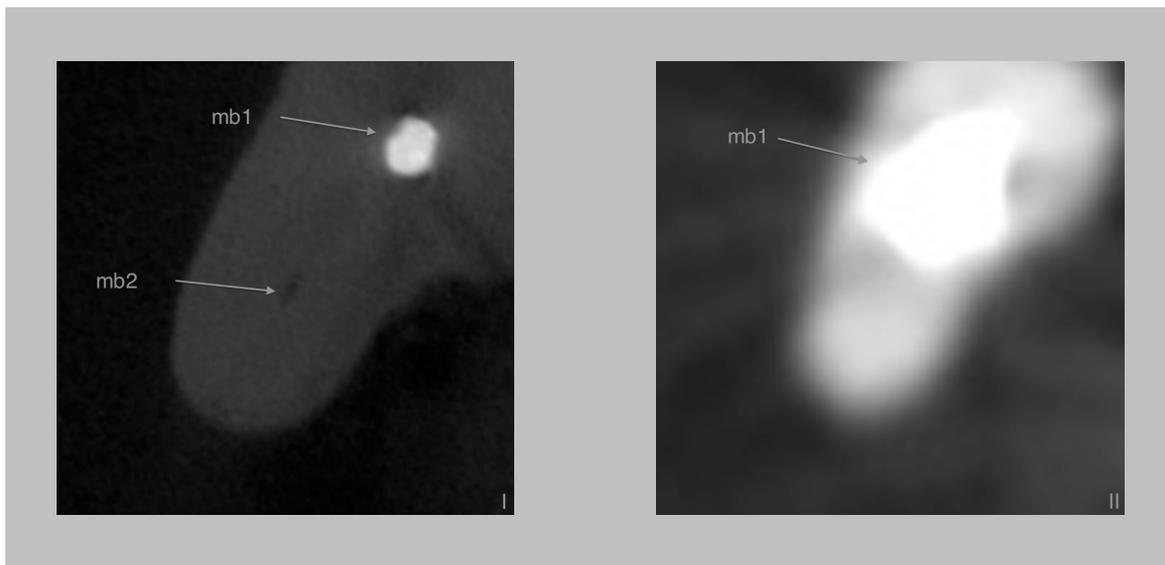
**Tabelle 1: Übersicht der vorkommenden Artefakte im MRT unter Angabe der Wurzelkanalfüllmaterialien, des Wurzelstifttyps und ob ein Wurzelkanalinstrument frakturiert war.**

<b>Probe</b>	<b>Wurzelkanalfüllmaterialien</b>	<b>Wurzelstifttyp</b>	<b>frakturiertes Wurzelkanalinstrument</b>	<b>Artefakt im MRT</b>
1C	Guttapercha mit AH Plus	keiner	ja	ja
3C	Guttapercha mit 2Seal	keiner	ja	ja
2 5	Guttapercha mit AH Plus	Titan passiv	nein	ja
3 5	Guttapercha mit AH Plus	Keramik	nein	ja

### 3.1.3 DVT

#### 3.1.3.1 Anzahl und Darstellung der sichtbaren Kanäle

Im DVT waren bei keinem der Oberkiefermolaren die zweiten beziehungsweise die dritten mesio-bukkalen Kanäle zu erkennen, obwohl diese im Mikro-CT klar zu erkennen waren. In Abbildung 26 ist ein vergleichbarer Bildausschnitt der selben Probe einmal im Mikro-CT und einmal im DVT gegenübergestellt. Der zweite mesio-bukkalen Wurzelkanal „mb2“ ist im Mikro-CT aber nicht im DVT zu erkennen.



**Abbildung 26: Gegenüberstellung eines vergleichbaren Bildausschnittes einer Mikro-Computertomographie-Aufnahme (I) mit einer Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) von der selben Probe. In der Mikro-Computertomographie-Aufnahme (I) ist der zweite mesio-bukkale Wurzelkanal (mb2) zu erkennen in der Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) nicht. Der erste mesio-bukkale Wurzelkanal (mb1) ist auf beiden Aufnahmen zu sehen.**

Im DVT wurde an einer Probe sogar ein nicht vorhandener zusätzlicher Wurzelkanal angenommen. Bei diesem „zusätzlichen“ Wurzelkanal handelte es sich in Wirklichkeit um einen Wurzelkanal mit ovalem Querschnitt, der lediglich bei der Aufbereitung des Wurzelkanals nicht ausreichend aufbereitet wurde. Dies belegen die Gegenüberstellungen mit dem Mikro-CT einmal in axialer Schichtung in Abbildung 27 und einmal in sagittaler Schichtung in Abbildung 28.

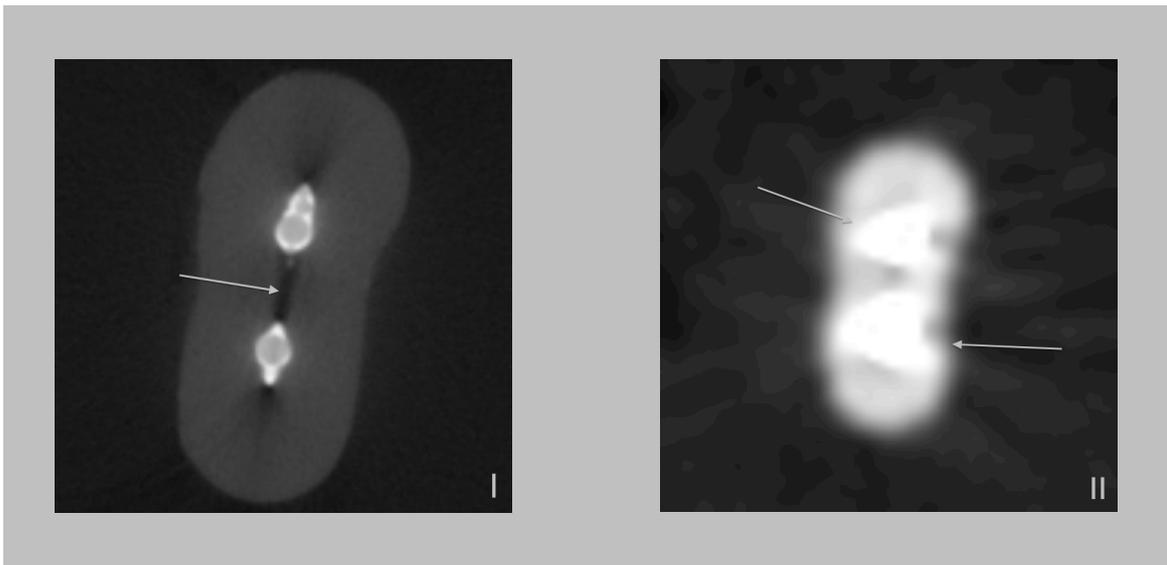


Abbildung 27: Gegenüberstellung eines vergleichbaren Bildausschnittes einer Mikro-Computertomographie-Aufnahme (I) mit einer Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) von der selben Probe. Der Pfeil in (I) markiert den ungefüllten Isthmus. Man kann deutlich erkennen, dass es sich um einen Wurzelkanal mit ovalem Querschnitt handelt. Die beiden Pfeile in (II) markieren die beiden scheinbar voneinander getrennten Wurzelkanalfüllungen. Da kein Isthmus zu erkennen ist, wird der Eindruck erweckt, es handle sich um zwei getrennte Kanäle.

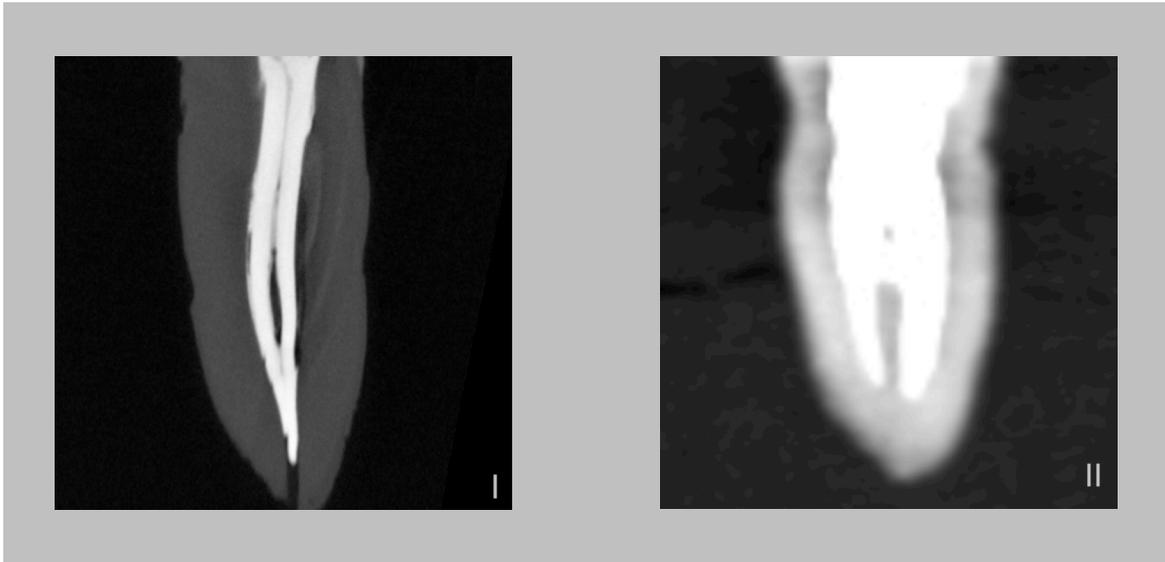


Abbildung 28: Gegenüberstellung eines vergleichbaren Bildausschnittes einer Mikro-Computertomographie-Aufnahme (I) mit einer Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) von der selben Probe. In (I), einer Curved-Multiplanaren-Rekonstruktion, kann man erkennen, dass es sich um einen Wurzelkanal handelt, in dem zwei Guttaperchaspitzen eingebracht sind. In der Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) bekommt man den Eindruck von zwei voneinander getrennten Wurzelkanälen.

### 3.1.3.2 Möglichkeit der Beurteilung der Qualität der Wurzelkanalfüllungen

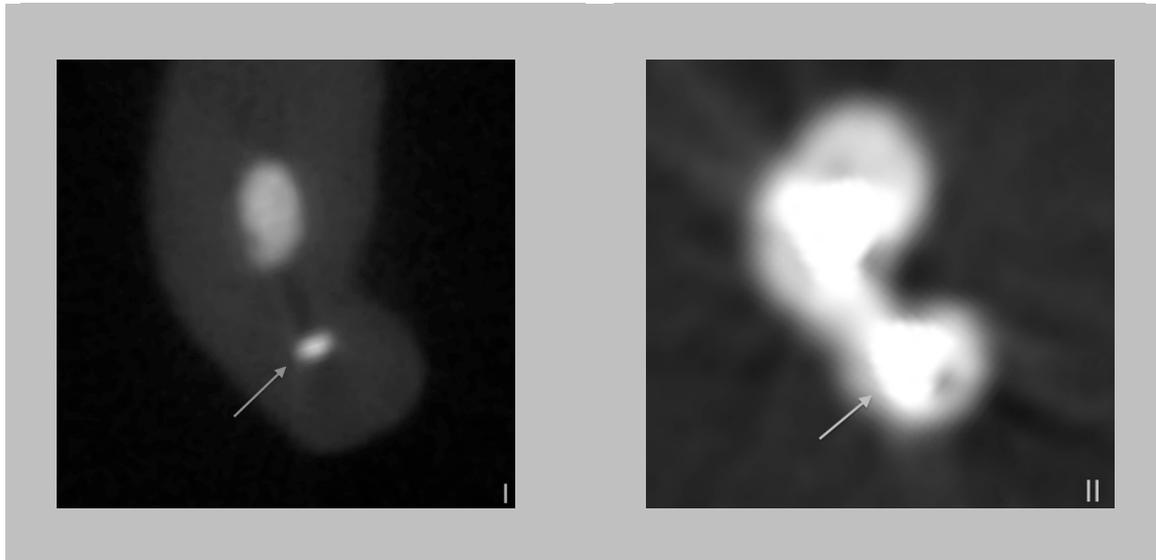
Im DVT war es in den meisten Fällen nur schwer möglich eine eindeutige Beurteilung für die Homogenität und die Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllung abzugeben. Daher wurde häufig die Note „3“ für „nicht eindeutig beurteilbar“ vergeben. Auch war eine klare Trennung zwischen Wurzelkanalfüllmaterial und Wurzelstift nur schwer bis gar nicht möglich. Ebenso war es mitunter schwierig die Länge der Wurzelkanalfüllung sauber zu beurteilen, wie aus Abbildung 29 hervorgeht.



**Abbildung 29: Gegenüberstellung eines vergleichbaren Bildausschnittes einer Mikro-Computertomographie-Aufnahme (I) mit einer Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) und mit einem Zahnfilm (III) von der selben Probe. In (I), einer Curved-Multiplanaren-Rekonstruktion, kann man erkennen, dass der physiologische Apex nicht dem radiologischen Apex entspricht. Das heißt der Wurzelkanal tritt seitlich an der Zahnwurzel und nicht an deren Spitze aus. Die Wurzelkanalfüllung ist demnach „zu lang“. In der Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) und dem Zahnfilm (III) lässt sich dieses Detail nicht erkennen. Die Länge der Wurzelkanalfüllung scheint demnach bei den letzten beiden bildgebenden Verfahren „korrekt“. Die Kreise markieren jeweils die beschriebene Region.**

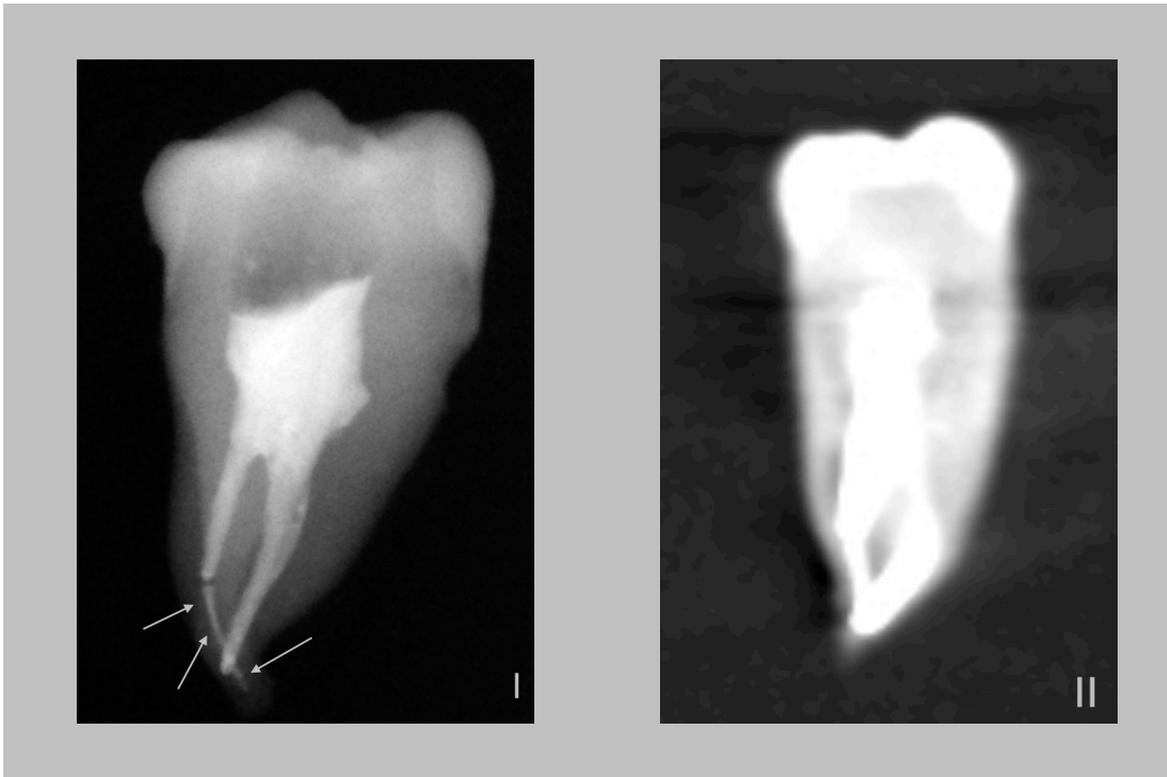
### 3.1.3.3 Visualisierung frakturierter Wurzelkanalinstrumente

Genauso wenig war es möglich ein frakturiertes Wurzelkanalinstrument von einer Wurzelkanalfüllung zu unterscheiden (siehe Abbildung 30).



