

Aus der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie
(Prof. Dr. med. dent. A. Wiegand)
im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts des Wurzelkanal Dentins
auf die Entstehung und den Nachweis von Mikrorissen**

Eine Mikro-Computertomografie-Studie

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
für Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Christine Müller

aus Kustanaj, Kasachstan

Göttingen 2019

Dekan: Prof. Dr. med. Wolfgang Brück

Referent/in: Prof. Dr. med. dent. Tina Rödiger

Ko-Referent/in: PD Dr. med. dent. Sven Rinke

Drittreferent/in: Prof. Dr. med. dent. Rainer Mausberg

Datum der mündlichen Prüfung: 22.06.2020

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel „Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts des Wurzelkanal Dentins auf die Entstehung und den Nachweis von Mikrorissen – Eine Mikro-Computertomografie-Studie“ eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den

Die vorliegende Promotionsschrift war die Grundlage für vorliegende Veröffentlichung:

Rödig T, Müller C, Hoch M, Haupt F, Schulz X, Wiegand A, Lungova M (2018):

Moisture content of root canal dentin affects detection of microcracks using micro-computed tomography.

Int Endod J 45, 357-363

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung	1
2 Literaturübersicht	3
2.1 Indikation und Ziele einer Wurzelkanalbehandlung.....	3
2.2 Das Dentin	4
2.2.1 Morphologie des Dentins.....	4
2.2.2 Einfluss des Dentins auf die Rissbildung.....	4
2.3 Nomenklatur von Rissarten in der Zahnhartsubstanz	5
2.4 Vertikale Wurzelfrakturen	8
2.5 Einfluss der Wurzelkanalbehandlung auf die Rissbildung im Dentin.....	11
2.5.1 Einfluss der chemo-mechanischen Aufbereitung.....	11
2.5.2 Einfluss der Wurzelkanalfüllung.....	14
2.6 Methode zur Auswertung von Rissen im Wurzel Dentin	15
2.6.1 Die Sägeschnitttechnik.....	15
2.6.2 Die Mikro-Computertomografie.....	17
2.6.2.1 Aufbau und Funktionsweise	17
2.6.2.2 Das Mikro-CT in der Endodontologie	20
3 Ziel der Untersuchung.....	23
4 Material und Methode	24
4.1 Auswahl und Vorbereitung der Zähne	24
4.2 Mikro-CT-Untersuchung.....	27
4.2.1 Scanprotokoll.....	27
4.2.2 Rekonstruktion.....	30
4.2.3 3D-Registrierung	33
4.3 Analyse ausgewählter Bilder.....	35

4.4	Statistische Auswertung	37
5	Ergebnisse	38
5.1	Intrarater- und Interrater-Reliabilität	38
5.2	Vergleich der unterschiedlichen Scanzeitpunkte	39
6	Diskussion.....	43
6.1	Diskussion von Material und Methode	43
6.2	Diskussion der Ergebnisse.....	47
6.3	Schlussfolgerungen.....	49
7	Zusammenfassung	50
8	Anhang.....	52
8.1	Einverständniserklärung.....	52
9	Literaturverzeichnis.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der verschiedenen Zahnhartsubstanzfrakturen.	6
Abbildung 2-2: Schematische Klassifikation vertikaler Wurzelfrakturen.	8
Abbildung 2-3: Horizontale Dentinscheiben zweier unterschiedlicher Wurzeln mit sichtbaren Mikrorissen bzw. vollständiger Fraktur.	16
Abbildung 2-4: Horizontale Dentinscheibe einer Wurzel ohne erkennbare Mikrorisse.	16
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines Mikro-CT.	18
Abbildung 2-6: Bestandteile des SkyScan 1272.	19
Abbildung 4-1: Stereomikroskopische Aufnahmen einer Wurzel mit sichtbaren Rissen in den unterschiedlichen Ebenen.	25
Abbildung 4-2: Stereomikroskopische Aufnahmen einer Wurzel ohne Risse in den vier verschiedenen Ebenen.	26
Abbildung 4-3: Überblick über den Scanablauf.	27
Abbildung 4-4: Fixierung der Wurzeln mit Hilfe von Schaumstoff.	28
Abbildung 4-5: Positionierung der Probe im Scanner.	29
Abbildung 4-6: Darstellung eines rekonstruierten Schnittbildes mit einem <i>post-alignment</i> -Wert von 0,5 und einem Wert von -3,5.	31
Abbildung 4-7: Darstellung eines rekonstruierten Schnittbildes mit einem <i>beam-hardening</i> -Wert von 90% und einem Wert von 60%.	32
Abbildung 4-8: Darstellung eines rekonstruierten Schnittbildes mit einem <i>ring-artefact</i> -Wert von 3 und einem Wert von 11.	32
Abbildung 4-9: Darstellung eines rekonstruierten Schnittbildes mit einem <i>smoothing</i> -Wert von 4 und einem Wert von 0.	33
Abbildung 4-10: Darstellung vor und nach der Durchführung der 3D-Registrierung.	34
Abbildung 4-11: Horizontale Mikro-CT-Aufnahmen mit von der Wurzeloberfläche ausgehenden Mikrorissen.	36
Abbildung 4-12: Horizontale Mikro-CT-Aufnahme mit einem von der Wurzelaußenseite bis zum Wurzelkanal durchgängigen Mikroriss.	36
Abbildung 5-1: Balken-Diagramm zur Darstellung der Median-Werte der Mikrorisse für sechs verschiedene Scanzeitpunkte.	40

Abbildung 5-2: Sechs verschiedene Mikro-CT-Scans vier verschiedener Proben mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt des Dentins.....	42
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Nummerierung der verwendeten Wurzeln.	26
Tabelle 5-1: Prozentuale Intrarater-Übereinstimmung der fünf Untersucher in Bezug auf beide Untersuchungszeitpunkte.	38
Tabelle 5-2: Prozentuale Interrater-Übereinstimmung der fünf Untersucher zu den beiden verschiedenen Untersuchungszeitpunkten.	39

1 Einleitung

Die Endodontologie ist schon seit Langem als ein Teilbereich der modernen Zahnheilkunde etabliert. Der Wunsch der Patienten nach Erhalt ihrer natürlichen Zähne ließ den Stellenwert der Wurzelkanalbehandlung steigen. Darüber hinaus wurden im Laufe der Zeit immer neuere Techniken und Instrumente auf den Markt gebracht, sodass die Wurzelkanalbehandlung effizienter, zeitsparender und erfolgversprechender durchgeführt werden konnte. Jedoch stellen Mikrorisse im Dentin ein ernsthaftes Problem sowohl in der Diagnostik als auch in der Therapie dar. Grund hierfür ist, dass solche Risse zur Entwicklung vertikaler Wurzelfrakturen führen können, was wiederum die Entfernung des betroffenen Zahnes nach sich zieht (Walton et al. 1984, Tamse et al. 1999, Tamse 2006). In Anbetracht der verheerenden Konsequenzen vertikaler Wurzelfrakturen ist die Entstehung von Mikrorissen im Wurzeldentin vermehrt in den Fokus endodontischer Forschung gerückt. Die bisher veröffentlichten Studien konzentrierten sich vor allem darauf, welchen Einfluss die Wurzelkanalbehandlung auf die Rissentstehung hat (Bier et al. 2009, Shemesh et al. 2010, 2011, Yoldas et al. 2012, Bürklein et al. 2013, De-Deus et al. 2014, Ustun et al. 2015, Ceyhanli et al. 2016, De-Deus et al. 2017, Zuolo et al. 2017, Shemesh et al. 2018). Bedingt durch unterschiedliche Untersuchungsmethoden (Sägeschnitttechnik versus Mikro-CT) liegen konträre Ansichten bezüglich der Rissentwicklung und der Kausalität durch endodontische Maßnahmen vor.