**Abbildung 30: Gegenüberstellung eines vergleichbaren Bildausschnittes einer Mikro-Computertomographie-Aufnahme (I) mit einer Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) von der selben Probe. Die Pfeile markieren in beiden Aufnahmen ein frakturiertes Wurzelkanalinstrument. Bereits in der Mikro-Computertomographie-Aufnahme (I) ist das Instrument nur schwer von einer Wurzelkanalfüllung zu unterscheiden. In der Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) ist es unmöglich.**

Frakturierte Wurzelkanalinstrumente ließen sich besser auf den Zahnfilmen erkennen, wie die Gegenüberstellung von Zahnfilm und DVT in Abbildung 31 zeigt. Auch hier ist im DVT keine klare Abgrenzung des Wurzelkanalinstrumentenstückes von der restlichen Wurzelkanalfüllung möglich.



**Abbildung 31: Gegenüberstellung eines Zahnfilms (I) mit einem vergleichbaren Bildausschnitt einer Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) von der selben Probe. Die Pfeile im Zahnfilm (I) markieren ein abgebrochenes Wurzelkanalinstrument. Dieses ist in der Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) nicht als solches von der restlichen Wurzelkanalfüllung abgrenzbar.**

### 3.1.3.4 Darstellung von Seitenkanälen, Rissen oder Wurzelfrakturen

Im Mikro-CT imponierten diverse Seitenkanäle. Auch diese waren im DVT nicht eindeutig als solche zu erkennen. Abbildung 32 zeigt einen vergleichbaren Bildausschnitt der selben Probe einmal im Mikro-CT (I) und einmal im DVT (II). Der mit einem Pfeil gekennzeichnete Seitenkanal ist im DVT nicht zu erkennen. Ebenso wenig waren, wie die Abbildung 33 zeigt, Risse oder Frakturen zu detektieren.

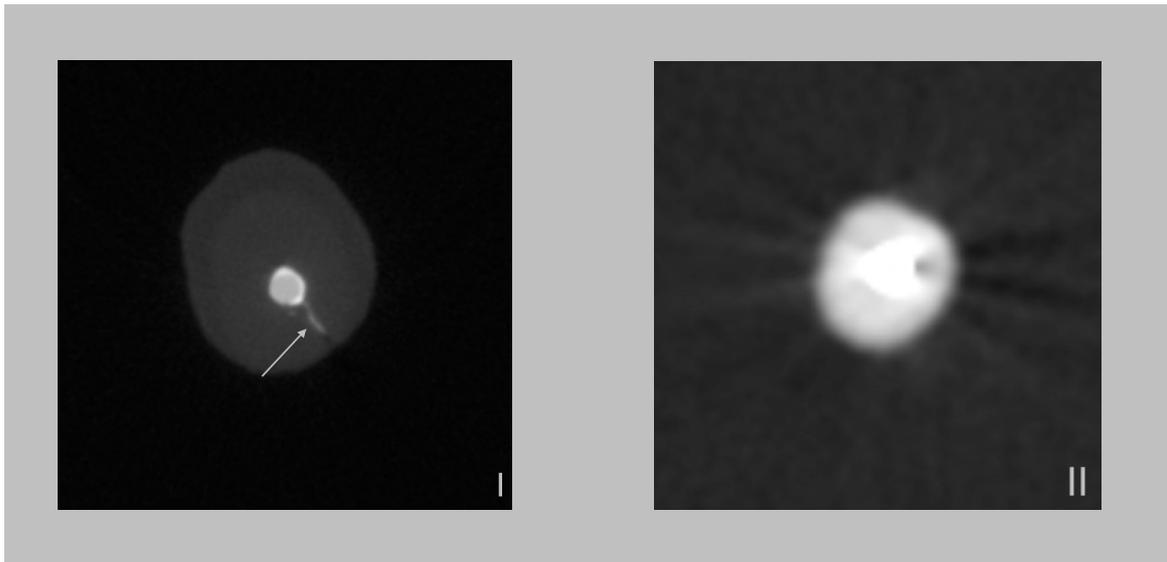
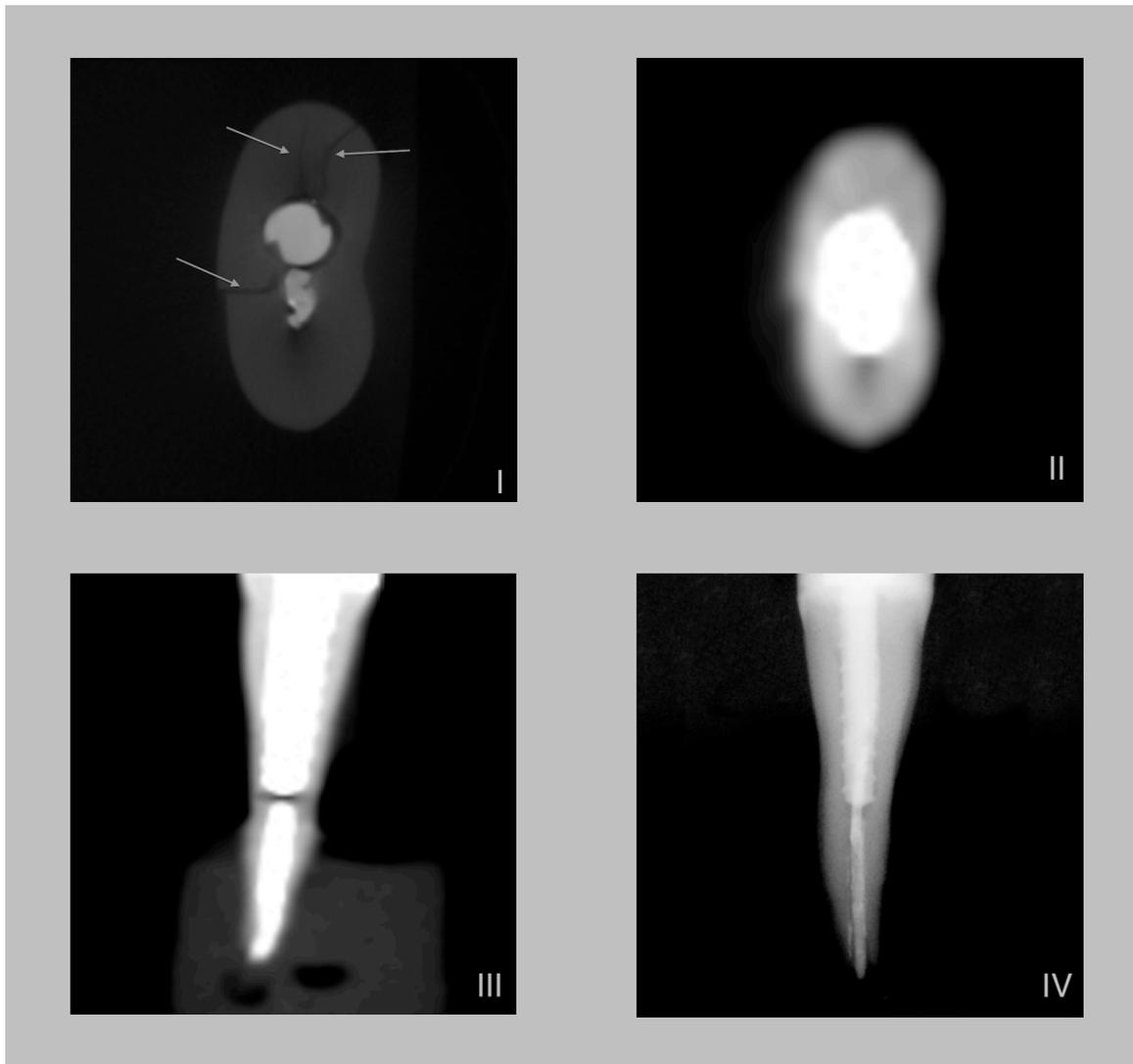


Abbildung 32: Gegenüberstellung eines vergleichbaren Bildausschnittes einer Mikro-Computertomographie-Aufnahme (I) mit einer Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) von der selben Probe. Der Pfeil in der Mikro-Computertomographie-Aufnahme (I) markiert einen Seitenkanal. Dieser ist in der Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II) nicht zu erkennen.

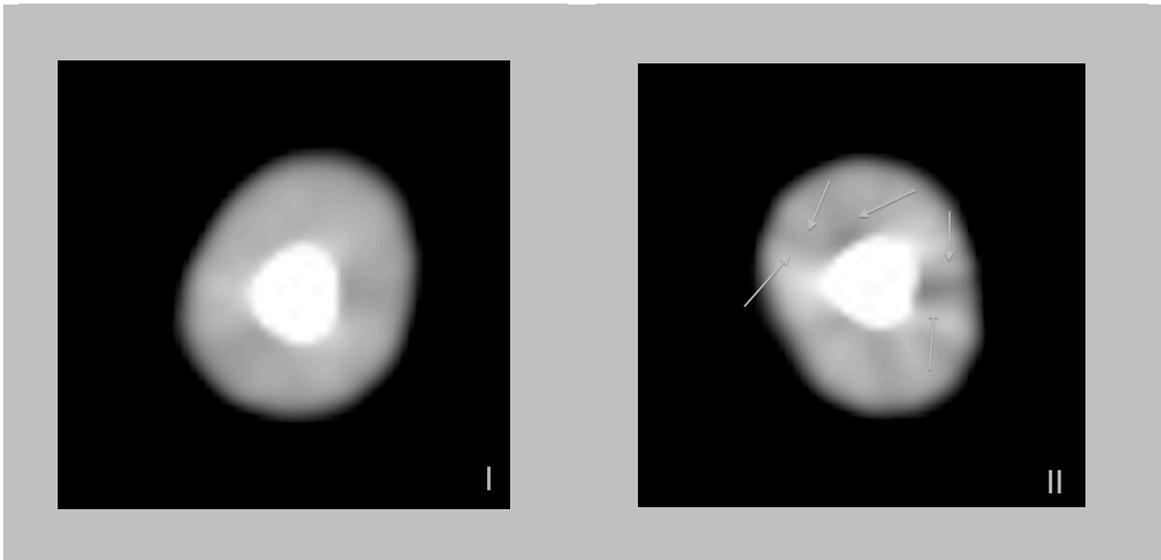


**Abbildung 33:** Gegenüberstellung eines vergleichbaren Bildausschnittes einer Mikro-Computertomographie-Aufnahme im axialen Schnitt (I) mit einer Digitalen Volumentomographie-Aufnahme im axialen (II) sowie im coronalen Schnitt (III) und mit einem Zahnfilm (IV) von der selben Probe. Auf Bild (I) kann man die durch Pfeile markierten Risse und Frakturen deutlich erkennen. In beiden Schnittebenen der Digitalen Volumentomographie-Aufnahme (II+III) sowie auf dem Zahnfilm (IV) gibt es keinen Anhalt auf Risse oder Frakturen.

### 3.1.3.5 Artefakte im DVT

Ob sich die Artefakte in ihrer Intensität oder Ausprägung in den einzelnen Gruppen unterscheiden, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Es wurde nur nach dem Muster „Artefakt-ja/nein“ bewertet. Speziell bei den Gruppen der Stiftzähne

wurde jedoch objektiv ein Unterschied registriert. Abbildung 34 zeigt zwei axiale DVT-Schnitte einmal aus der Gruppe 5 (Titanstift passiv) und einmal aus der Gruppe 10 (Thermafil). Bei der „Thermafil-Gruppe“ waren die Artefakte stärker ausgeprägt.



**Abbildung 34:** Digitale Computertomographie-Aufnahmen. Bild (I) zeigt ein axiales Schnittbild aus der Gruppe 5 (Titanstift passiv). Bild (II) zeigt ein axiales Schnittbild aus der Gruppe 10 (Thermafil). Auf Bild (II) erkennt man die im Vergleich zu Bild (I) stärker ausgeprägten Strahlauhärtungsartefakte (markiert durch Pfeile).

### 3.1.4 Zahnfilm

#### 3.1.4.1 Darstellung von Seitenkanälen, Rissen oder Wurzelfrakturen

Risse und Wurzelfrakturen ließen sich bei den Untersuchungen mittels Zahnfilmen nicht nachweisen, wie Abbildung 33 bereits zeigte. Allerdings waren teilweise wie Abbildung 35 beweist Seitenkanäle zu erkennen, jedoch nur wenn diese mit Wurzelkanalfüllmaterial ausgeflossen waren.



Abbildung 35: Zahnfilm. Der Kreis markiert einen Seitenkanal, der mit Wurzelkanalsealer ausgeflossen ist.

### 3.1.4.2 Visualisierung frakturierter Wurzelkanalinstrumente

Wie bereits in Abbildung 31 (I) gezeigt wurde, eignete sich der Zahnfilm auch zum Visualisieren und Auffinden von frakturierten Wurzelkanalinstrumenten.

### **3.2 Deskriptive Statistik der Ergebnisse**

#### **3.2.1 Beurteilbarkeit der Länge der Wurzelkanalfüllung in den einzelnen bildgebenden Verfahren**

Tabelle 2: Übersicht über die Beurteilung der Länge der Wurzelkanalfüllungen in den einzelnen bildgebenden Verfahren.

<b>Bewertung der Länge der insg. 70 Wurzelkanalfüllungen</b>	<b>Mikro-Computertomographie</b>	<b>Digitale Volumetomographie</b>	<b>Zahnfilm</b>
korrekt	9	17	14
zu lang	27	30	26
zu kurz	34	20	22
nicht beurteilbar	0	3	8

### 3.2.2 Beurteilbarkeit der Homogenität der Wurzelkanalfüllungen in den einzelnen bildgebenden Verfahren

#### 3.2.2.1 Mikro-CT

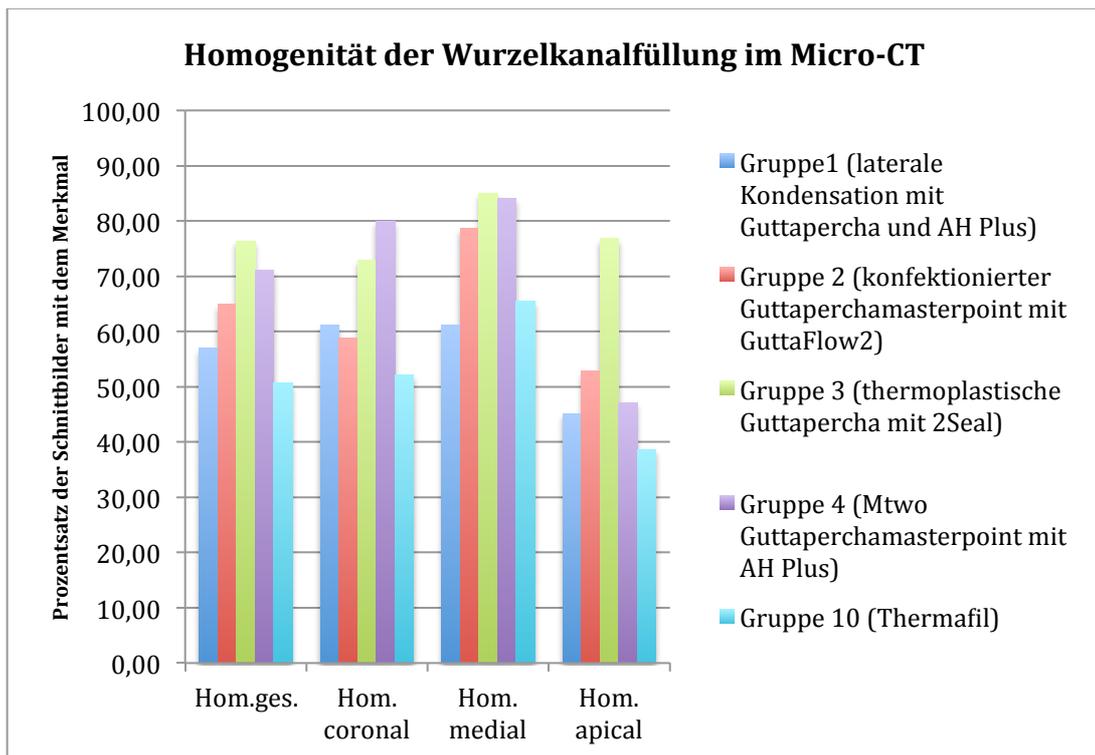
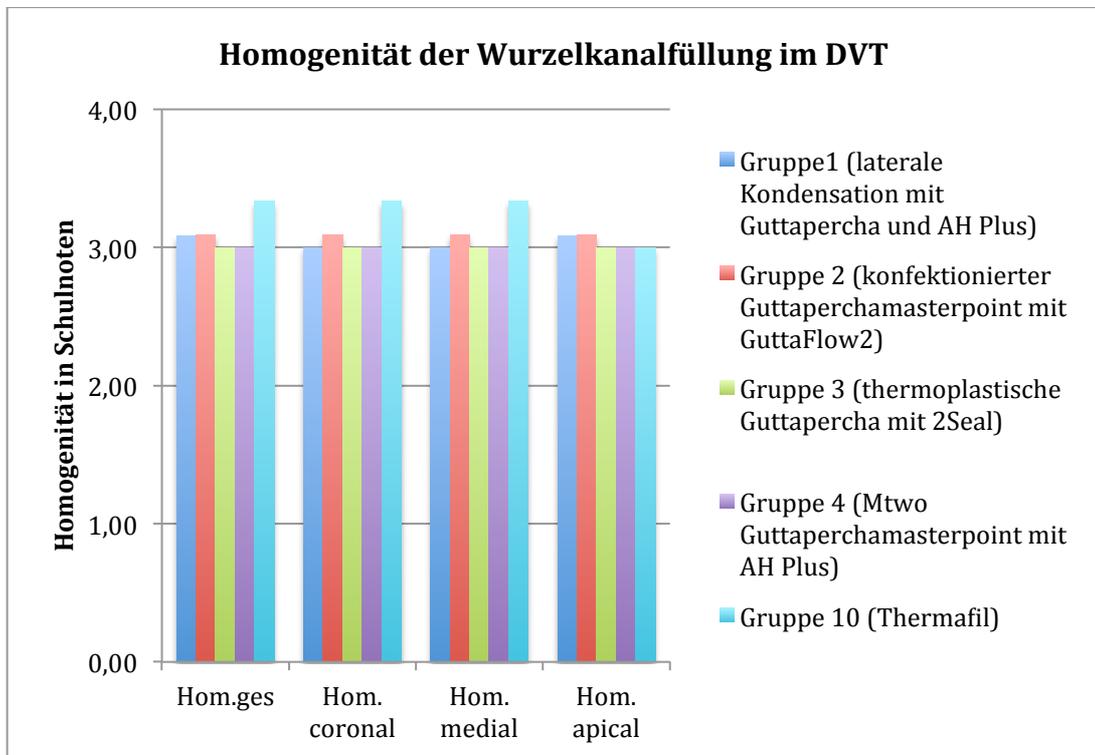


Abbildung 36: Im vorliegenden Diagramm ist die Homogenität der Wurzelkanalfüllungen in den Mikro-Computertomographie-Aufnahmen jeweils über die gesamte Länge des Wurzelkanals, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzel Drittel, für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Schnittbilder an, der im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen mit „homogen“ bewertet wurde. Je höher der Prozentsatz desto homogener waren die Wurzelkanalfüllungen, die mit der jeweiligen Wurzelfülltechnik gefüllt wurden.

## 3.2.2.2 DVT



**Abbildung 37:** Im vorliegenden Diagramm ist die Homogenität der Wurzelkanalfüllungen in den Digitalen Volumentomographie-Aufnahmen jeweils über die gesamte Länge des Wurzelkanals, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzel Drittel, für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt die „Schulnote“ an, mit der die Homogenität der Wurzelkanalfüllungen im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen bewertet wurde. Je niedriger die „Schulnote“ desto homogener waren die Wurzelkanalfüllungen, die mit der jeweiligen Wurzelfülltechnik gefüllt wurden.

3.2.2.3 Zahnfilm

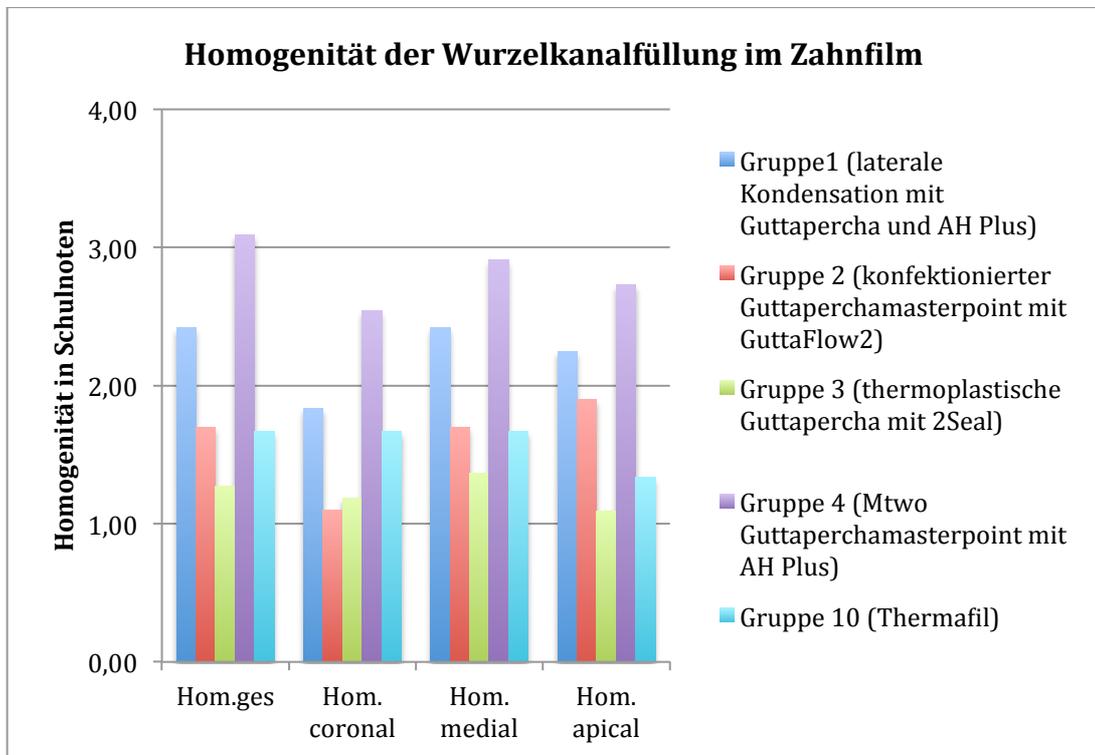


Abbildung 38: Im vorliegenden Diagramm ist die Homogenität der Wurzelkanalfüllungen im Zahnfilm jeweils über die gesamte Länge des Wurzelkanals, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzel Drittel, für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt die „Schulnote“ an, mit der die Homogenität der Wurzelkanalfüllungen im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen bewertet wurde. Je niedriger die „Schulnote“ desto homogener waren die Wurzelkanalfüllungen, die mit der jeweiligen Wurzelfülltechnik gefüllt wurden.

### 3.2.3 Beurteilbarkeit der Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllungen in den einzelnen bildgebenden Verfahren

#### 3.2.3.1 Mikro-CT

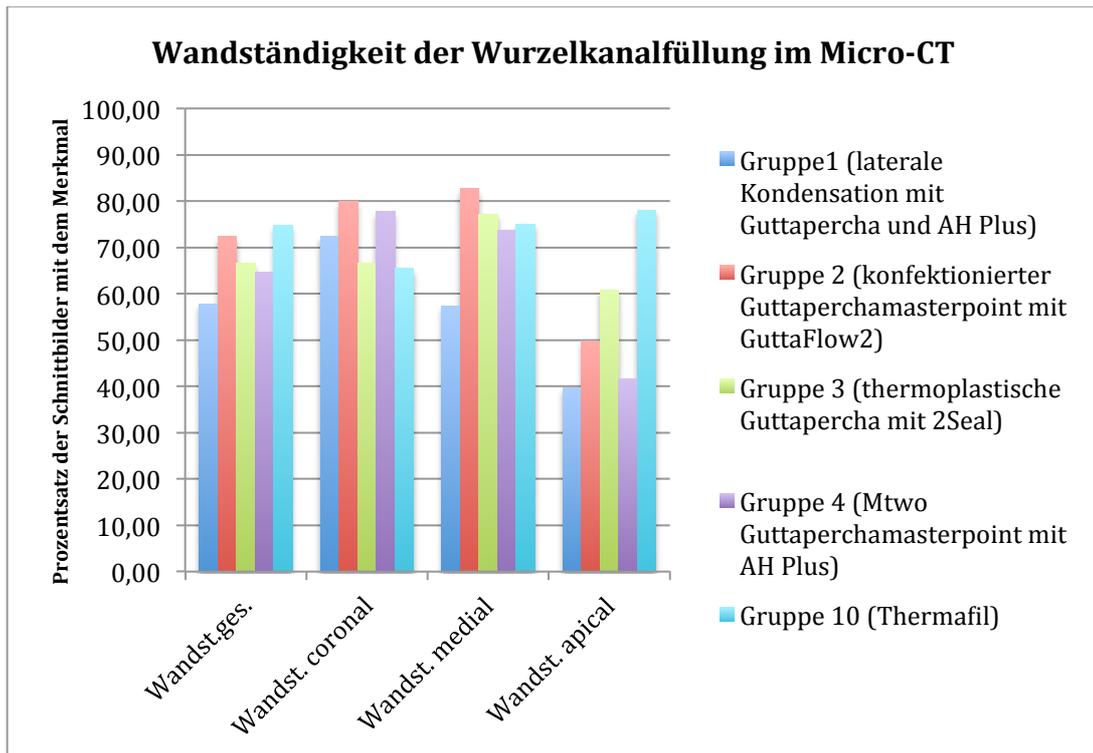
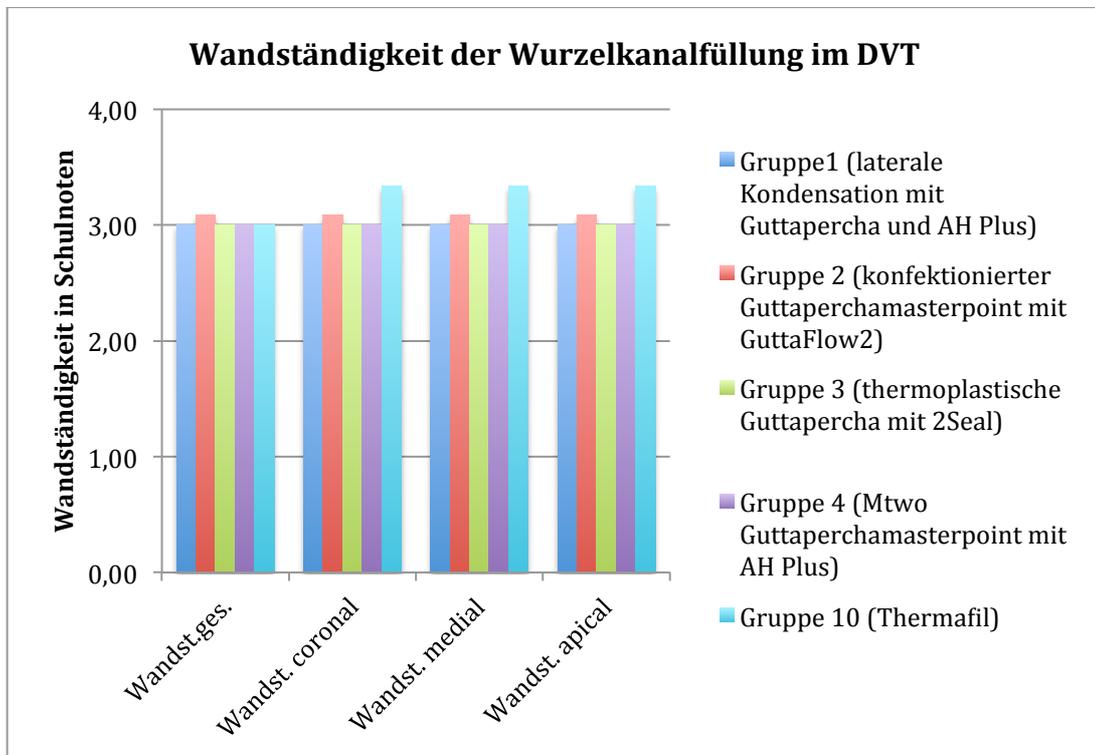


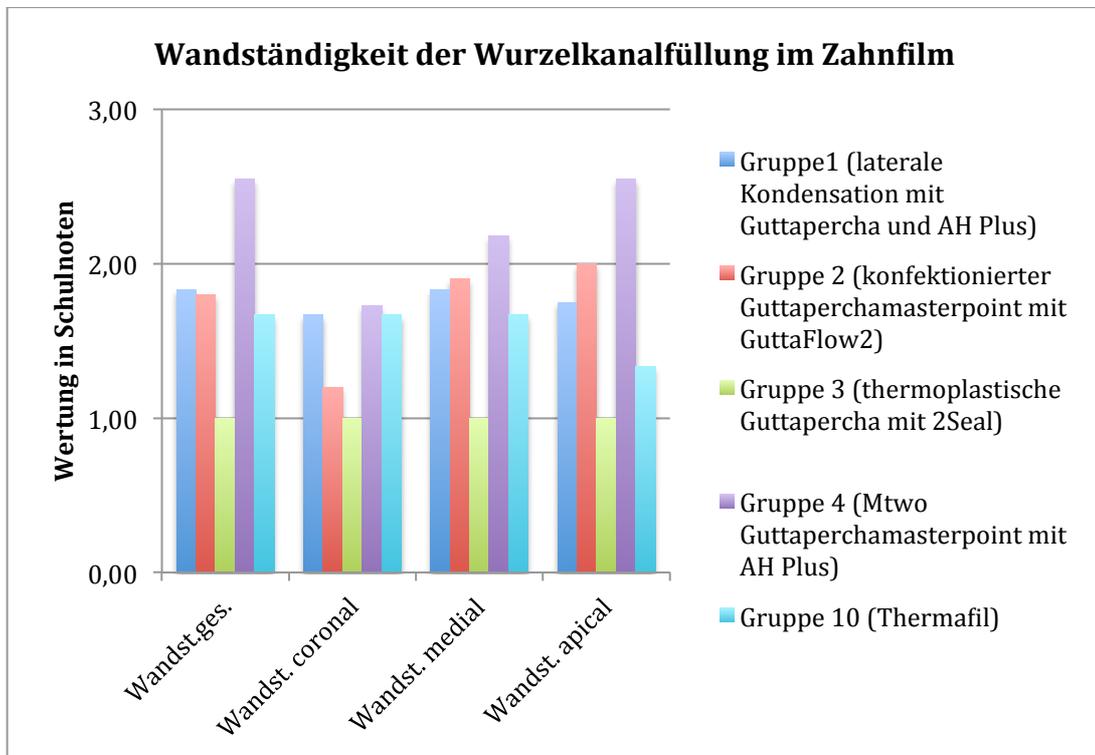
Abbildung 39: Im vorliegenden Diagramm ist die Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllungen in den Mikro-Computertomographie-Aufnahmen jeweils über die gesamte Länge des Wurzelkanals, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzel Drittel, für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Schnittbilder an, der im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen mit „wandständig“ bewertet wurde. Je höher der Prozentsatz desto wandständiger waren die Wurzelkanalfüllungen, die mit der jeweiligen Wurzelfülltechnik gefüllt wurden.