Bis vor wenigen Jahren wurde die sogenannte horizontale Sägeschnitttechnik in Kombination mit der stereomikroskopischen Auswertung als Untersuchungsmethode gewählt. Angesichts der limitierenden und destruktiven Eigenschaften kann diese Methode kein umfassendes Verständnis des multifaktoriellen Phänomens der Mikrorissbildung liefern (De-Deus et al. 2016). Der Einsatz eines Mikro-Computertomografen für die Bewertung der Mikrorisse wurde kürzlich in einigen Studien als ein innovativer methodischer Ansatz vorgestellt (De-Deus et al. 2014, 2015, Ceyhanli et al. 2016, De-Deus et al. 2016, Zuolo et al. 2017, Shemesh et al. 2018). Das Mikro-CT ermöglicht auf nicht-invasive Weise eine dreidimensionale Visualisierung und Auswertung von Objekten. Dadurch können die destruktiven und limitierenden Eigenschaften der bisherigen Methode umgangen werden.

Weiterhin darf nicht außer Acht gelassen werden, dass der Feuchtigkeitsgehalt

des Dentins bei der Ätiologie der Rissentstehung von Bedeutung ist. Bisher geht man davon aus, dass es durch Austrocknung des Dentins extrahierter Zähne zum Verlust des gebundenen Wassers aus der Kollagenmatrix (Agee et al. 2015) und somit zur Beeinflussung des mechanischen Verhalten des Dentins kommt (Shemesh et al. 2018). Als Konsequenz würde die Entstehung von Mikrorissen begünstigt werden.

In diesem Zusammenhang zielte die vorliegende Studie darauf ab, die Auswirkung unterschiedlicher Feuchtigkeitsbedingungen des Dentins (trocken versus nass) auf die Entstehung und die Identifikation von Mikrorissen mittels der Mikro-CT-Technologie zu untersuchen.

2 Literaturübersicht

2.1 Indikation und Ziele einer Wurzelkanalbehandlung

Die Endodontologie befasst sich als ein Teilbereich der Zahnheilkunde mit der Anatomie, Funktion und Gesundheit der Pulpa und des periradikulären Gewebes, aber auch mit deren Erkrankungen sowie Diagnostik und Therapie (European Society of Endodontology, ESE, 2006). Die Gründe für die Notwendigkeit einer Wurzelkanalbehandlung können vielfältig sein. Laut der Stellungnahmen der ESE (2006) sowie der Gesellschaft für Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde (Schäfer et al. 2000) ist eine Wurzelkanalbehandlung (WKB) indiziert, wenn Anzeichen auf eine irreversible Pulpitis oder eine nekrotische Pulpa mit bakterieller Infektion sowie pathologische periapikale Entzündungen vorliegen. Darüber hinaus kann eine WKB im Zusammenhang vor restaurativen Maßnahmen, z. B. zur Aufnahme eines Wurzelkanalstiftes, vor einer Wurzelspitzenresektion oder einer Hemisektion notwendig sein.

Das primäre Ziel der WKB ist der Erhalt oder die Wiederherstellung der Gesundheit des periradikulären Gewebes (Frentzen et al. 2004). Entscheidend für den Erfolg ist hierbei die Entfernung von Geweberesten und Debris, aber auch die Eliminierung von Mikroorganismen aus dem Wurzelkanalsystem. Ferner wird mit der chemo-mechanischen Aufbereitung eine Desinfektion sowie eine optimale Formgebung des Wurzelkanalsystems angestrebt, welche die ursprüngliche Kanal Anatomie berücksichtigt und möglichst nicht von ihr abweicht (Schilder 1974, Schäfer et al. 2000, Hülsmann et al. 2005, European Society of Endodontology 2006).

Ein ebenfalls wichtiger Bestandteil der WKB stellt der Verschluss des zuvor desinfizierten Wurzelkanalsystems dar. Die Obturation mittels einer biokompatiblen und dimensionsstabilen Wurzelkanalfüllung verhindert eine Reinfektion über ein koronales oder apikales Leakage. Zudem soll den möglicherweise in den Dentintubuli verbliebenen Mikroorganismen das Substrat entzogen werden (Löst et al. 1992, Rödiger et al. 2009). Abschließend sollte eine bakteriendichte koronale Restauration den langfristigen Erfolg der endodontischen Behandlung gewährleisten (Ng et al. 2008).

2.2 Das Dentin

2.2.1 Morphologie des Dentins

Bei der chemo-mechanischen Wurzelkanalaufbereitung wird u. a. das bakteriell infizierte Dentin gleichmäßig mittels manueller oder maschineller Instrumente abgetragen, um möglichst bakterienfreie Verhältnisse vor der Wurzelkanalfüllung zu schaffen. Dentin ist ein vitales, elastisches und somit weniger stark mineralisiertes Gewebe mit einer Brinellhärte von 60-70 HB (Schmelz 300-350 HB). Das Dentin besteht in seiner Zusammensetzung zu 70 Gew.% aus anorganischen und zu 20 Gew.% aus organischen Bestandteilen sowie den restlichen 10 Gew.% aus Wasser (Hellwig et al. 2009). Der anorganische Anteil besteht hauptsächlich aus Kalzium und Phosphat, das in Hydroxylapatitkristallen vorliegt. Der organische Anteil besteht aus Kollagen und kollagenartigen Verbindungen. Dentin wird zeitlebens von den in der Pulpa lokalisierten Odontoblasten gebildet. Die in die Dentinkanälchen eingebetteten Odontoblastenfortsätze, die sog. Tomes'schen Fasern, durchziehen das komplette Dentin bis zur Schmelz-Dentin-Grenze, wobei deren Durchmesser fortlaufend abnimmt. Daraus ergeben sich im Querschnitt für das pulpanahe und das pulpaferne Dentin unterschiedliche Werte für die Anzahl und die Dichte der Dentinkanälchen (Hellwig et al. 2009). Garberoglio und Brännström (1976) stellten fest, dass die Anzahl der Dentinkanälchen pulpanah 45000 pro mm², an der Schmelz-Dentin-Grenze jedoch nur noch 20000 pro mm² beträgt. Des Weiteren zeigten sie auf, dass sich der Durchmesser der Dentinkanälchen nach peripher von 2,5 µm auf 0,9 µm verringert (Garberoglio und Brännström 1976).

2.2.2 Einfluss des Dentins auf die Rissbildung

Die Morphologie des Dentins spielt sowohl bei der Entstehung von Mikrorissen als auch bei deren Ausbreitungstendenz eine entscheidende Rolle. Jainaen et al. (2009) untersuchten die Rolle der Dentintubuli auf die Fraktureigenschaften des Dentins. Sie stellten fest, dass der Weg der Risse durch das Dentin von dem Verlauf der Dentintubuli beeinflusst wird. Dabei wird ein Riss von einer Reihe einzelner, vorweg laufender Mikrorisse begleitet, wobei diese ihren Ursprung zunächst im peritubulären Dentin haben (Kahler et al. 2003, Jainaen et al. 2009). Aufgrund

der hohen Tubulidichte in pulpanahen Bereichen breitet sich ein Riss von Tubulus zu Tubulus aus, wohingegen pulpafern Risse hauptsächlich im intertubulären Dentin verlaufen. Außerdem wurde festgestellt, dass deutlich mehr Energie benötigt wird, um das Dentin parallel zu den Dentintubuli als senkrecht dazu zu brechen (Iwamoto und Ruse 2003, Jainan et al. 2009).

2.3 Nomenklatur von Rissarten in der Zahnhartsubstanz

Rivera und Walton (2008) definierten fünf Arten von Frakturen aufgrund der Lokalisation, Richtung und Ausdehnung der Risse (**Abbildung 2-1**). Diese Definition berücksichtigte hauptsächlich klinische Aspekte und dient dazu, die unterschiedlichen Defekte korrekt zu diagnostizieren und dementsprechend die richtige Therapie auszuwählen.