## 3.2.3.2 DVT



**Abbildung 40:** Im vorliegenden Diagramm ist die Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllungen in den Digitalen Volumentomographie-Aufnahmen jeweils über die gesamte Länge des Wurzelkanals, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzel Drittel, für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt die „Schulnote“ an, mit der die Wandständigkeit der Wurzelfüllungen im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen bewertet wurde. Je niedriger die „Schulnote“ desto wandständiger waren die Wurzelkanalfüllungen, die mit der jeweiligen Wurzelfülltechnik gefüllt wurden.

## 3.2.3.3 Zahnfilm



**Abbildung 41:** Im vorliegenden Diagramm ist die Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllungen im Zahnfilm jeweils über die gesamte Länge des Wurzelkanals, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzel Drittel, für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt die „Schulnote“ an, mit der die Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllungen im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen bewertet wurde. Je niedriger die „Schulnote“ desto wandständiger waren die Wurzelkanalfüllungen, die mit der jeweiligen Wurzelfülltechnik gefüllt wurden.

### 3.2.4 Beurteilbarkeit der Aufbereitung der Wurzelkanäle in den einzelnen bildgebenden Verfahren

#### 3.2.4.1 Mikro-CT

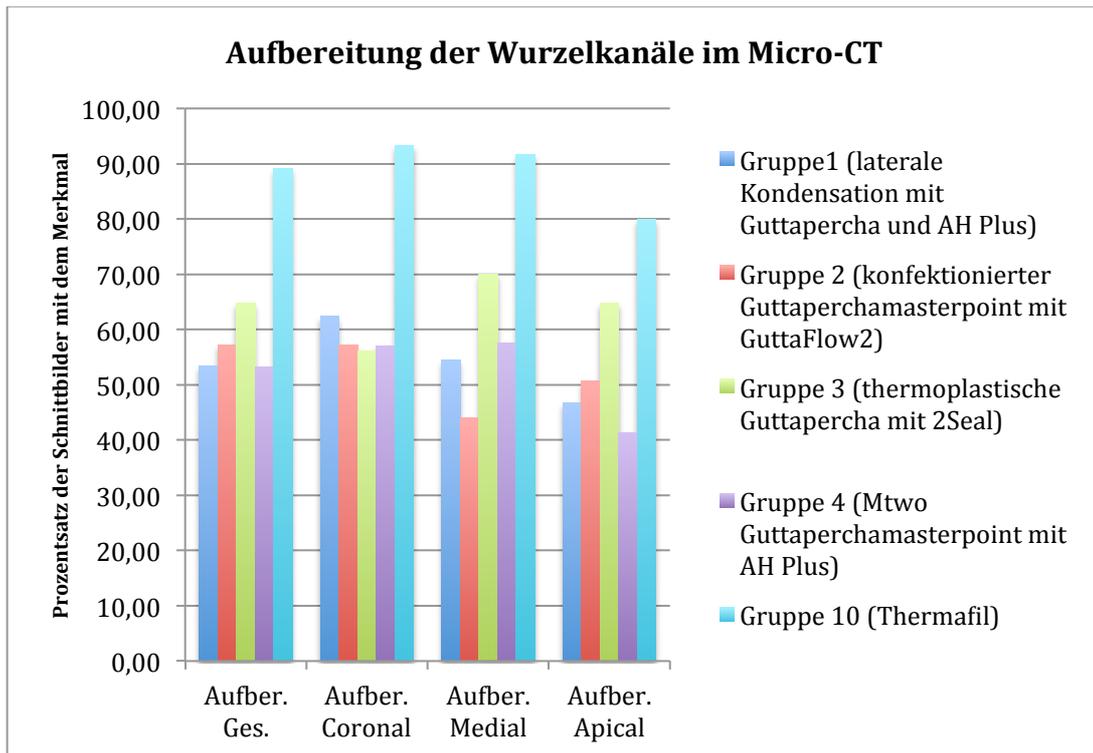


Abbildung 42: Im vorliegenden Diagramm ist die Aufbereitung der Wurzelkanäle in den Mikro-Computertomographie-Aufnahmen jeweils über die gesamte Länge des Wurzelkanals, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzel Drittel, für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Schnittbilder an, der im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen mit „ausreichend aufbereitet“ bewertet wurde. Je höher der Prozentsatz desto besser aufbereitet waren die Wurzelkanäle, die mit der jeweiligen Aufbereitungstechnik aufbereitet wurden.

3.2.4.2 DVT

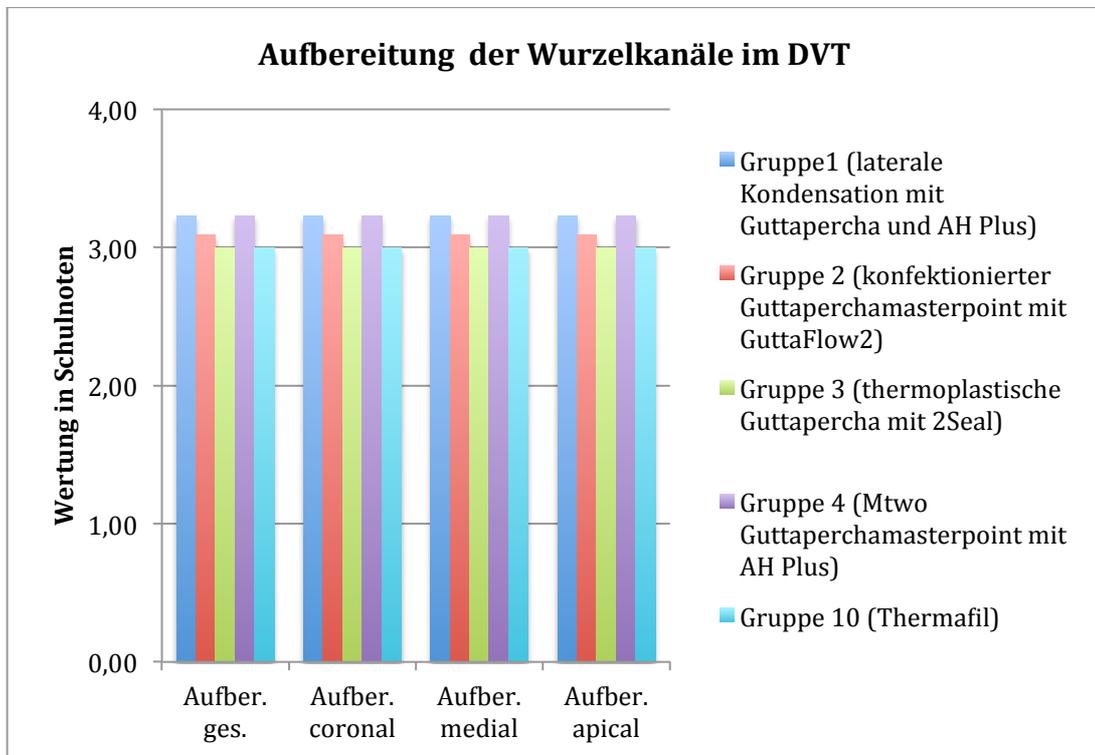


Abbildung 43: Im vorliegenden Diagramm ist die Aufbereitung der Wurzelkanäle in den Digitalen Volumentomographie-Aufnahmen jeweils über die gesamte Länge des Wurzelkanals, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzel Drittel, für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt die „Schulnote“ an, mit der die Aufbereitung der Wurzelkanäle im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen bewertet wurde. Je niedriger die „Schulnote“ desto besser aufbereitet waren die Wurzelkanäle, die mit der jeweiligen Aufbereitungstechnik aufbereitet wurden.

3.2.4.3 Zahnfilm

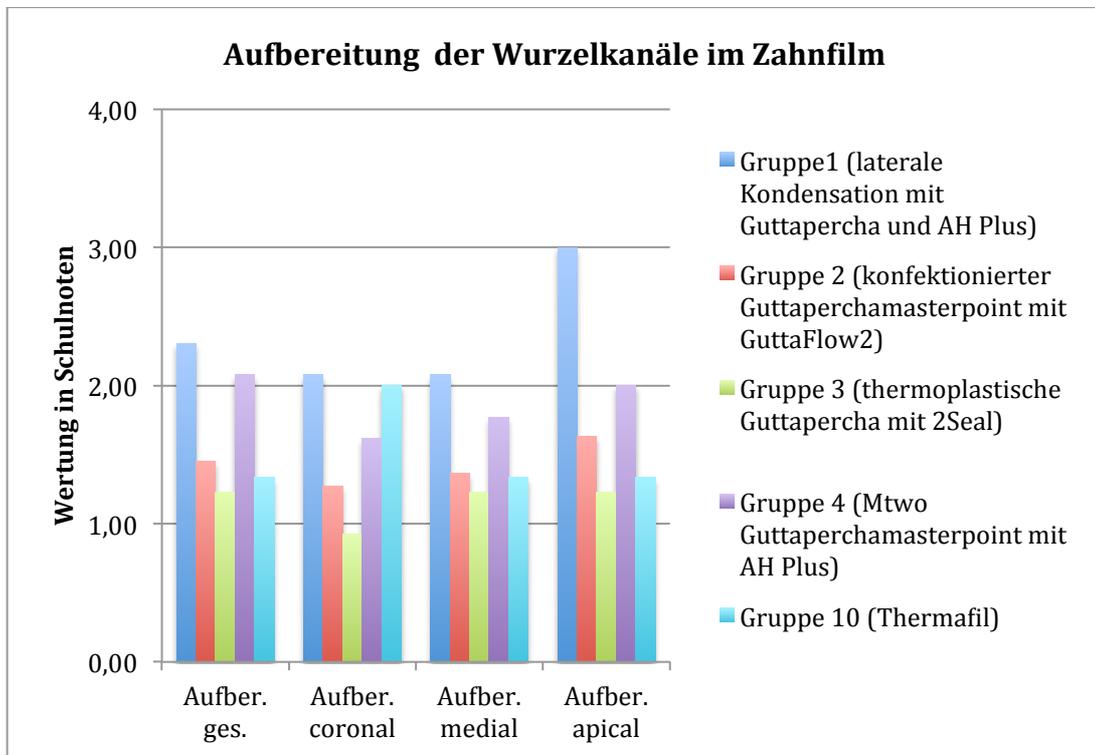
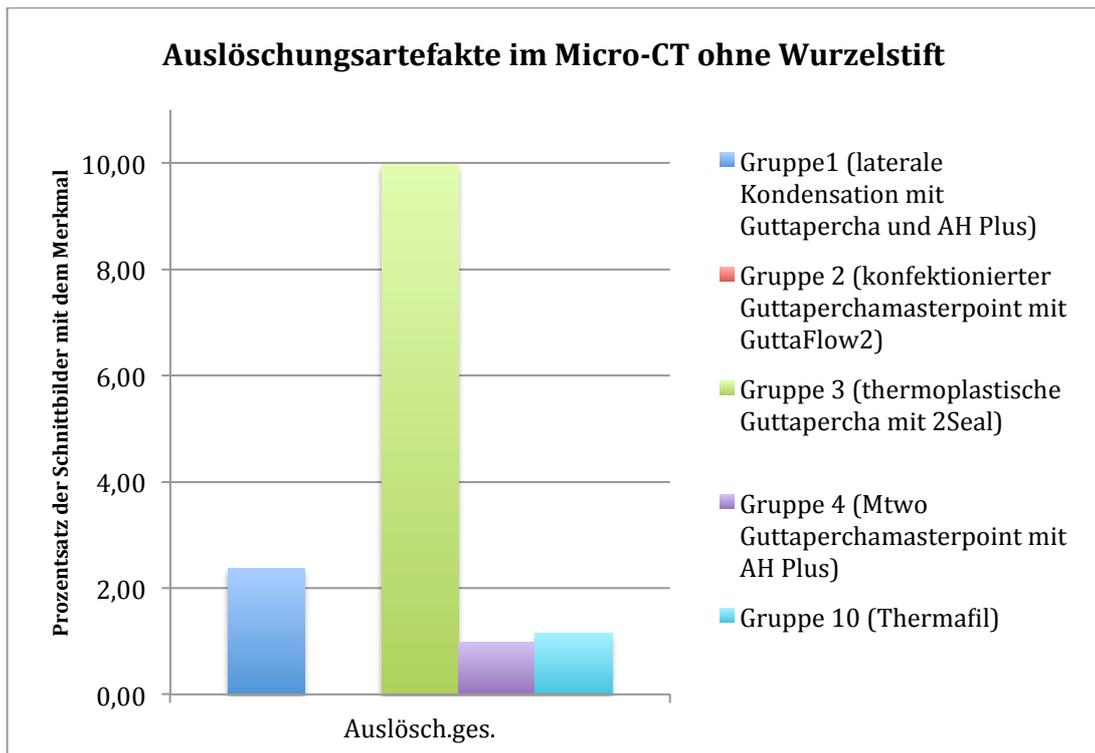


Abbildung 44: Im vorliegenden Diagramm ist die Aufbereitung der Wurzelkanäle im Zahnfilm jeweils über die gesamte Länge des Wurzelkanals, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzel Drittel, für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt die „Schulnote“ an, mit der die Aufbereitung der Wurzelkanäle im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen bewertet wurde. Je niedriger die „Schulnote“ desto besser aufbereitet waren die Wurzelkanäle, die mit der jeweiligen Aufbereitungstechnik aufbereitet wurden.