- 1) Infraktur (*craze line*)
- 2) Frakturierter Höcker (*fractured cusp*)
- 3) Rissiger/brüchiger Zahn (*cracked tooth*)
- 4) Gespaltener Zahn (*split tooth*)
- 5) Vertikale Wurzelfraktur (*vertical root fracture*)

Die *craze line* begrenzt sich nur auf den Schmelz, wohingegen sich ein Rissverlauf bei einem *fractured cusp*, *cracked tooth* und *split tooth* nach apikal ausdehnen kann. Ein rissiger Zahn kann sich zu einem gespaltenen Zahn entwickeln. Die vertikale Wurzelfraktur ist eine längsorientierte Fraktur der Wurzel. Betrachtet man dabei den Frakturverlauf im Querschnitt, erstreckt sich die Fraktur vom Wurzelkallumen bis zur Wurzeloberfläche, wobei entweder eine Seite oder beide Seiten betroffen sein können.

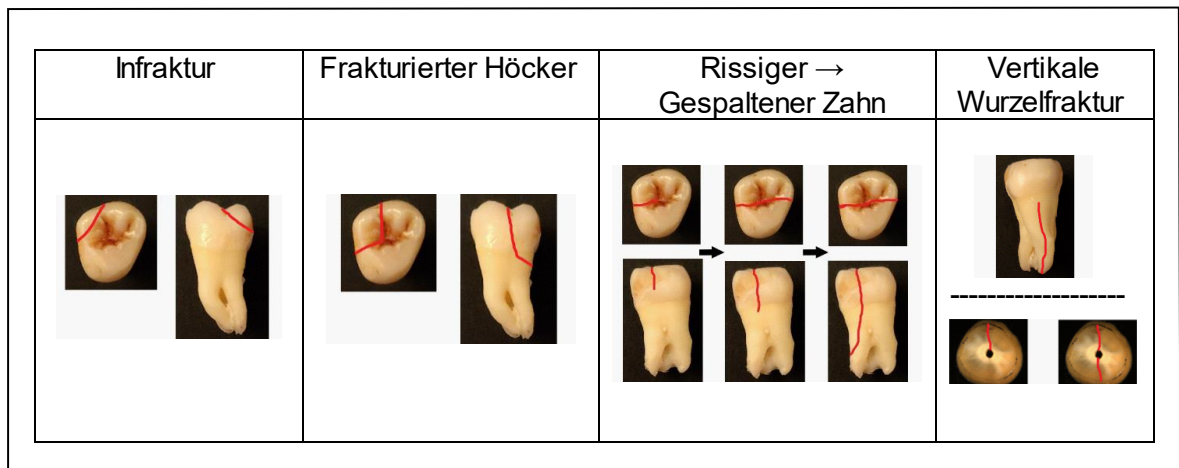


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der verschiedenen Zahnhartsubstanzfrakturen.

Die von Rivera und Walton (2008) festgelegte Nomenklatur berücksichtigt jedoch nicht die unterschiedlichen Rissarten im Wurzel-dentin, welche in zahlreichen Studien angegeben werden. In diesen wird der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen endodontischen Behandlungen und die daraus resultierende Rissbildung untersucht. Dabei werden Begriffe wie Dentindefekte, Risslinien, Risse (vollständig/unvollständig), Frakturen (vollständig/unvollständig) oder vertikale Wurzelfrakturen inhomogen verwendet (Shemesh et al. 2008, Versiani et al. 2015). Es fehlt eine einheitliche Nomenklatur zur Klassifikation von Rissen im Dentin, wodurch es zu Missverständnissen über die Entstehung von Rissen kommen kann und der Vergleich verschiedener Studien erschwert wird (Versiani et al. 2015).

Onnink et al. beschrieben 1994 den Zusammenhang zwischen Rissen im Wurzel-dentin und drei Obturationstechniken und definierten dabei aufgrund der Ausdehnung zwei Arten von Dentindefekten:

- 1) Unvollständige Frakturen: Diese breiten sich vom Kanallumen aus, erreichen aber nicht die Wurzeloberfläche. Darunter fallen auch jegliche Risse, die rein im Dentin liegen und weder Kontakt zur Innen- bzw. Außenfläche aufweisen.
- 2) Vollständige Frakturen: Dies sind durchgängige Risse, die sich vom Kanallumen bis zur Wurzeloberfläche erstrecken.

Es wird jedoch nicht angegeben, ob von der Wurzeloberfläche ausgehende und ins Dentin reichende Risse ebenfalls als unvollständige Risse definiert werden. Dies führt zu Verwirrungen, da andere Autoren diese Art der Risse als *craze lines* (Wilcox et al. 1997, Bürklein et al. 2013) oder sogar einfach als „Defekt“ (Shemesh et al. 2010, Kansal et al. 2014) definierten. Ein vollständiger Riss, der sich laut Definition von der einen Oberfläche zur anderen erstreckt (Kanallumen-Wurzeloberfläche oder Wurzeloberfläche-Kanallumen), ist dagegen einheitlich beschrieben (Wilcox et al. 1997, Bürklein et al. 2013, Kansal et al. 2014).

In der Studie von Layton et al. (1996) wurden drei verschiedene Rissarten definiert, wobei bei der Klassifikation sowohl die Lokalisation als auch die Ausdehnung der Risse berücksichtigt wurde:

- 1) Vom Wurzelkanal ausgehende Risse: Diese Risse breiten sich ins Dentin aus, können dabei entweder unvollständig sein, wenn sie die Wurzeloberfläche nicht erreichen, oder vollständig, wenn der Riss vom Wurzelkanal bis zur Wurzeloberfläche reicht.
- 2) Vom Dentin ausgehende Risse: Diese Risse sind ausschließlich auf das Dentin begrenzt und weisen keinen Kontakt zur Innen- oder Außenfläche auf.
- 3) Vom Zement ausgehende Risse: Diese Risse breiten sich von der Zementoberfläche bis zur Zement-Dentin-Grenze aus.

Hinsichtlich einer einheitlichen Nomenklatur zur Klassifizierung von Wurzelrissen sollte außerdem bedacht werden, dass ein auf einem zweidimensionalen Schnitt vorhandener unvollständiger Riss mit einem anderen Riss in einer anderen Ebene kommunizieren kann (Onnink et al. 1994, Hülsmann 2013). Dadurch können Fehlinterpretationen entstehen, indem das Auftreten durchgehender Frakturen unterschätzt oder das Auftreten unvollständiger Risse überschätzt wird (Hülsmann 2013). Aus diesem Grund verzichteten in den jüngsten Studien die Autoren auf eine genaue Definition, unabhängig von der Lokalisation oder Ausdehnung der aufgetretenen Risse, sondern erfassen jegliche Art von Rissen nur als „Defekt“ (Yoldas et al. 2012, Kansal et al. 2014, Karataş et al. 2015, Saber und Schäfer 2016).

2.4 Vertikale Wurzelfrakturen

Eine vertikale Wurzelfraktur (*vertical root fracture*, VRF) ist eine längsorientierte Fraktur der Wurzel. Diese Fraktur kann sich über die vollständige Länge der Wurzel ausdehnen oder aber auch nur kurze Areale betreffen (Walton et al. 1984). Im Querschnitt kann sich die Fraktur als ein unvollständiger, wenn die Wurzeloberfläche nicht erreicht wird, oder auch als ein vollständiger Riss, wenn der Riss vom Wurzelkanal bis zur Wurzeloberfläche durchgängig ist, erstrecken (Walton et al. 1984). Aesaert beschrieb 2001 folgende Einteilung der Wurzellängsfrakturen (**Abbildung 2-2**).