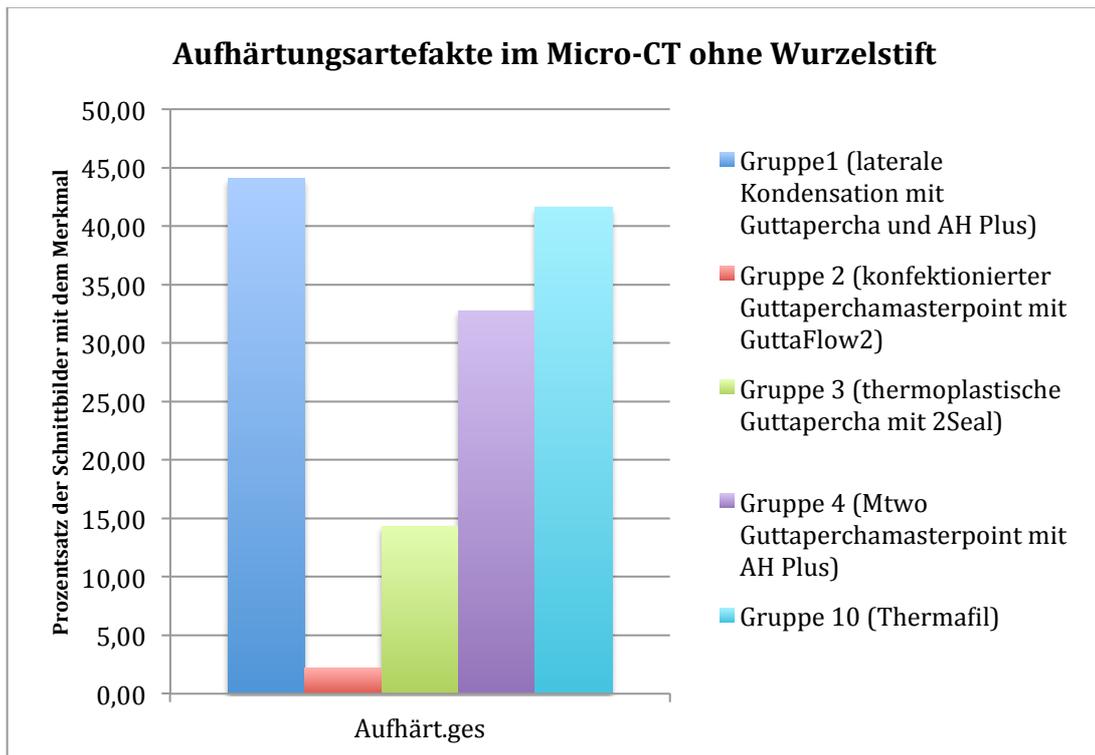
### 3.2.5 Artefakte in den einzelnen bildgebenden Verfahren

#### 3.2.5.1 Mikro-CT

##### 3.2.5.1.1 Zähne ohne Wurzelstift



**Abbildung 45:** Im vorliegenden Diagramm ist das Auftreten von Auslöschungsartefakten in den Mikro-Computertomographie-Aufnahmen über die gesamte Länge des Wurzelkanals für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Schnittbilder an, bei dem im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen ein Auslöschungsartefakt auftrat. Je höher der Prozentsatz desto mehr Auslöschungsartefakte traten bei den Wurzelkanälen, die mit der jeweiligen Aufbereitungstechnik aufbereitet wurden, auf.



**Abbildung 46:** Im vorliegenden Diagramm ist das Auftreten von Aufhärungsartefakten in den Mikro-Computertomographie-Aufnahmen über die gesamte Länge des Wurzelkanals für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Schnittbilder an, bei dem im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen ein Aufhärungsartefakt auftrat. Je höher der Prozentsatz desto mehr Aufhärungsartefakte traten bei den Wurzelkanälen, die mit der jeweiligen Aufbereitungstechnik aufbereitet wurden, auf.

3.2.5.1.2 Zähne mit Wurzelstift

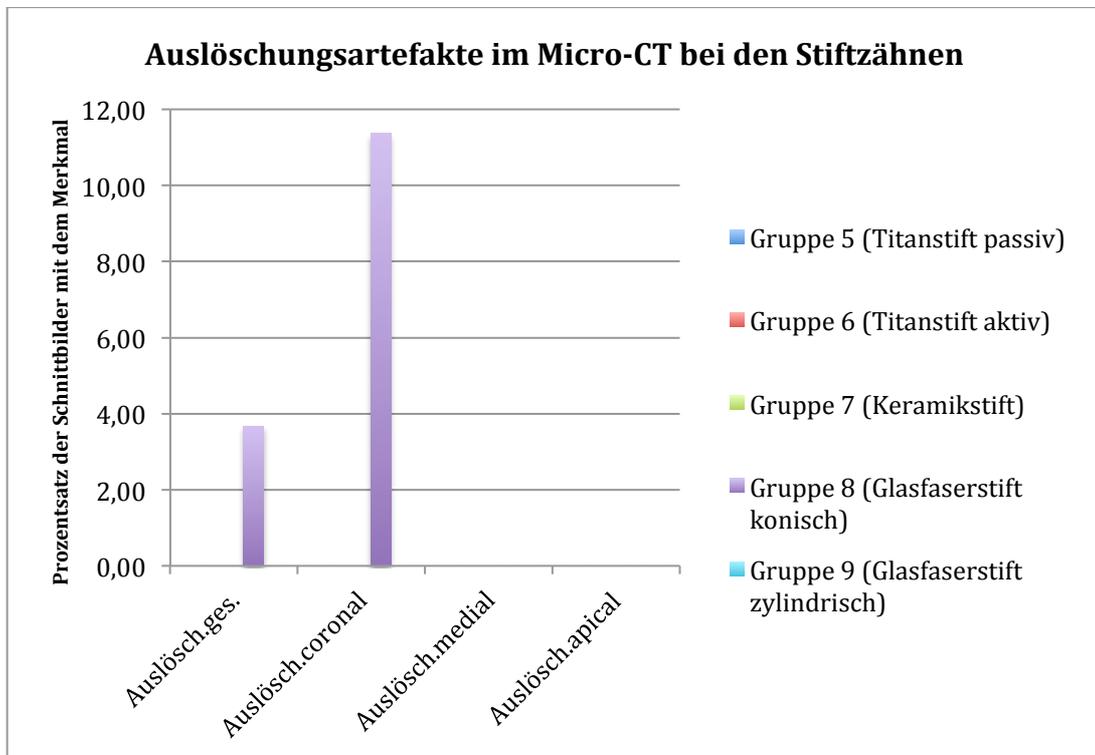
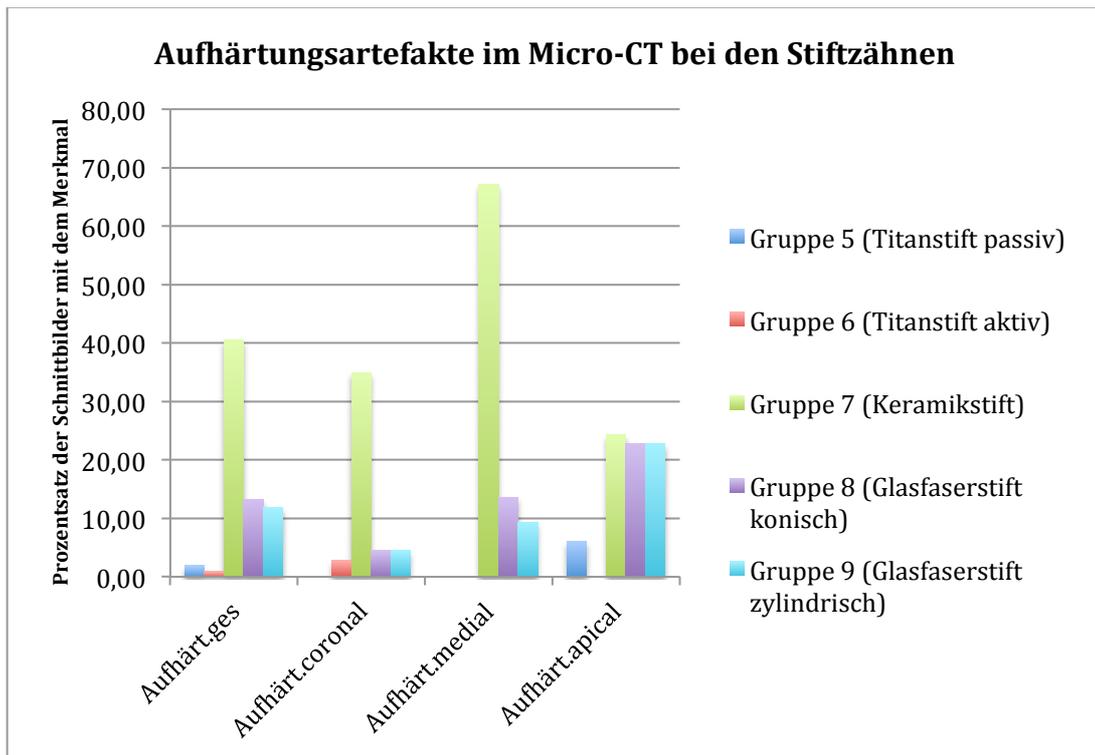


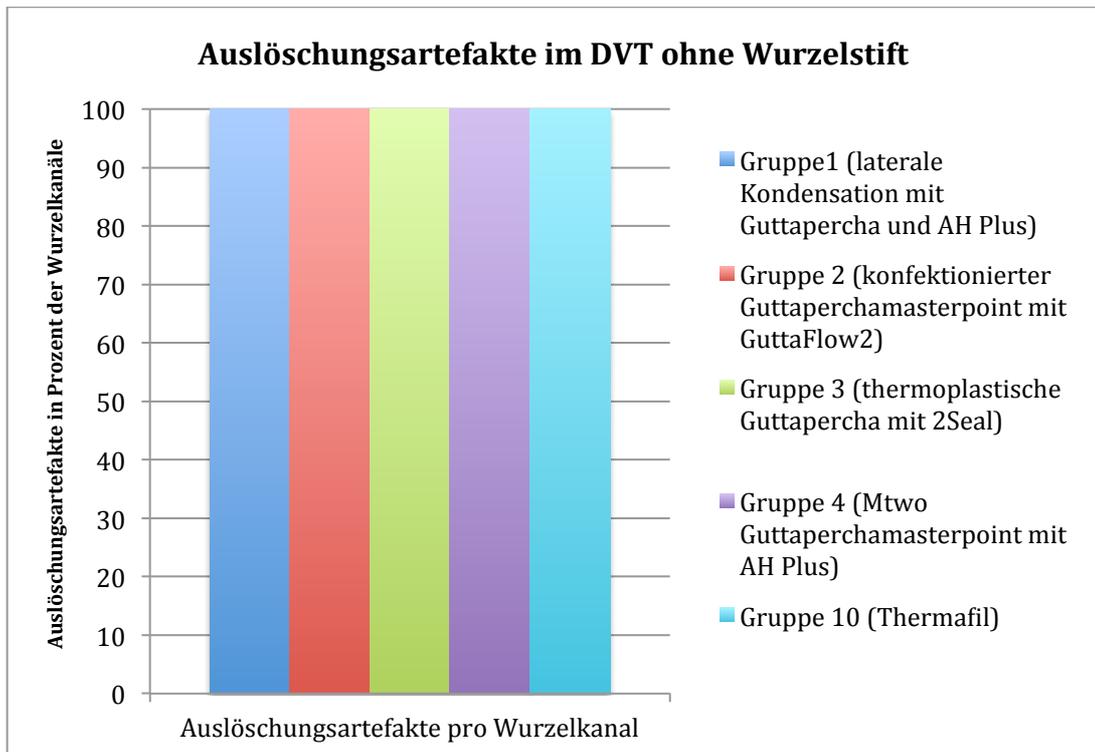
Abbildung 47: Im vorliegenden Diagramm ist das Auftreten von Auslöschungsartefakten in den Mikro-Computertomographie-Aufnahmen jeweils über die gesamte Länge, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzeltrittel des Wurzelkanals, für die Testgruppen 5 bis 9 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Schnittbilder an, bei dem im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen ein Auslöschungsartefakt auftrat. Je höher der Prozentsatz desto mehr Auslöschungsartefakte traten bei den Wurzelkanälen, die mit dem jeweiligen Wurzelkanalstift versorgt wurden, auf.



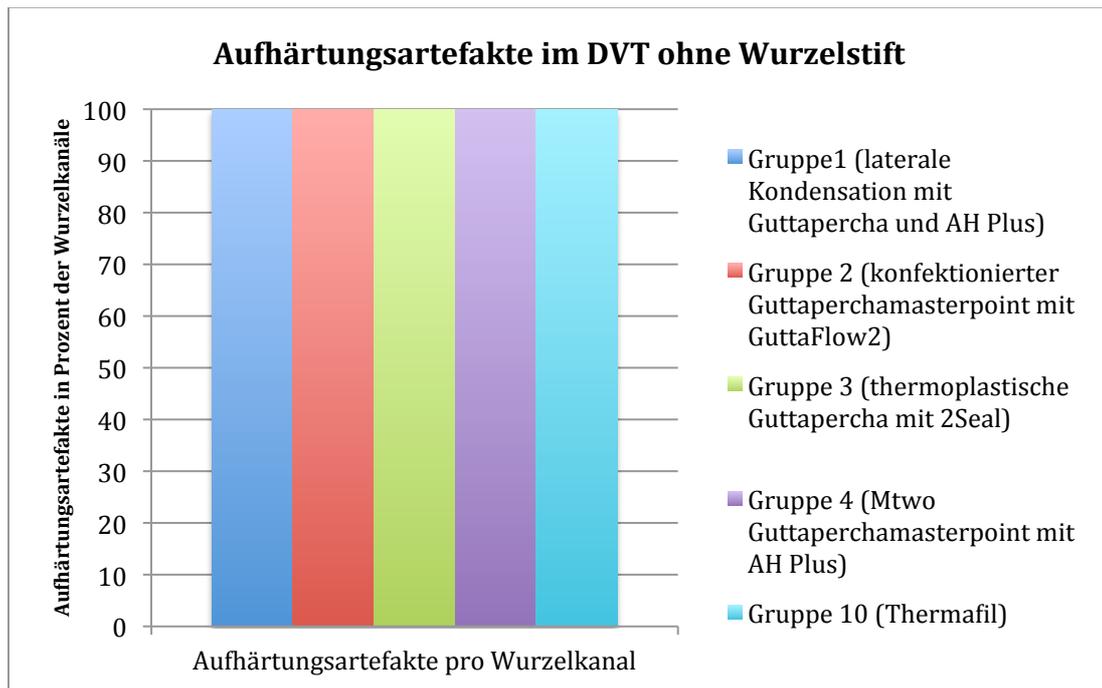
**Abbildung 48:** Im vorliegenden Diagramm ist das Auftreten von Aufhärungsartefakten in den Mikro-Computertomographie-Aufnahmen jeweils über die gesamte Länge, sowie im coronalen, medialen sowie apikalen Wurzeldrittel des Wurzelkanals, für die Testgruppen 5 bis 9 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Schnittbilder an, bei dem im Durchschnitt bei den einzelnen Gruppen ein Auslöschungsartefakt auftrat. Je höher der Prozentsatz desto mehr Auslöschungsartefakte traten bei den Wurzelkanälen, die mit dem jeweiligen Wurzelkanalstift versorgt wurden, auf.

## 3.2.5.2 DVT

### 3.2.5.2.1 Zähne ohne Wurzelstift

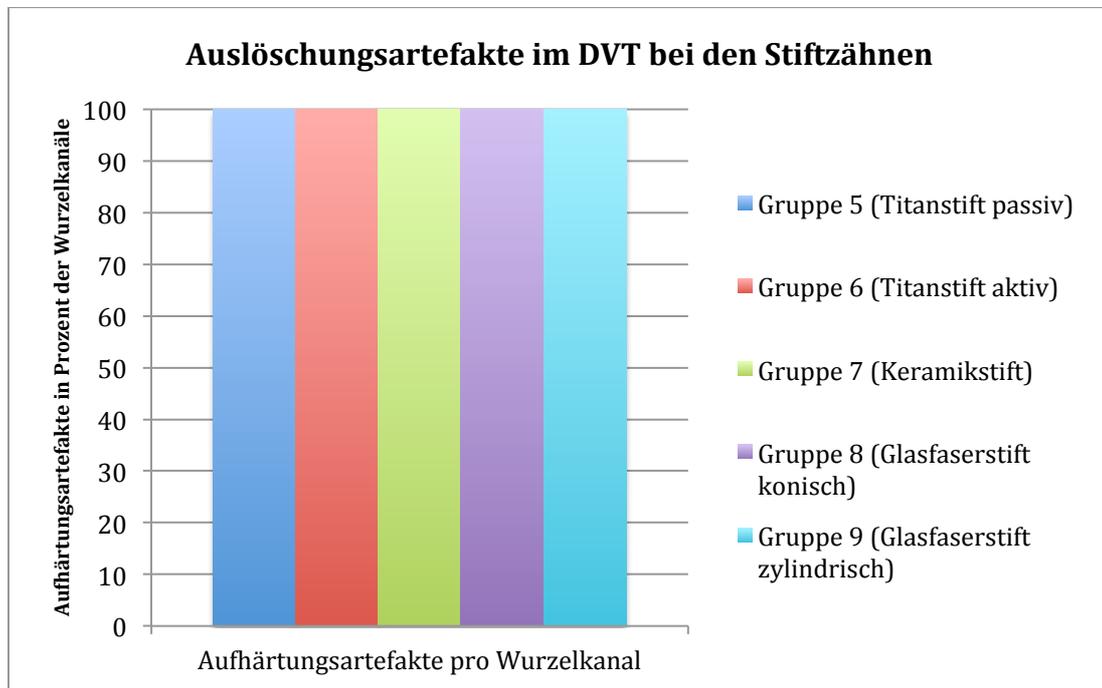


**Abbildung 49:** Im vorliegenden Diagramm ist das Auftreten von Auslöschungsartefakten in den Digitalen Volumentomographie-Aufnahmen pro Wurzelkanal für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Wurzelkanäle an, bei denen bei den einzelnen Gruppen ein Auslöschungsartefakt auftrat. Es traten also bei allen Techniken an allen Wurzelkanälen Auslöschungsartefakte auf.

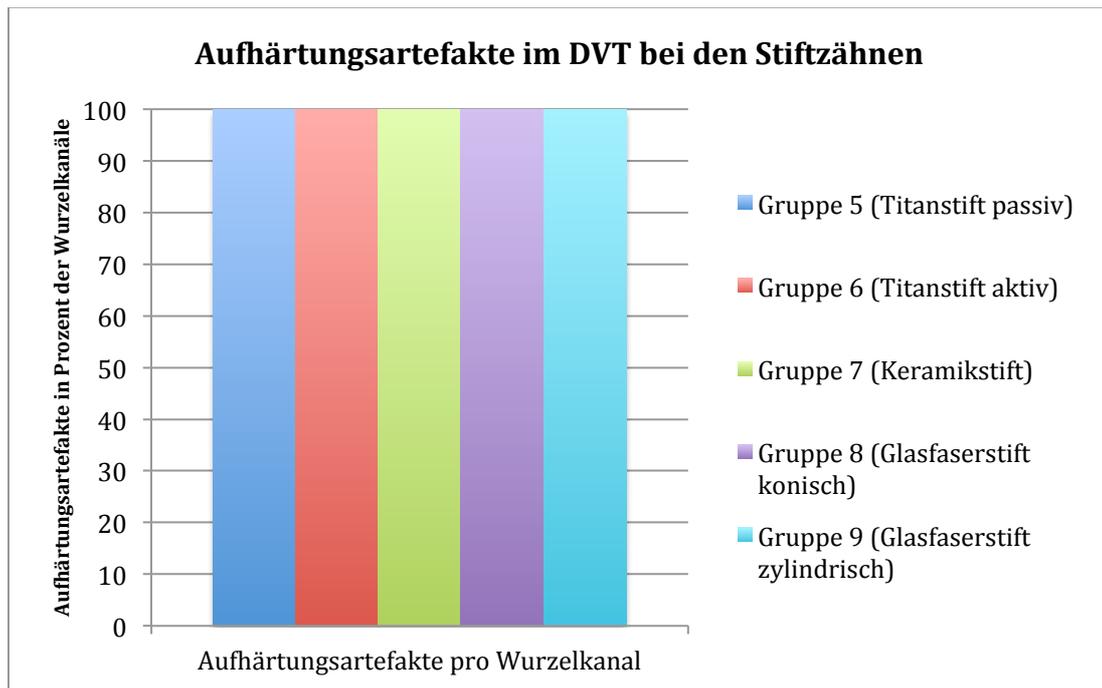


**Abbildung 50:** Im vorliegenden Diagramm ist das Auftreten von Aufhärungsartefakten in den Digitalen Volumentomographie-Aufnahmen pro Wurzelkanal für die Testgruppen 1 bis 4 und 10 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Wurzelkanäle an, bei denen bei den einzelnen Gruppen ein Aufhärungsartefakt auftrat. Es traten also bei allen Techniken an allen Wurzelkanälen Aufhärungsartefakte auf.

## 3.2.5.2.2 Zähne mit Wurzelstift



**Abbildung 51:** Im vorliegenden Diagramm ist das Auftreten von Auslöschungsartefakten in den Digitalen Volumentomographie-Aufnahmen pro Wurzelkanal für die Testgruppen 5 bis 9 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Wurzelkanäle an, bei denen bei den einzelnen Gruppen ein Auslöschungsartefakt auftrat. Es traten also bei allen Stiftsystemen an allen Wurzelkanälen Auslöschungsartefakte auf.



**Abbildung 52:** Im vorliegenden Diagramm ist das Auftreten von Aufhärtingsartefakten in den Digitalen Volumentomographie-Aufnahmen pro Wurzelkanal für die Testgruppen 5 bis 9 dargestellt. Die y-Achse gibt den Prozentsatz der Wurzelkanäle an, bei denen bei den einzelnen Gruppen ein Aufhärtingsartefakt auftrat. Es traten also bei allen Stiftsystemen an allen Wurzelkanälen Aufhärtingsartefakte auf.

### 3.2.5.3 Zahnfilm

Auf den Zahnfilmen waren keine Artefakte festzustellen.

---

### **3.2.6 Visualisierung und Beurteilbarkeit von Wurzelkanalinstrumentenbrüchen in den einzelnen bildgebenden Verfahren**

Tabelle 3: Übersicht über die Anzahl der in den einzelnen bildgebenden Verfahren erkennbaren Wurzelkanalinstrumentenbrüche.

<b>Instrumentenbrüche Insgesamt</b>	<b>Mikro-Computertomographie</b>	<b>Digitale Volumentomographie</b>	<b>Zahnfilm</b>
4	4	0	2

### **3.2.7 Visualisierung von Seitenkanälen in den einzelnen bildgebenden Verfahren**

Tabelle 4: Übersicht über die Anzahl der in den einzelnen bildgebenden Verfahren erkennbaren Seitenkanäle.

<b>Seitenkanäle Insgesamt</b>	<b>Mikro-Computertomographie</b>	<b>Digitale Volumentomographie</b>	<b>Zahnfilm</b>
30	30	0	3

### **3.2.8 Visualisierung von Frakturen und Rissen in den einzelnen bildgebenden Verfahren**

Tabelle 5: Übersicht über die Anzahl der in den einzelnen bildgebenden Verfahren erkennbaren Frakturen und Risse.

<b>Frakturen / Risse Insgesamt</b>	<b>Mikro-Computer- tomographie</b>	<b>Digitale Volumentomo- graphie</b>	<b>Zahnfilm</b>
10	10	0	0

### **3.3 *Checkliste zur Befundung und Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen mittels bildgebender Verfahren***

Die in der Abbildung 53 und Abbildung 54 abgebildete „Checkliste“ zur Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen mittels bildgebender Verfahren ist ebenfalls ein Ergebnis dieser Arbeit.

Patient / Zahn: \_\_\_\_\_

Datensatz / Dateiname: \_\_\_\_\_

Bildgebendes Verfahren: \_\_\_\_\_

Befunder: \_\_\_\_\_

Aufbereitungsart: \_\_\_\_\_

Fülltechnik / Stift: \_\_\_\_\_

Sonstiges \_\_\_\_\_

**Datum:** \_\_\_\_\_

**Anatomie:**

Kanalmorphologie / Schwierigkeitsgrad 1 gerade (gut/einfach) 2 mäßig gekrümmt (mittel/erschwert) 3 stark gekrümmt (schlecht/schwer)	Kanalbezeichnung				
	coronales Drittel				
	mittleres Drittel				
	apicales Drittel				

Seitenkanal/-kanäle Ja / nein	coronales Drittel				
	mittleres Drittel				
	apicales Drittel				

Freitext: \_\_\_\_\_

**Aufbereitung:**

Aufbereitung ausreichend 1 - 2 - 3 (gut - mittel - schlecht)	coronales Drittel				
	mittleres Drittel				
	apicales Drittel				

Instrumentenbruch Ja / Nein	coronales Drittel				
	mittleres Drittel				
	apicales Drittel				

Frakturen / Risse Ja / Nein	quer				
	längs				

Freitext: \_\_\_\_\_

**Füllung:**

Länge (1mm vor phys. Apex (+) zu kurz (<) zu lang (>))					

Wandständigkeit 1 - 2 - 3 (gut - mittel - schlecht)	coronales Drittel				
	mittleres Drittel				
	apicales Drittel				

Homogenität 1 - 2 - 3 (gut - mittel - schlecht)	coronales Drittel				
	mittleres Drittel				
	apicales Drittel				

Freitext: \_\_\_\_\_

Abbildung 53: Vorschlag einer „Checkliste“ zur Befundung und Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen mittels bildgebender Verfahren für den praktisch tätigen Zahnarzt.  
Seite 1 von 2.

**Wurzelkanalstift:**

Länge bis ans apicale Wurzel Drittel (+) zu kurz (-) zu lang (>)						
Wandständigkeit des Zements 1 - 2 - 3 (gut - mittel - schlecht)	coronales Drittel					
	mittleres Drittel					
	apicales Drittel					
Homogenität des Zements 1 - 2 - 3 (gut - mittel - schlecht)	coronales Drittel					
	mittleres Drittel					
	apicales Drittel					
Neigung / Achse	im Wurzelkanal (+) aus Wurzelkanalachse(-)					
Perforation Ja / nein	coronales Drittel					
	mittleres Drittel					
	apicales Drittel					

Freitext: \_\_\_\_\_

**Sonstiges:**

Artefakte Ja / nein	coronales Drittel					
	mittleres Drittel					
	apicales Drittel					

Freitext: \_\_\_\_\_

Notizen: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Abbildung 54: Vorschlag einer „Checkliste“ zur Befundung und Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen mittels bildgebender Verfahren für den praktisch tätigen Zahnarzt.  
Seite 2 von 2.

## **4 Diskussion**

### **4.1 Methodenkritik**

Bei dieser Arbeit handelt es sich um eine In-Vitro-Studie an extrahierten Zähnen. Sämtliche Bildgebung wurde demnach ohne das die Zähne sonst umgebende Hart- und Weichgewebe durchgeführt. Eine mögliche Beeinflussung der Bildgebung durch diese Strukturen wurde nicht untersucht.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei der Gegenüberstellung der einzelnen bildgebenden Verfahren mit Hilfe von Abbildungen immer nur vergleichbare Bildausschnitte gewählt werden konnten und nie der exakt gleiche. Dies lag an der Tatsache, dass zur Befundung der einzelnen Aufnahmen unterschiedliche Software mit einem unterschiedlichen Funktionsumfang eingesetzt werden musste, da speziell bei den DVT-Aufnahmen lediglich die herstellereigene Software offiziell vom Hersteller zur Befundung freigegeben wurde. Bei dieser gab es keine Möglichkeit zur Darstellung der einzelnen Wurzelkanäle in der Curved-MPR-Darstellung. Diese Darstellungsweise war jedoch, nach Meinung des Autors dieser Arbeit, besonders aussagekräftig zur Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen mittels bildgebender Verfahren.

Eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse hätte eventuell erzielt werden können, wenn ein einheitliches Bewertungssystem zur Beurteilung der Qualität der Wurzelkanalfüllungen angewandt worden wäre. Das heißt die Mikro-CT-, die DVT- und die Zahnfilm-Aufnahmen hätten alle mit dem gleichen „Schulnoten-System“ bewertet werden sollen. Bei den Mikro-CT-Aufnahmen wurde jedoch das im Material- und Methodenteil beschriebene Bewertungssystem gewählt, um eine bessere Vergleichbarkeit mit in der Literatur beschriebenen Bewertungssystemen zu ermöglichen [29,44].

### **4.1.1 Mikro-CT**

Die Bewertung der „Länge“ der Wurzelkanalfüllungen im Mikro-CT wurde anhand der axialen Schnittbilder vorgenommen. Da diese aber, wie im Material- und Methodenteil beschrieben, jeweils im Abstand von 0,5 mm gemacht wurden, ist hier mit einer Ungenauigkeit von mindestens 0,5 mm zu rechnen. Aus diesem Grund könnten auch kleinste Seitenkanäle oder Risse übersehen oder auch mehrfach gezählt worden sein.

### **4.1.2 MRT**

Um eine Darstellung der unterschiedlichen Zahnstrukturen erzielen zu können, hätten die Proben mit anderen MRT-Aufnahmesequenzen wie zum Beispiel der UTE-Sequenz gescannt werden müssen. Ob dadurch eine bewertbare Darstellung von Wurzelkanalfüllungen erzielt werden kann, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

### **4.1.3 DVT**

Es wurden nur Aufnahmen mit einem Gerät eines einzelnen Herstellers gemacht. Es kann also nur eine Aussage zur Qualität der Bildgebung von wurzelbehandelten Zähnen mittels DVT bei Aufnahmen dieses spezifischen Gerätes gemacht werden.

### **4.1.4 Zahnfilm**

Die Zähne wurden alle nur orthoradial geröntgt. Eine eventuell mesial- oder distal-exzentrische Aufnahme [12] hätte eventuell einen in der orthoradialen Aufnahme verborgenen weiteren Wurzelkanal zeigen können. Ebenso kann es bei nicht korrekt angewandter „Parallel-Technik“ zu einer „Verfälschung“ der Wurzellänge und somit zur falschen Einschätzung der Länge der Wurzelkanalfüllung kommen [12]. Außerdem kann, wie in Abbildung 29 gezeigt wurde, verfahrensbedingt der physiologische Apex nicht immer eindeutig dargestellt werden. Somit wird eine exakte Bestimmung der „korrekten“ Länge der Wurzelkanalfüllung immer schwierig bleiben. Hier fehlt einfach die 3. Dimension.