- 1) blind crack: Unvollständige Längsfraktur. Dieser Riss geht vom Kanallumen aus und hat keinen Kontakt zur Wurzeloberfläche bzw. zum Parodontalspalt.
- 2) Wurzellängsfraktur Klasse I: Vollständige Längsfraktur mit Verbindung zur Wurzeloberfläche.
- 3) Wurzellängsfraktur Klasse IIa: Zwei Frakturlinien, die weniger als 90° voneinander entfernt sind.
- 4) Wurzellängsfraktur Klasse IIb: Zwei Frakturlinien, die mehr als 90° voneinander entfernt sind.
- 5) Wurzellängsfraktur Klasse III: Längsfraktur im apikalen Bereich

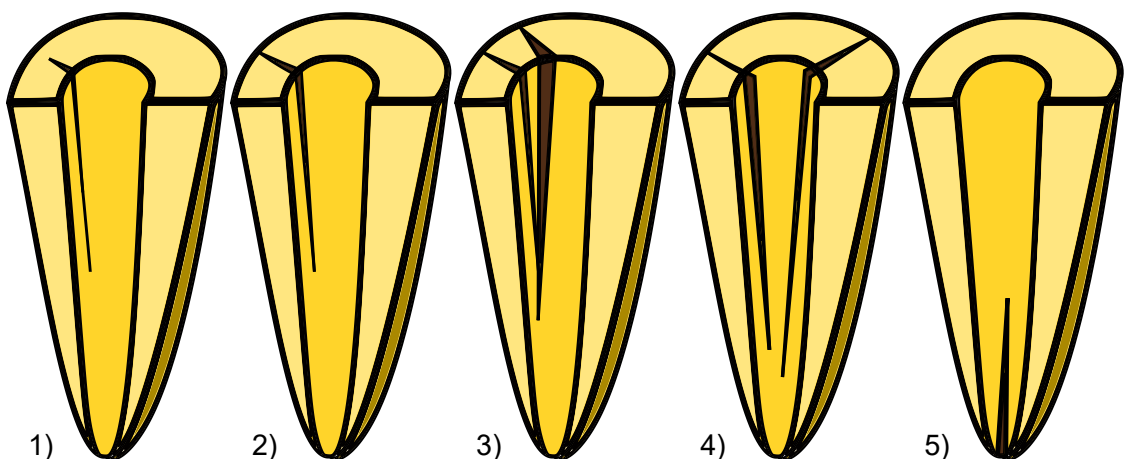


Abbildung 2-2: Schematische Klassifikation vertikaler Wurzelfrakturen.

Die VRF ist eine gravierende (Langzeit-) Komplikation in der Endodontologie und stellt eine häufige Ursache für den Misserfolg von Wurzelkanalbehandlungen dar, da eine VRF letztendlich zur Extraktion des betroffenen Zahnes führt (Walton et al. 1984, Tamse et al. 1999, Tamse 2006). Das Auftreten von Wurzellängsfrakturen wurde sowohl bei vitalen (PradeepKumar et al. 2017) als auch bei endodontisch behandelten Zähnen beschrieben, wobei letztere eine deutlich erhöhte Prävalenz für VRF aufweisen (Chan et al. 1999). So treten bei 3% bis 13% der wurzelkanalbehandelten Zähne vertikale Wurzelfrakturen auf (Morfis 1990, Fuss et al. 1999, Tamse et al. 1999, Touré et al. 2011). Übereinstimmend bestätigten die Autoren, dass die Diagnostik einer VRF sehr schwierig ist, da nur unspezifische klinische Symptome auftreten (Pitts und Natkin 1983, Tamse 2006). Betroffene Patienten berichten häufig über eine lange Leidensgeschichte mit unklaren Beschwerden (Haeisen et al. 1999), einer Perkussionsempfindlichkeit, lokal erhöhten Sondierungstiefen, Schwellungen, Fistelgängen und einer erhöhten Zahnbeweglichkeit (Pitts und Natkin 1983, Tamse et al. 1999). Darüber hinaus zeigen sich röntgenologisch periradikuläre oder lateral gelegene Läsionen, resorptive Knochendefekte sowie ein erweiterter Parodontalspalt (Pitts und Natkin 1983). Sämtliche Symptome können ein Indiz für die Lage und Ausprägung der VRF sein (Pitts und Natkin 1983). Aufgrund der unspezifischen Symptomatik sollte eine potenzielle VRF differentialdiagnostisch von endodontischen und / oder parodontalen Erkrankungen abgegrenzt werden (Tamse 2006).

Die Ätiologie einer VRF ist sehr vielfältig. Bereits 1983 beschrieb Abou-Rass unterschiedliche Gründe für das Auftreten von Wurzellängsfrakturen, wie beispielweise Traumata im Mund- und Gesichtsbereich, Überbelastung infolge von Parafunktionen, aber auch ungünstige Zahnpositionen durch elongierte, rotierte oder gekippte Zähne (Abou-Rass 1983). Darüber hinaus stellte er fest, dass auch das Design von Kavitätenpräparationen sowie thermische Expansion von Restaurationmaterialien eine mögliche Ursache für Längsfrakturen darstellen könnten (Abou-Rass 1983). Auch ein zu hoher Druck beim Einbringen eines Wurzelkanalstiftes in endodontisch behandelte Zähne kann zu einer VRF führen (Abou-Rass 1983, Trope et al. 1985). Morfis (1990) untersuchte die Auswirkung postendodontischer Versorgungen mittels Wurzelkanalstiften auf die Entstehung von Längsfrakturen. Dabei führte die Länge des verwendeten Stiftes, vor allem wenn diese

mehr als die Hälfte der Wurzellänge beträgt, ebenfalls zur Entstehung einer VRF. Weiterhin zeigten Deutsch et al. (1985) auf, dass auch die Form des Wurzelstiftes eine Rolle bei dem Auftreten einer Längsfraktur spielt, da die Insertion konischer Stifte zur Schwächung des Wurzelzements, aber auch zur Keilwirkung in der Wurzel führt. Zahlreiche Untersuchungen belegten eine zu intensive Kraftbelastung bei der Obturation eines Wurzelkanals als eine mögliche Ursache für das Entstehen vertikaler Wurzelfrakturen (Meister et al. 1980, Harvey et al. 1981, Holcomb et al. 1987). In der Studie von Morfis (1990) wurde die laterale Kompaktion im Zusammenspiel mit einer Step-back-Instrumentation als ein Grund für das Auftreten einer VRF angesehen. Dang und Walton (1989) untersuchten die laterale Kompaktion als Wurzelkanalfülltechnik und legten dar, dass nicht nur ein zu exzessiver Druck während des Füllvorgangs, sondern auch das Design des Spreaders sowie die Kanaldimension zu einer VRF führen kann. Das Geschlecht, aber vor allem das Alter eines Patienten nehmen ebenfalls Einfluss auf die Entwicklung einer VRF bei endodontisch behandelten Zähnen. So stellten Chan et al. (1999) bezüglich der Altersverteilung einen Häufigkeitsgipfel zwischen dem 40. und 60. Lebensjahr fest. Männer erlitten dabei 1,4-fach häufiger eine VRF. Die Studie von Testori et al. (1993) bestätigte ebenfalls, dass die Zähne von Patienten im Alter zwischen 45 und 60 Jahren häufiger eine VRF entwickelten. In einer aktuellen Studie von PradeepKumar et al. (2017) wurde festgestellt, dass auch Risse im Dentin nicht-endodontisch behandelter Zähne auftraten. Außerdem lag die Prävalenz von Rissen bei älteren Patienten deutlich höher (40-70 Jahre; 8,3%) als bei jüngeren (20-39 Jahre; 3,7%).

Ein weiterer interessanter Aspekt wurde von Kramer et al. (2008) in einer Kohortenstudie beschrieben. Diese Autoren untersuchten den Zeitpunkt des Auftretens einer VRF nach endodontischen Maßnahmen und beobachteten, dass eine VRF erst 3 bis 5 Jahre nach dem erfolgreichen Abschluss einer Wurzelkanalbehandlung auftritt (Kramer et al. 2008). Diese Beobachtung wird von einer weiteren Untersuchung von PradeepKumar et al. (2016) unterstützt. Die Autoren stellten bezüglich des Zeitpunktes der Diagnosestellung einer VRF einen Häufigkeitsgipfel zwischen 2 und 5 Jahren nach Abschluss der endodontischen Behandlung fest (PradeepKumar et al. 2016). Es wird daher davon ausgegangen, dass eine VRF kein spontanes Phänomen ist, sondern eine Akkumulation vieler kleiner Mikrorisse

im Wurzelentin, die sich mit der Zeit und unter Kaubelastung sowie durch vorherige endodontische Behandlung letztendlich zu einer VRF entwickeln können (Onnink et al. 1994, Soros et al. 2008, Bier et al. 2009, Shemesh et al. 2009, Yoldas et al. 2012). Dabei führen unterschiedliche Präparations- und Obturationstechniken sowie Revisionsmaßnahmen in unterschiedlichem Ausmaß zur Schwächung des Dentins und somit zur Rissbildung (Versiani et al. 2015).

2.5 Einfluss der Wurzelkanalbehandlung auf die Rissbildung im Dentin

Zahlreiche Studien untersuchten den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen endodontischen Maßnahmen und der Entstehung von Dentinrissen (Onnink et al. 1994, Bier et al. 2009, Shemesh et al. 2009, 2011, Capar et al. 2014, Versiani et al. 2015). Dabei kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass jeder Schritt einer endodontischen Behandlung, sei es die chemo-mechanische Aufbereitung, die Obturation des Wurzelkanals oder Revisionsmaßnahmen, zu unterschiedlichen Ausprägungen von Dentinrissen führen kann.

2.5.1 Einfluss der chemo-mechanischen Aufbereitung

Bereits Onnink et al. (1994) beschrieben, dass die Wurzelkanalpräparation Dentindefekte erzeugen kann. Die Autoren zeigten, dass die Präparation mit Handinstrumenten in Zusammenhang mit der Step-back-Technik im Vergleich zu unpräparierten Zähnen zu signifikant mehr unvollständigen Frakturen im Dentin führte (Onnink et al. 1994). Seitdem gab es viele Entwicklungen auf dem Gebiet der Wurzelkanalpräparation, allen voran die Einführung maschineller Präparationstechniken mittels so genannter Nickel-Titan-Instrumente (NiTi). In den letzten Jahrzehnten wurden eine Vielzahl verschiedener Systeme und NiTi-Instrumente mit unterschiedlichen Konstruktions- und Designmerkmalen auf den Markt gebracht. Diese sollen im Hinblick auf die Reinigungswirkung und Formgebung im Vergleich mit den bisherigen Handinstrumenten effektiver sein, aber auch die Präparationszeit verkürzen und das Perforationsrisiko minimieren (Hülsmann et al. 2003, Schäfer et al. 2004, Guelzow et al. 2005, Schäfer et al. 2006a, b, Vaudt et

al. 2008). Bier et al. (2009) zeigten das Potenzial unterschiedlicher NiTi-Instrumente auf, Dentindefekte während der Wurzelkanalpräparation hervorzurufen. Dabei verglichen sie die Auswirkungen der manuellen Präparationstechnik auf das Dentin mit vier verschiedenen maschinellen NiTi-Systemen. Das Ergebnis ihrer Untersuchung belegte, dass die maschinelle Präparation mittels rotierender NiTi-Feilen im Gegensatz zu den Handinstrumenten signifikant mehr Risse erzeugte (Bier et al. 2009). Gleichzeitig stellten sie fest, dass Unterschiede zwischen den einzelnen rotierenden Systemen vorlagen und zeigten, dass Instrumente mit einer größeren Konizität deutlich mehr Risse im Dentin hervorrufen als Feilen mit geringerer Konizität (Bier et al. 2009). Wilcox et al. (1997) konstatierten, dass das Frakturrisiko der Wurzel steigt, je dünner die Dentinschicht wird. Somit sollte die Schwächung des Dentins durch übermäßige exzessive Präparation vermieden werden (Sathorn et al. 2005). Auch die Länge der Instrumentierung hat Auswirkungen auf die Rissbildung im Dentin (Adorno et al. 2011). Demnach sollte die Arbeitslänge 1 mm koronal der apikalen Konstriktion liegen und eine Überinstrumentierung des Kanals unbedingt vermieden werden, um das Risiko für eine vermehrte Rissbildung zu verringern (Adorno et al. 2011). Darüber hinaus beschrieben Kim et al. (2010), dass während der Wurzelkanalpräparation ein Stressmoment im Dentin entsteht, welches zur Rissbildung führen kann. Dieser Stress kommt durch den ständigen Kontakt zwischen Feile und Dentin zustande, wobei der Stressmoment an der apikalen Konstriktion oder in der Krümmung bei gekrümmten Kanälen am höchsten ist (Kim et al. 2010). Bei der Verwendung rotierender NiTi-Instrumente wird zusätzlich eine Rotationskraft auf die Dentinwände ausgeübt (Yoldas et al. 2012). Eine solche Kraft kann ebenfalls zur Ausbildung von Dentinrissen führen (Yoldas et al. 2012, Karataş et al. 2015). Der Ausprägungsgrad der Schädigung ist von dem Design, der Querschnittsgeometrie und der Konizität der verwendeten NiTi-Feilen abhängig (Kim et al. 2010, Yoldas et al. 2012).

Eine weitere Entwicklung auf dem Gebiet der maschinellen Präparation stellen NiTi-Instrumente dar, die durch einen reziproken Bewegungsmechanismus betrieben werden (Yared 2008). Diese besondere Funktionsweise beschreibt eine abwechselnde Bewegung des Instrumentes mit und gegen den Uhrzeigersinn, wodurch der Stressfaktor sowohl für das Dentin als auch für das Instrument reduziert werden soll (Bürklein et al. 2013). Es gibt keine einheitliche Übereinstimmung

bezüglich der Ergebnisse, ob reziproke oder rotierende Instrumente mehr Risse produzieren. Karataş et al. (2015) stellten keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Rissbildung zwischen rotierenden und reziproken NiTi-Systemen fest. Nach Bürklein et al. (2013) führte die Wurzelkanalpräparation mittels reziproker NiTi-Feilen im Vergleich zu rotierenden NiTi-Systemen zu signifikant mehr Rissen. Andere Studien belegten wiederum, dass die Präparation mit Hilfe reziproker NiTi-Instrumente signifikant weniger Risse als rotierende Systeme produzierte (Liu et al. 2013, Kansal et al. 2014, Monga et al. 2015). Übereinstimmend hingegen sind die Ergebnisse, dass die mechanische Präparation zur Entstehung von Dentinrissen jeglicher Art führen kann (Bier et al. 2009, Adorno et al. 2010, 2011, Yoldas et al. 2012, Bürklein et al. 2013, Kansal et al. 2014, Karataş et al. 2015, Pedullà et al. 2017).