### **4.2 *Besprechung und Diskussion der Ergebnisse***

#### **4.2.1 Mikro-CT**

Bei den in dieser Arbeit untersuchten bildgebenden Verfahren hat sich das Mikro-CT durch seine hohe Detailauflösung und geringe Artefaktbildung objektiv als das genaueste erwiesen. Diese Technik wurde in der Literatur bereits mehrfach beschrieben, um Zähne und im Speziellen deren Wurzelkanalfüllungen zu untersuchen [22,29,30,43,44].

Lediglich die eindeutige Identifizierung von frakturierten Wurzelkanalinstrumenten stellte sich bei dieser bildgebenden Technik nicht immer als ausreichend verlässlich dar.

##### **4.2.1.1 Vergleichende Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen und Techniken zwischen den einzelnen Gruppen**

Eine Aussage darüber welche Aufbereitungs- und Wurzelfülltechnik die besten Resultate erzielt, ist mit größter Vorsicht zu treffen. Die vorliegenden Untersuchungen lassen jedoch den Schluss zu, dass sich aus den Ergebnissen eine Tendenz ableiten lässt. Der Versuchsaufbau war dazu nicht ausgelegt. Dies erkennt man schon an der Einteilung der Gruppen. Die Thermafil-Gruppe hätte, da sie ja kein Stift-System sondern eine Wurzelfülltechnik darstellt, sinnvollerweise den ersten vier Gruppen zugeordnet werden sollen. Außerdem waren die Aufbereitungsprotokolle der beiden Doktoranden S. Walker und A. Walter [47,48] nicht einheitlich. Nicht zuletzt sollte bei der Durchführung einer Studie mit dieser Fragestellung auch die zu untersuchenden Wurzelkanäle „normiert“ werden um vergleichbare Bedingungen zu schaffen. Dieser Fragestellung wurde schon konsequenter in bereits vorliegenden Untersuchungen nachgegangen. M. Hammad et al., L. Moeller et al., J. M. Silva-Filho et al. und F. Somma et al. kamen alle mit ihren vergleichenden Untersuchungen unterschiedlicher Wurzelfülltechniken mittels Mikro-CT zusammenfassend zu dem Schluss, dass alle Techniken ähnliche Resultate her-

vorbringen, und die Ergebnisse letztlich statistisch nicht signifikant sind [22,29,43,44].

### **4.2.2 MRT**

Die Magnetresonanztomographie hat sich zur Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen erwartungsgemäß nicht bewährt. Mit dieser Technik konnten keine Wurzelkanalfüllungen dargestellt werden und somit konnte auch keine Aussage über deren Qualität getroffen werden. Allerdings kam es auch nicht zu einer Häufung von Artefakten wie man speziell bei den teils metallischen Wurzelstiften hätte erwarten können.

F. Shafiei et al. zeigten in ihrer Studie „Artifacts from dental casting alloys in magnetic resonance imaging“ bereits im Jahr 2003, dass auch das nicht-ferromagnetische Titan im MRT starke Artefakte erzeugen kann [42]. Dies könnte die Artefaktbildung an den Zähnen mit abgebrochenen Wurzelkanalinstrumenten erklären, da diese Instrumente teils aus einer Nickel-Titan-Legierung bestehen. Dagegen spricht jedoch, dass bei den mit Titanstiften versorgten Zähnen lediglich an einer Probe ein Artefakt festgestellt wurde.

Leider wurde in den Arbeiten von A. Walter [48] und S. Walker [47] keine Angabe dazu gemacht, welches Wurzelkanalinstrument in den Zähnen frakturierte. Da auch Edelstahl-Feilen verwendet wurden [47,48], könnte auch das darin enthaltene Eisen der Grund für die Artefakte sein. F. Schick führte in seinem Artikel: „Grundlagen der Magnetresonanztomographie“ insbesondere Eisen als potentielle Störquelle des Magnetfeldes und somit Artefaktursache bei der MRT auf [37]. Die Untersuchungen von O. Tymofiyeva et al. haben jüngst gezeigt, dass selbst zahnärztliche Materialien, die auf den ersten Blick nicht metallisch oder magnetisch sind, wie zum Beispiel Komposite, im MRT vereinzelt Artefakte verursachen können. Sie kommen aber zu dem Schluss, dass auf Harz basierende Wurzelkanalsealer und Guttapercha im Untersuchungsgebiet bezüglich der Artefaktanfälligkeit unbedenklich sind [45]. Diese Aussage lässt sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit vereinbaren.

Warum lediglich an einer Probe mit Keramikstift ein Artefakt auftrat, an den übrigen Proben mit Keramikstift jedoch nicht, lies sich nicht abschließend klären. Eine mögliche Ursache, wie zum Beispiel ein frakturiertes Wurzelkanalinstrument, war in keinem der übrigen bildgebenden Verfahren nachzuweisen.

### **4.2.3 DVT**

Wie bereits in der Einleitung angeführt, ist die Digitale Volumentomographie mit der Computertomographie und somit auch mit der Mikro-Computertomographie verfahrensbedingt in gewisser Weise durchaus vergleichbar. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Digitale Volumentomographie deutlich ungenauere und auch artefaktanfälligere Bilder produziert. Es besteht demnach scheinbar noch ein Nachholbedarf bei dieser im Vergleich zur Computertomographie jungen Technik. Von Seiten der Industrie muss hier noch weiter entwickelt, verbessert und geforscht werden. Zum jetzigen Zeitpunkt kann auf Grund der Ergebnisse dieser Arbeit keine Empfehlung zur standardisierten Anwendung dieser Technik für die radiologische Beurteilung der Qualität einer Wurzelkanalfüllung gegeben werden. In der im Oktober 2013 erschienenen „s2k-Leitlinie Dentale digitale Volumentomographie“ der DGZMK [7] wird unter Punkt 7.5 Endodontie beschrieben, dass die „Beurteilung der Qualität von eingebrachten Wurzelfüllungen“ [8] eine rechtfertigende Indikation für eine DVT darstelle. Diese Aussage steht nicht im Einklang mit den Ergebnissen dieser Arbeit. Zugegebenermaßen basieren diese Ergebnisse nur auf den Aufnahmen des in dieser Dissertation verwendeten Digitalen Volumentomographen der Firma „Planmeca“. Es bleibt demnach zu untersuchen und zu diskutieren, ob Geräte anderer Hersteller aussagekräftigere Aufnahmen produzieren.

### **4.2.4 Zahnfilm**

Der Zahnfilm vermittelte bei der Suche nach frakturierten Wurzelkanalinstrumenten den Eindruck der größten Sicherheit. Dies kann aber auch daran liegen, dass das trainierte Auge eines praktischen Zahnarztes mit dieser „Standardtechnik“ am besten vertraut ist.

Selbst der eine oder andere Seitenkanal ließ sich mit dieser Technik „aufspüren“. Allerdings nur wenn diese mit Wurzelfüllmaterial ausgeflossen waren. Längsrisse hingegen wurden ebenfalls nicht detektiert, was jedoch der fehlenden zweiten Ebene geschuldet werden muss und teilweise auch vom Spaltmaß des Risses abhängen kann.

Beer et al. geben in ihrem Buch „Taschenatlas der Endodontie“ an, dass bei klassischen Zahnfilmaufnahmen die Arbeitslänge bei Wurzelkanalbehandlungen nur in 75% der Fälle korrekt bestimmt wird [2]. 45% der radiologisch kurz vor dem Apex liegenden Wurzelkanalinstrumente sollen in Wirklichkeit über das Foramen apicale hinausragen [2]. Diese Röntgenmesstechnik stelle demnach nur eine Annäherung an das physiologische Foramen dar [2].

Unter diesem Gesichtspunkt scheint eine genauere röntgenologische Messtechnik wünschenswert.

### **4.3 Aspekt Strahlenschutz**

Bei einer medizinischen Strahlenexposition muss der gesundheitliche und therapeutische Nutzen klar die eventuell durch diese Strahlenexposition verursachte Schädigung überwiegen. Dieser Grundsatz ist mit der Stellung der „rechtfertigenden Indikation“ in § 2a der Röntgenverordnung geregelt [5]. Ferner soll in § 2c eine unnötige Strahlenexposition vermieden und die benötigte Strahlendosis so gering wie möglich gehalten werden [5,39]. Damit ist das ALARA-Prinzip „As Low As Reasonably Achievable“, wie von der International Commission On Radiological Protection (ICRP) gefordert, auch gesetzlich festgelegt [5].

Vor diesem Hintergrund muss die Anwendung und der Nutzen von Digitalen Volumentomographen zur Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen zum heutigen Zeitpunkt genauestens hinterfragt und diskutiert werden.

Die Möglichkeit in der Bildgebung auch ohne ionisierende und somit potentiell schädliche Strahlung auszukommen, macht die Magnetresonanztomographie als „Technik der Zukunft“ besonders interessant.

### **4.4 Welchen Mehrwert bietet ein 3D-Bild?**

Der Wunsch der Zahnärzte und speziell der Endontologen nach immer besseren und genaueren bildgebenden Verfahren nahm in den letzten Jahren mit der Erkenntnis, dass ein zweidimensionales Bild zu wenig ist, immer mehr zu. Inwiefern die dreidimensionalen Zusatzinformationen einen diagnostischen Vorteil und somit einen therapeutischen Nutzen bringen, ist nach heutigem Stand der Literatur jedoch nicht bewiesen [7].

Dass die dritte Dimension einen Mehrwert bieten kann, haben die Ergebnisse dieser Untersuchung gezeigt. Allerdings wurde auch ersichtlich, dass das Detailauflösungsvermögen eine entscheidende Rolle bei der korrekten Befundung spielt. Viele Hersteller preisen daher immer ausgereifere Geräte zur dreidimensionalen Bildgebung an. Der Anwender muss sich bei deren Verwendung aber im Klaren sein, dass er es immer mit einem „Abbild“ beziehungsweise mit einer „Rekonstruktion“ der Realität zu tun hat. Wenn sich eine Struktur im Bild auf eine gewisse Art und Weise oder auch gar nicht zeigt, heißt das noch lange nicht, dass dies auch der Realität entspricht. Ein Bild, auch wenn sich in ihm die dritte Dimension erschließt, kann den unbedarften Praktiker auch in einer trügerischen Sicherheit wiegen und somit zu Fehlinterpretationen und falschen Diagnosen führen.

### **4.5 Qualitätssicherung**

Die Qualität einer Wurzelkanalfüllung sollte direkt im Anschluss an die Füllung radiologisch überprüft werden. Dazu können auch mehrere Aufnahmen aus unterschiedlichen Projektionen notwendig sein [9,17]. Um von einer „erfolgreichen“ Wurzelkanalbehandlung sprechen zu können, wird in der Literatur mehrheitlich eine Verlaufskontrolle über vier bis fünf Jahre gefordert [9,10,17]. Die gesamte Behandlung und deren Verlauf sollte dokumentiert werden. Dies ermöglicht ande-

ren Behandlern bei Bedarf die Behandlung nachvollziehen und weiterführen zu können [17].

Die in dieser Arbeit entwickelte Checkliste zur Befundung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen mittels bildgebender Verfahren kann dazu beitragen eine einheitliche Befundungsqualität von Wurzelkanalfüllungen in bildgebenden Verfahren sicherzustellen.

### **4.6 Schlussfolgerung**

Abschließend lässt sich aus der vorliegenden Arbeit Folgendes ableiten:

Die Mikro-Computertomographie bietet eine beeindruckende Detailauflösung, eignet sich aber auf Grund der langen Scandauer und nicht zuletzt aus der daraus resultierenden hohen Strahlenbelastung nicht für den Einsatz am Patienten. Diese Technik bleibt somit der Forschung vorbehalten.

Die Magnetresonanztomographie hat bereits gezeigt, dass sie als komplett strahlungsfreies Verfahren eine interessante Alternative zu röntgenologischen Verfahren bieten kann. Ihre begrenzte Fähigkeit der Darstellung von Hartgeweben sowie ihre Artefaktanfälligkeit bei der Darstellung von zahnärztlichen Materialien hat jedoch die Anwendung im dentalen Bereich weitestgehend verhindert. Neuere Techniken, wie beispielsweise die UTE-MRT, lassen jedoch auf eine zukünftige Anwendbarkeit in der Zahnmedizin hoffen. Die damit einhergehenden relativ hohen technischen und finanziellen Voraussetzungen sowie die langen Scanzeiten stellen derzeit Hindernisse dar, die noch überwunden werden müssen. Wie die neuesten Untersuchungen in diesem Bereich zeigen, bedarf es außerdem zahnmedizinischer und zahntechnischer Materialien, die sich für die artefaktfreie Darstellung mittels Magnetresonanztomographie eignen [45].

Die Digitale Volumentomographie eignet sich, basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit, zum jetzigen Zeitpunkt nicht als standardisiertes Verfahren zur Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen. Bei einer deutlich höheren Strahlenbelastung einer DVT-Aufnahme im Vergleich zu einem digitalen Zahnfilm [21] ist die erzielte Ortsauflösung beim DVT zudem ungefähr um eine Zehnerpotenz niedriger als bei einem Zahnfilm [7].

Anders als in der „s2k-Leitlinie Dentale digitale Volumentomographie“ der DGZMK [7] postuliert, konnten die Untersuchungen dieser Arbeit nicht belegen, dass sich die DVT zur besseren Beurteilung der Homogenität von Wurzelkanalfüllungen oder zur sichereren Identifikation von frakturierten Wurzelkanalinstrumenten eignet. Gemäß dem ALARA-Prinzip der ICRP sollte daher die rechtfertigende Indikation für eine DVT-Aufnahme bei entsprechenden Fragestellungen mit Bedacht gestellt werden.

Nach den vorliegenden Ergebnissen eignet sich der Zahnfilm, zumindest nach aktuellem Stand der Technik, durch sein günstiges Verhältnis von Strahlenbelastung zu Detailschärfe, seiner Verlässlichkeit und nicht zuletzt auf Grund seiner Wirtschaftlichkeit, nach wie vor als „Goldstandard“ zur Beurteilung der Qualität einer Wurzelkanalfüllung. Die Möglichkeit der Anfertigung weiterer distal- oder mesial-exzentrischer Aufnahmen kann hierbei unter Umständen das Manko der fehlenden dritten Dimension zumindest teilweise relativieren.