Antibakterielle Spüllösungen sowie medikamentöse Einlagen sind neben der Präparation grundsätzliche Bestandteile der chemo-mechanischen Aufbereitung und sind somit für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung entscheidend (Siqueira et al. 2007, Hülsmann 2008, Rôças und Siqueira 2011). Diese desinfizierenden Substanzen können jedoch negative Auswirkungen auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Dentins haben und die Frakturanfälligkeit erhöhen. Sim et al. (2001) untersuchten die Auswirkungen zweier unterschiedlich stark konzentrierter Natriumhypochlorit (NaOCl)-Spülungen auf das Dentin und stellten dabei fest, dass erhöhte Konzentrationen von NaOCl die Elastizität und die Biegefestigkeit des Dentins reduzieren. Diese Aussage wird von Marending et al. (2007) unterstützt. Die Autoren untersuchten die mechanischen, chemischen und strukturellen Veränderungen des Dentins nach Exposition aufsteigender NaOCl-Konzentrationen. Die Ergebnisse der Studie zeigten einen konzentrationsabhängigen Effekt von NaOCl auf die Veränderung der organischen Dentinmatrix (Marending et al. 2007). Neben der NaOCl-Spülung besitzt die medikamentöse Einlage mit Kalziumhydroxid [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] wichtige antibakterielle Eigenschaften (Athassiadis et al. 2008, Rödiger et al. 2009). Andreasen et al. fanden in ihrer Studie von 2002 heraus, dass sich die Stabilität des Dentins mit zunehmender Liegedauer des Kalziumhydroxids stetig verringerte. Dabei verglichen sie Einwirkzeiten von 14, 30, 60, 90, 180, 270 und 360 Tagen und legten dar, dass sich die Bruchfestigkeit des Dentins ab dem 60.Tag signifikant reduzierte (Andreasen et al. 2002). In

einer Studie von Doyon et al. (2005) wurde ermittelt, dass Kalziumhydroxid erst bei einer Liegedauer von 180 Tagen eine potentiell negative Auswirkung auf die Frakturresistenz und die Integrität des Dentins zeigte.

2.5.2 Einfluss der Wurzelkanalfüllung

Für eine Wurzelkanalfüllung stehen unterschiedliche Obturationstechniken zur Verfügung. Jede Technik hat dabei das Potenzial, Risse im Wurzeldentin hervorzurufen oder bereits bestehende Risse zu vergrößern, sodass diese zur einer vertikalen Wurzelfraktur voranschreiten können (Wilcox et al. 1997). Obwohl die laterale Kompaktion die wohl bekannteste und am meisten praktizierte Obturationstechnik ist, birgt sie bei falscher Anwendung ein hohes Risiko für die Ausbildung von Frakturen (Wilcox et al. 1997). Wie bereits Dang und Walton (1989) und Wilcox et al. (1997) beschrieben, führt das Design des Spreaders, aber vor allem die eingesetzte Kraft, die während der lateralen Kompaktion auf die Kanalwände wirkt, zur Ausbildung von Dentinrissen. Der Einsatz von Fingerspreadern im Vergleich zu Handspreadern vermindert jedoch das Frakturrisiko (Lertchirakarn et al. 1999). Shemesh et al. (2009) stellten fest, dass die laterale Kompaktion im Vergleich zu einer passiven Kompaktionstechnik, bei der drucklos gefüllt wird, zu deutlich mehr Rissen führte. Gleichzeitig beobachteten sie, dass bereits die Wurzelkanalpräparation Risse im Dentin hervorruft, deren Anzahl allerdings durch eine anschließende Obturation des Kanals signifikant zunimmt (Shemesh et al. 2009). In einer weiteren Studie verglichen Shemesh et al. (2010), welche Auswirkung unterschiedliche Obturationstechniken im Zusammenhang mit einer vorherigen Präparation auf die Rissbildung haben. Dabei wurde die Guttapercha entweder lateral oder mit der *continuous-wave*-Technik kompaktiert. Die Autoren bestätigten, dass allein die Wurzelkanalpräparation Risse im Dentin hervorrufen kann. Eine anschließende Obturation mittels der lateralen Kompaktion von Guttapercha führte letztendlich zu signifikant mehr Rissen im Wurzeldentin. Der Vergleich beider Obturationstechniken ergab jedoch keinen signifikanten Unterschied (Shemesh et al. 2010).

Eine weitere Obturationsmethode stellt die warme vertikale Kompaktion dar. Bei dieser wird thermisch erweichte Guttapercha mit einem Plugger nach apikal kompaktiert und somit ein Verschluss des Wurzelkanals erreicht. Laut Telli et al. (1999)

ist die Voraussetzung zur Vermeidung von Rissbildungen eine sachgerechte Handhabung der Technik, bedingt durch einen reduzierten Kraftaufwand. Adorno et al. (2013) ermittelten, dass sowohl die laterale als auch die vertikale Kompaktion zur Vermehrung von Dentinrissen führte, aber es keinen signifikanten Unterschied zwischen den verglichenen Füllmethoden gab. Auch sie bestätigten die Annahme, dass bereits die Wurzelkanalpräparation die Entstehung von Dentinrissen begünstigt, wohingegen die Obturation zu einer weiteren Zunahme dieser Risse führt (Shemesh et al. 2009, 2010, Adorno et al. 2013). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Summe aller Kräfte, denen das Dentin während der Wurzelkanalbehandlung ausgesetzt wird, zur Ausbildung von Mikrorissen führen kann. Solche Mikrorisse können sich nach Abschluss der endodontischen Maßnahmen und mit der Zeit zu vertikalen Wurzelfrakturen entwickeln.

In der Literatur liegen zahlreiche Studien über den Einfluss der Wurzelkanalbehandlung auf die Rissentstehung im Dentin bis hin zur Entwicklung einer vertikalen Wurzelfraktur vor, dennoch mangelt es an einer Übereinstimmung bezüglich der Häufigkeit des Auftretens von Rissen. So variiert das Vorkommen von Mikrorissen je nach Studie von 0% bis zu 80% (Versiani et al. 2015). Diese massive Diskrepanz lässt sich vor allem auf Unterschiede bezüglich der Präparationsprotokolle, der Zahnauswahl, der Nomenklatur von Dentindefekten, der Lagerungsbedingungen der Proben, aber vor allem auf die Untersuchungsmethoden zur Beurteilung der Mikrorisse zurückführen (Versiani et al. 2015).

2.6 Methode zur Auswertung von Rissen im Wurzeldentin

2.6.1 Die Sägeschnitttechnik

Die bisher vorherrschende Untersuchungsmethode für die Auswertung von Mikrorissen ist die sogenannte Sägeschnitttechnik (Bier et al. 2009, Shemesh et al. 2010, Adorno et al. 2011, Barreto et al. 2012, Bürklein et al. 2013, Kansal et al. 2014, Karataş et al. 2015). Bei dieser Methode werden die Wurzeln nach Instrumentierung oder Obturation in unterschiedlich dicke, horizontale Scheiben zersägt. Diese Dentinscheiben werden anschließend mit und ohne Anfärben mit Hilfe eines Stereomikroskops auf Dentinrisse untersucht (**Abbildung 2-3, Abbildung 2-4**).

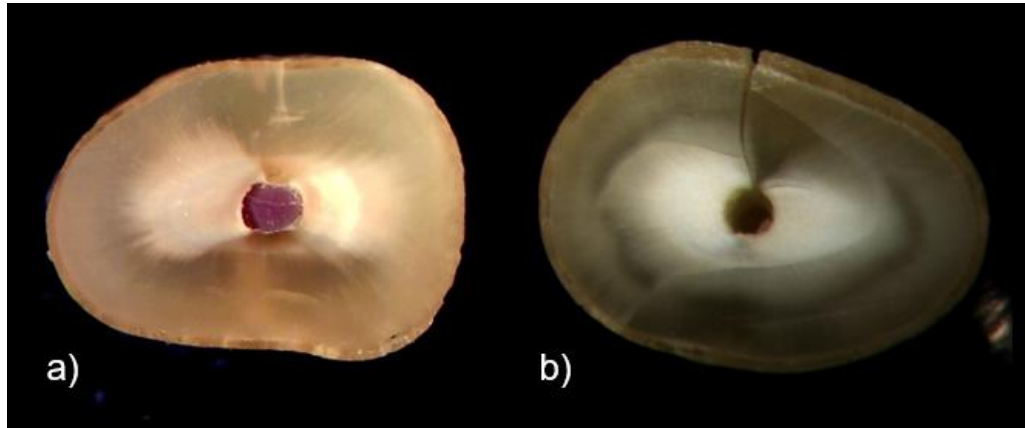


Abbildung 2-3: Horizontale Dentinscheiben zweier unterschiedlicher Wurzeln mit sichtbaren Mikrorissen (a) bzw. vollständiger Fraktur (b).



Abbildung 2-4: Horizontale Dentinscheibe einer Wurzel ohne erkennbare Mikrorisse.

Obwohl dies die gängigste Methode ist, herrscht auch hier keine einheitliche Vorgehensweise. So werden unter anderem unterschiedliche Schichtdicken der Scheiben (3, 6 und 9 mm versus 2, 4 und 6 mm) angegeben (Bürklein et al. 2013, Liu et al. 2013) sowie verschiedene Vergrößerungen von 8- bis 100fach verwendet (Shemesh et al. 2009, Adorno et al. 2010, Barreto et al. 2012, Yoldas et al. 2012, Arslan et al. 2014, Ustun et al. 2015, Dane et al. 2016), sodass eine Vergleichbarkeit der einzelnen Studien erschwert wird. Ein weiterer limitierender Faktor dieser Methode ist, dass nur eine gewisse Anzahl von Scheiben und nicht die Gesamtheit

der Wurzel für die Beurteilung herangezogen werden können. Zudem ist die präoperative Beurteilung des Dentins unmöglich, wodurch bereits vor dem Instrumentieren unklare Bedingungen über mögliche Risse im Dentin vorliegen (Hin et al. 2013, Karataş et al. 2015, Li et al. 2015, Saber und Schäfer 2016). Ein weiterer kritischer Aspekt dieser Methode ist der destruktive Charakter, da durch das Zersägen Zahnschubstanz verloren geht, sodass Informationen möglicherweise zerstört werden oder präoperative Dentinrisse gar nicht erst beurteilbar sind (Versiani et al. 2015). Zudem wird spekuliert, dass bereits das Zersägen der Wurzeln Dentinrisse hervorrufen kann (Bier et al. 2009, Adorno et al. 2010, Kansal et al. 2014, Karataş et al. 2015, Li et al. 2015, Pedullà et al. 2017). Diese Aussage widerlegen andere Autoren damit, dass sie keine Defekte oder Risse in ihren Kontrollgruppen gefunden haben (Bier et al. 2009, Adorno et al. 2010, Hin et al. 2013, Kansal et al. 2014, Saber und Schäfer 2016, Pedullà et al. 2017). Bei diesen Kontrollgruppen handelte es sich um unpräparierte Zähne, die lediglich zersägt wurden. Werden dabei keine Risse oder Defekte entdeckt, scheint der Prozess des Sägens keine Risse hervorzurufen (Bier et al. 2009, Adorno et al. 2010, Hin et al. 2013, Kansal et al. 2014, Saber und Schäfer 2016, Pedullà et al. 2017). In den Untersuchungen von Barreto et al. (2012) und Bürklein et al. (2013) hingegen wurden auch in der Kontrollgruppe Risse festgestellt. Diese Risse wurden jedoch als Artefakte bewertet, die durch Kräfte während der Extraktion oder durch übermäßige okklusale Kaubelastungen hervorgerufen wurden (Barreto et al. 2012, Bürklein et al. 2013).

2.6.2 Die Mikro-Computertomografie

2.6.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Die Mikro-Computertomografie (Mikro-CT) ist ein dreidimensionales Röntgenbildgebungsverfahren, mit dem eine nicht-invasive, hochauflösende Darstellung kleiner Objekte ermöglicht wird. Seit der Einführung in den 1980er Jahren stellt die Mikro-CT (Feldkamp et al. 1989) eine Weiterentwicklung der bis dato klinisch etablierten Computertomografie (CT) dar. Das Funktionsprinzip (**Abbildung 2-5**) basiert darauf, dass ein Objekt aus verschiedenen Richtungen mit Röntgenstrahlen bestrahlt und dabei die Strahlungsintensität nach dem Durchdringen des Objektes durch einen Detektor erfasst wird. Der Detektor nimmt folglich eine Serie von

zweidimensionalen Röntgenbildern, auch Projektionen genannt, auf. Anschließend werden die Projektionen durch den als „Rekonstruktion“ bezeichneten Berechnungsprozess in 2D-Querschnittbilder generiert. Diese Schnittbilder wiederum können zu einem dreidimensionalen Modell zusammengefügt und das Innere des Objektes analysiert werden. Feldkamp et al. (1984) entwickelten den für die Rekonstruktion notwendigen Algorithmus.

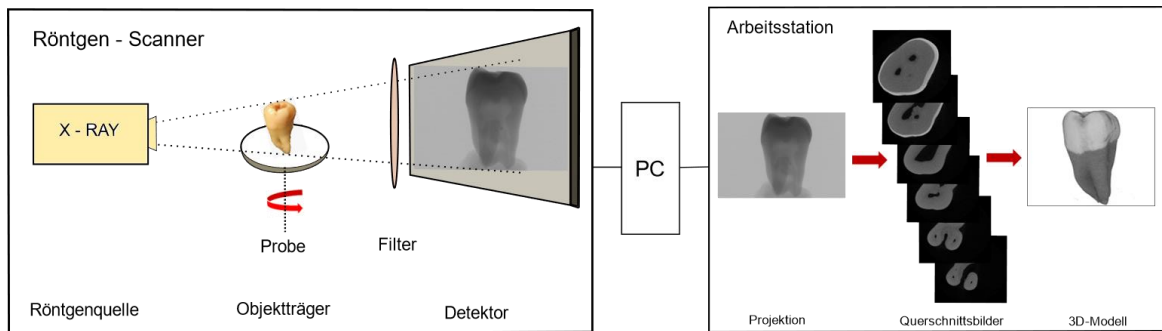


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Mikro-CT.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem CT und dem Mikro-CT liegt in der Auflösung der resultierenden Bilder, welches wiederum durch einen unterschiedlichen Aufbau der Anlage erreicht wird. Mikro-CT-Geräte geben Strukturen mit einer Ortsauflösung von 5 - 50 μm wieder, wohingegen die Wiedergabe bei einem herkömmlichen CT von maximal 1 mm möglich ist (Engelke et al. 1999). Um eine solche hohe Auflösung zu erreichen, wird eine Strahlungsquelle mit kleinerer Fokusgröße benötigt. Aus diesem Grund kommen bei den Mikro-CT-Geräten entweder Synchrotronstrahlungsquellen oder optimierte Fein- und Mikrofokusröntgenröhren mit Transmissions- oder Reflektionsanoden zum Einsatz (Engelke et al. 1999). Mit der Verringerung der Fokusgröße geht einher, dass die Röhrenleistung reduziert wird und somit die Intensität abnimmt. Daraus ergibt sich, dass beim Mikro-CT lediglich kleine Objekte (< 7 cm) bei gleichzeitig verlängerten Scanzzeiten (Minuten bis Stunden) gescannt werden können (Engelke et al. 1999). Ein weiteres Merkmal im Aufbau des Mikro-CT besteht darin, dass das Objekt mittels eines Drehtellers im Inneren rotiert wird, wohingegen sich die Röntgenquelle und der Detektor im CT um die Probe bewegen.