### 5 Zusammenfassung

In der modernen Zahnmedizin haben sich bis heute unterschiedliche bildgebende Verfahren etabliert. Das am häufigsten verwendete bildgebende Verfahren stellt dabei aber immer noch der Zahnfilm dar. Dieser ermöglicht allerdings lediglich eine zweidimensionale Darstellung der vorliegenden anatomischen Strukturen. Aus diesem Grund gewinnen moderne Verfahren wie die Digitale Volumentomographie immer mehr an Bedeutung. Speziell in der Endodontie, einem Teilgebiet der Zahnmedizin, ist der moderne Behandler auf eine exakte dreidimensionale Darstellung des komplexen und zugleich höchst filigranen Wurzelkanalsystems angewiesen. Für den langfristigen Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung spielt neben dem Auffinden sowie der ausreichenden Aufbereitung und Desinfektion sämtlicher vorhandener Wurzelkanäle die anschließende vollständige, flüssigkeits- und bakteriendichte Füllung des gesamten Kanalsystems eine entscheidende Rolle. Die Beurteilung der Qualität eben dieser Wurzelkanalfüllung mittels bildgebender Verfahren war Schwerpunkt dieser Arbeit. Dazu wurden 42 extrahierte menschliche Zähne verwendet. Diese wurden unter optimierten praxisnahen In-Vitro-Bedingungen mittels unterschiedlicher Aufbereitungs- und Füllungstechniken wurzelkanalbehandelt und teils mit Wurzelkanalstiften versorgt. Anschließend wurden sämtliche Zähne in einem Mikro-Computertomographen (Mikro-CT), einem Digitalen Volumentomographen (DVT) und einem Magnetresonanztomographen (MRT) gescannt. Die so gewonnenen Aufnahmen wurden anschließend sowohl untereinander als auch mit den jeweiligen korrespondierenden Zahnfilmen (ZF) verglichen. Dabei wurden folgende Merkmale bewertet: die Aufbereitung des Wurzelkanalsystems, die Homogenität sowie die Wandständigkeit und Länge der Wurzelkanalfüllung, die Erkennbarkeit von Wurzelkanalinstrumentenbrüchen, von Seitenkanälen, Rissen und Frakturen sowie auftretende Artefakte. Ferner wurde eine Checkliste zur Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen mittels unterschiedlicher bildgebender Verfahren erarbeitet. Nach Auswertung der so gewonnenen Erkenntnisse kommt die vorliegende Arbeit zu folgenden Ergebnissen: Eine

erwartungsgemäße Häufung von Artefakten bei den MRT-Aufnahmen trat nicht auf. Allerdings waren keine Wurzelkanalfüllungen zu erkennen und somit auch nicht zu beurteilen. Die Mikro-CT-Aufnahmen boten mit einer Voxelgröße von 47 µm hochauflösende, dreidimensionale Bilder und ermöglichten dadurch eine genaue Befundung bei gleichzeitig geringem Artefakt auftreten. Diese Technik ist jedoch wegen der langen Scandauer und der daraus resultierenden hohen Strahlenbelastung nicht praxistauglich. Bei den DVT-Aufnahmen kam es zu starken Artefaktbildungen. Dadurch wurde eine genaue Beurteilbarkeit der Homogenität und Wandständigkeit der Wurzelkanalfüllungen gestört. Frakturierte Wurzelkanalinstrumente ließen sich nicht mit Sicherheit von der restlichen Wurzelkanalfüllung unterscheiden. Auch waren bei einer Auflösung von 150 µm keine Seitenkanäle, Risse oder Frakturen erkennbar. Im Bereich der Detailauflösung, der Artefaktanfälligkeit und des Funktionsangebots der Befundungssoftware besteht folglich seitens der Hersteller von Digitalen Volumetomographen noch ein Entwicklungsbedarf. Die Zahnfilm-Aufnahmen zeigten sich frei von Artefakten und ermöglichten somit, wenn auch nur zweidimensional, eine verhältnismäßig gute Beurteilbarkeit der Qualität von Wurzelkanalfüllungen bei einer im Vergleich zur DVT geringeren Strahlenbelastung. Auch waren mit ihnen - Dank ihres hohen Detailauflösungsvermögens - Wurzelkanalinstrumentenfrakturen meistens besser erkennbar. Dies hätte sich durch die Anfertigung zusätzlicher exzentrischer Aufnahmen sicherlich noch steigern lassen. Bis bessere Verfahren zur Verfügung stehen, eignet sich der Zahnfilm folglich nach wie vor für die meisten Indikationen als das „Goldstandard“-Verfahren zur radiologischen Beurteilung der Qualität von Wurzelkanalfüllungen. Bezüglich der im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Checkliste zur Beurteilung von Wurzelkanalfüllungen mittels bildgebender Verfahren sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Akzeptanz und Aussagekraft für die zahnärztliche Praxis zu erforschen.

## **6 Literaturverzeichnis**

1. Baumann M A, Beer R: Wurzelkanalfüllung. In: Wolf H F (Hrsg) Farbatlanten der Zahnmedizin - Endodontologie, 2. Aufl, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 223-223 (2007)
2. Beer R, Baumann M A, Kielbassa A M: Wurzelkanalaufbereitung. In: Beer R, Baumann M A, Kielbassa A M (Hrsg) Taschenatlas der Endodontie, 1. Aufl, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 106 (2003)
3. Beyer H K: Artefakte bei MRT-Untersuchungen. In: Beyer H K (Hrsg) MRT der Gelenke und der Wirbelsäule, 1. Aufl, Springer, Berlin Heidelberg, S. 41-50 (2003)
4. Bracher A K, Hofmann C, Bornstedt A, Hell E, Janke F, Ulrici J, Haller B, Geibel M A, Rasche V: Ultrashort echo time (UTE) MRI for the assessment of caries lesions. Dentomaxillofac Radiol, 42: 20120321 (2013)
5. Bundesministerium der Justiz: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung - RöV). [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/r\\_v\\_1987/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/r_v_1987/gesamt.pdf)  
Abgerufen am: 11.11.2013
6. Cody D, Stevens D, Ginsberg L: Multi-Detector Row CT Artifacts That Mimic Disease. Radiology, 236: 756-761 (2005)
7. Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK): s2k-Leitlinie Dentale digitale Volumentomographie. [http://www.dgzmk.de/uploads/tx\\_szdgzmkdocuments/083-005I\\_S2k\\_Dentale\\_Volumentomographie\\_2013-10.pdf](http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/083-005I_S2k_Dentale_Volumentomographie_2013-10.pdf)  
Abgerufen am: 17.11.2013

8. Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK): s2k-Leitlinie: Dentale digitale Volumentomographie. [http://www.dgzmk.de/uploads/tx\\_szdgzmkdocuments/083-005l\\_S2k\\_Dentale\\_Volumentomographie\\_2013-10.pdf](http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/083-005l_S2k_Dentale_Volumentomographie_2013-10.pdf)  
S.12  
Abgerufen am: 17.11.2013
9. Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK): Wissenschaftliche Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) „Good clinical practice“: Die Wurzelkanalbehandlung Stellungnahme des Endodontie-Beirats der DGZ. [http://www.dgzmk.de/uploads/tx\\_szdgzmkdocuments/Good\\_clinical\\_practice:\\_Die\\_Wurzelkanalbehandlung.pdf](http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/Good_clinical_practice:_Die_Wurzelkanalbehandlung.pdf)  
Abgerufen am: 31.10.2013
10. Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK): Wissenschaftliche Stellungnahme: Zur Prognose von Wurzelkanalbehandlungen. [http://www.dgzmk.de/uploads/tx\\_szdgzmkdocuments/Zur\\_Prognose\\_von\\_Wurzelkanalbehandlungen.pdf](http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/Zur_Prognose_von_Wurzelkanalbehandlungen.pdf)  
Abgerufen am: 17.11.2013
11. Deutschen Gesellschaft für Endodontologie und zahnärztliche Traumatologie e.V. (DGET): <http://www.dget.de/de/dget/informationen/informationen.htm>  
Abgerufen am: 12.05.2013
12. Düker J: Projektionslehre. In: Düker J (Hrsg) Praxisleitfaden Zahnärztliche Radiologie: für den Zahnarzt und sein Team, 1. Aufl, Elsevier, Urban & Fischer, München, S. 77-98 (2006)
13. Düker J, Schulze D: Bildgebende Verfahren. In: Gutwald R, Gellrich N, Schmelzeisen R (Hrsg) Einführung in die zahnärztliche Chirurgie und Implantologie, 2. Aufl, Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln, S. 178-180 (2010)

14. Düker J, Schulze D: Bildgebende Verfahren. In: Gutwald R, Gellrich N, Schmelzeisen R (Hrsg) Einführung in die zahnärztliche Chirurgie und Implantologie, 2. Aufl, Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln, S. 184 (2010)
15. Eftimov L: Kraniale CT mit 64-, 16-, 4- und 1-Schicht Computertomographen - Evaluation der Bildqualität, der Darstellung zerebraler Strukturen und des Artefaktvorkommens. Med Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, (2009)
16. Epley S, Fleischman J, Hartwell G, Cicalese C: Completeness of root canal obturations: Epiphany techniques versus gutta-percha techniques. J Endod, 32: 541-544 (2006)
17. European Society of Endodontology: Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. Int Endod J, 39: 921-930 (2006)
18. Funduk N, Kydon D W, Schreiner L J, Peemoeller H, Miljkovic L, Pintar M M: Composition and relaxation of the proton magnetization of human enamel and its contribution to the tooth NMR image. Magn Reson Med, 1: 66-75 (1984)
19. Gaudino C, Cosgarea R, Heiland S, Csernus R, Beomonte Zobel B, Pham M, Kim T S, Bendszus M, Rohde S: MR-Imaging of teeth and periodontal apparatus: an experimental study comparing high-resolution MRI with MDCT and CBCT. Eur Radiol, 21: 2575-2583 (2011)
20. Geibel M A: Technik. In: Geibel M A (Hrsg) DVT-Kompendium, Allgäuer Zeitungsverlag, Kempten, S. 9-13 (2011)
21. Geibel M A, Holzinger I: DVT – Indikationen und Strahlenbelastung. ZWP Zahnarzt Wirtschaft Praxis, 04: 50-56 (2012)

22. Hammad M, Qualtrough A, Silikas N: Evaluation of root canal obturation: a three-dimensional in vitro study. *J Endod*, 35: 541-544 (2009)
23. Hellwig E, Klimek J, Attin T: Anatomische Grundlagen für die Wurzelkanalbehandlung. In: Hellwig E, Klimek J, Attin T (Hrsg) Einführung in die Zahnerhaltung, 4. Aufl, Elsevier, Urban & Fischer, München, S. 295-296 (2006)
24. Holdsworth D W, Thornton M M: Micro-CT in small animal and specimen imaging. *Trends in Biotechnology*, 20: 34-39 (2002)
25. Hülsmann M: Klinische Endodontie - Therapie. In: Hülsmann M (Hrsg) Checklisten der Zahnmedizin: Endodontie, 1. Aufl, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 114 (2008)
26. Hülsmann M, Schäfer E: Probleme bei der Wurzelkanalpräparation. *DFZ Der Freie Zahnarzt*, 57: 54-62 (2013)
27. Kandaswamy D, Venkateshababu N, Gogulnath D, Kindo A: Dentinal tubule disinfection with 2% chlorhexidine gel, propolis, morinda citrifolia juice, 2% povidone iodine, and calcium hydroxide. *Int Endod J*, 43: 419-423 (2010)
28. Mader T: Desinfektion artifiziell infizierter boviner Wurzelkanäle in vitro mittels eines klinisch etablierten Wirkstoffes. *Med Dissertation, Universität Regensburg* (2012)
29. Moeller L, Wenzel A, Wegge-Larsen A M, Ding M, Kirkevang L L: Quality of root fillings performed with two root filling techniques. An in vitro study using micro-CT. *Acta Odontol Scand*, 71(3-4): 689-696 (2013)
30. Oi T, Saka H, Ide Y: Three-dimensional observation of pulp cavities in the maxillary first premolar tooth using micro-CT. *Int Endod J*, 37: 46-51 (2004)
31. Parchami S: Der Einfluss verschiedener Parameter auf den klinischen Langzeiterfolg von Wurzelfüllungen am Zentrum für ZMK der Philipps-Universität

- Marburg als Beitrag zur internen Qualitätssicherung. Med Dissertation, Universität Marburg (2011)
32. Pasler F A: Aufnahmetechnik und Röntgenanatomie der Zähne (spezieller Teil). In: Pasler F A (Hrsg) Zahnärztliche Radiologie, 4. Aufl, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 173-175 (2003)
33. Rödiger T: Aktuelle Konzepte der Wurzelkanalinfektion. wissen kompakt, 7: 27-39 (2013)
34. Rother U J: Röntgenfilm, Film-Folien-Kombination, Filmverarbeitung. In: Rother U J (Hrsg) Moderne bildgebende Diagnostik in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Grundlagen Strahlenschutz Befunde, 1. Aufl, Elsevier, Urban & Fischer, München, S. 25-40 (2006)
35. Rother U J: Röntgenologische Untersuchungen und Grundprinzipien der Erkennung von Veränderungen des Gesichtsschädels. In: Rother U J (Hrsg) Moderne bildgebende Diagnostik in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Grundlagen Strahlenschutz Befunde, 1. Aufl, Elsevier, Urban & Fischer, München, S. 163-168 (2006)
36. Saunders W P, Saunders E M: Coronal leakage as a cause of failure in root-canal therapy: a review. Endod Dent Traumatol, 10: 105-108 (1994)
37. Schick F: Grundlagen der Magnetresonanztomographie. Radiologe, 47 Suppl. 1: 7-26 (2007)
38. Schilder H: Filling root canals in three dimensions. 1967. J Endod, 32: 281-290 (2006)
39. Schilling R, Geibel M A: Assessment of the effective doses from two dental cone beam CT devices. Dentomaxillofac Radiol, 42: 20120273 (2013)

40. Schreiner L J, Cameron I G, Funduk N, Miljkovic L, Pintar M M, Kydon D N: Proton NMR spin grouping and exchange in dentin. *Biophys J*, 59: 629-639 (1991)
41. Schulze R, Heil U, Gross D, Bruellmann D D, Dranischnikow E, Schwanecke U, Schoemer E: Artefacts in CBCT: a review. *Dentomaxillofac Radiol*, 40: 265-273 (2011)
42. Shafiei F, Honda E, Takahashi H, Sasaki T: Artifacts from dental casting alloys in magnetic resonance imaging. *J Dent Res*, 82: 602-606 (2003)
43. Silva-Filho J M, Souza-Gabriel A E, Leoni G B, De-Bem S H, Alfredo E, Silva R G: Comparison of two techniques for selection of master gutta-percha cone using micro-computed tomography. *Braz Dent .J*, 24: 367-370 (2013)
44. Somma F, Cretella G, Carotenuto M, Pecci R, Bedini R, De Biasi M, Angerame D: Quality of thermoplasticized and single point root fillings assessed by micro-computed tomography. *Int Endod J*, 44: 362-369 (2011)
45. Tymofiyeva O, Vaegler S, Rottner K, Boldt J, Hopfgartner A J, Proff P C, Richter E J, Jakob P M: Influence of dental materials on dental MRI. *Dentomaxillofac Radiol*, 42: 20120271 (2013)
46. Vandenberghe B, Jacobs R, Bosmans H: Modern dental imaging: a review of the current technology and clinical applications in dental practice. *Eur Radiol*, 20: 2637-2655 (2010)
47. Walker S: Vergleichende Analyse unterschiedlicher Wurzelfüllmaterialien in der digitalen Volumentomographie (DVT). Med Dissertation, Universität Ulm, (Publikation in Vorbereitung)

48. Walter A: Digitale Volumetomographie Artefakte bei der Verwendung von Wurzelstiftsystemen in der Endodontie. Med Dissertation, Universität Ulm, (Publikation in Vorbereitung)
49. Weber T: Endodontie. In: Weber T (Hrsg) Memorix Zahnmedizin, 3. Aufl, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 397 (2010)

### **7 Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Margit-Ann Geibel für die Bereitstellung des spannenden Themas und die Möglichkeit unter ihrer kompetenten Leitung zu dissertieren. Sie stand mir jederzeit engagiert und kollegial in allen Bereichen zur Seite.

Mein weiterer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. Volker Rasche für die stets fachkundige und detaillierte Betreuung besonders bei allen technischen Fragestellungen.

Außerdem danke ich dem Diplomingenieur und Röntgenspezialisten Holger Ölschläger und der Medizinisch-Technischen Radiologieassistentin Anne Subgang für ihren Beitrag zur Erstellung der Aufnahmen.

Der persönliche Teil der Danksagung wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

## **8 Tabellarischer Lebenslauf**

Der Lebenslauf wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.