In der vorliegenden Studie wurde der Mikro-Computertomograf SkyScan 1272 (Bruker microCT, Kontich, Belgium) verwendet. Der SkyScan 1272 ist ein kompak-

tes Desktop-Mikro-CT-System und besteht wesentlich aus zwei Komponenten, die miteinander verbunden sind. Zum einen aus dem Röntgen-Scanner und zum anderen aus der Arbeitsstation (**Abbildung 2-6**).

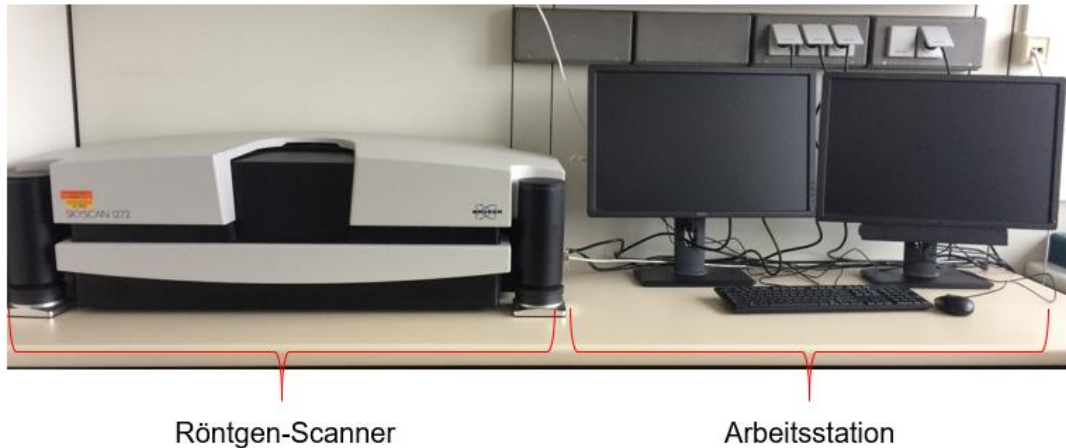


Abbildung 2-6: Bestandteile des SkyScan 1272.

Der Röntgen-Scanner beinhaltet eine Röntgenquelle, einen rotationsfähigen, beweglichen Objektträger sowie einen Detektor. Bei der Röntgenquelle handelt es sich um eine Mikrofokusröntgenröhre, welche die Röntgenstrahlen erzeugt. Die Einstellung der Intensität bzw. des Energiespektrums der Strahlung wird durch die Stromstärke bzw. die Spannung über die Kontroll-Software reguliert. Außerdem ist die Röntgenröhre mit einer Blende versehen, welche die Belichtungszeit kontrolliert. Im Zentrum des Röntgen-Scanners befindet sich der rotierende Objektträger, auf dem die Probe positioniert wird. Um die Probe ideal zur Röntgenquelle und zum Detektor auszurichten, kann der Objektträger sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung bewegt werden. Der Detektor besteht aus einer dünnen Szintillatorschicht und zwei CCD (*charge coupled device*) - Kameras (16 MP und 11 MP), die durch Fiberglas miteinander verbunden sind. Der Szintillator wandelt die auftreffenden Photonen der Röntgenstrahlung in sichtbares Licht um, welches von den Kameras erfasst und in elektrische Signale umgesetzt wird. Darüber hinaus befindet sich dem Detektor vorgeschaltet ein Rad mit fünf verschiedenen Metallfiltern. Das Energiespektrum der Röntgenstrahlung kann durch die Regulierung der Spannung sowie die Auswahl der Filter reguliert werden. Die Arbeitsstation, bestehend aus einem Computer und zwei Monitoren, verarbeitet die elektrischen

Signale des Detektors. Die Arbeitsstation beinhaltet eine Kontroll-Software, mit der der Röntgen-Scanner bedient, kontrolliert und eingestellt wird. Weiterhin enthält die Station sämtliche Software-Pakete, die für die Rekonstruktion, Datenanalyse und Visualisierung notwendig sind. Alle Beschreibungen der Hard- und Software sind den Herstellerangaben entnommen (Skyscan 1272 User Manual, Bruker).

2.6.2.2 Das Mikro-CT in der Endodontologie

Das Mikro-CT hat in der Endodontologie seit mehr als einem Jahrzehnt zunehmend an Bedeutung gewonnen. Mit Hilfe dieser neuen, nicht-destruktiven Untersuchungstechnik konnten in zahlreichen Studien auf den Gebieten der Wurzelanatomie (Peters et al. 2000, Gu et al. 2009, Versiani et al. 2013), der chemo-mechanischen Aufbereitung (Peters et al. 2001, Moore et al. 2009, Paqué et al. 2010), der Wurzelkanalfüllung (Jung et al. 2005, Hammad et al. 2009) sowie der Revisionsbehandlung (Hammad et al. 2008, Roggendorf et al. 2010, Rödiger et al. 2014) weitere wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Die Autoren erkannten das Potenzial des Mikro-CT als ein non-invasives, bildgebendes Verfahren, um eine präzise dreidimensionale Darstellung der Probe zu erhalten und diese auszuwerten. So zeigten erstmalig die Mikro-CT-Aufnahmen in der Studie von Berman und Kuttler (2010) deutliche Dentinrisse. Obwohl es nicht der Hauptaspekt der Untersuchung war, demonstrierten die Autoren indirekt, dass es möglich ist, Risse im Wurzeldentin anhand des Mikro-CT darzustellen. Erst mit der Studie von De-Deus et al. (2014) rückte die Technik als eine geeignete Untersuchungsmethode für die Darstellung von Mikrorissen im Zusammenhang mit unterschiedlichen endodontischen Maßnahmen in den Fokus. Die Autoren untersuchten erstmalig mittels dieses Verfahrens die Auswirkung der maschinellen Wurzelkanalpräparation hinsichtlich des Auftretens von Mikrorissen im Wurzeldentin. Dabei konnten sie nachweisen, dass alle postoperativen Mikrorisse bereits in den präoperativen Aufnahmen vorhanden waren. Daraus schlussfolgerten De-Deus et al. (2014), dass es keinen kausalen Zusammenhang hinsichtlich der Wurzelkanalpräparation und der Rissbildung im Wurzeldentin gibt. In einer weiteren Untersuchung von De-Deus et al. (2015) wurde diese Aussage bekräftigt. Das Mikro-CT zeigt eine genauso gute Zuverlässigkeit bei der Visualisierung von Dentinrisse wie die optische Mikroskopie, die bei der sogenannten horizontalen Sägeschnitttechnik ver-

wendet wird (De-Deus et al. 2016). Mit Hilfe des neuen Verfahrens ist es möglich, Mikrorisse in Proben sowohl vor als auch nach endodontischen Maßnahmen auf nicht-destruktive Weise zu beurteilen. Zeitgleich dienen die Proben als ihre eigene Kontrollgruppe. Dadurch lässt sich bei aufeinander folgenden endodontischen Maßnahmen gut nachvollziehen, ob Risse bereits vor Beginn der Untersuchung vorhanden waren oder ob die zu untersuchenden Maßnahmen neue Risse hervorgerufen haben (De-Deus et al. 2015). Es folgten weitere Studien, in denen unterschiedliche maschinelle NiTi-Systeme und deren Potenzial, Mikrorisse hervorzurufen mit Hilfe der neuen Methode untersucht wurden. Sämtliche dieser Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass die Wurzelkanalpräparation keinen Einfluss auf die Entstehung von Dentinrissen hat (De-Deus et al. 2016, Bayram et al. 2017, Zuolo et al. 2017). Ceyhanli et al. (2016) fanden in ihrer Studie hingegen heraus, dass die Wurzelkanalpräparation zu einer signifikanten Zunahme von Mikrorissen führte. Die Autoren erklärten ihre Beobachtungen damit, dass in ihrer Untersuchung Zähne mit einem deutlich größeren Krümmungsradius verwendet wurden (Ceyhanli et al. 2016). Unterschiedliche Scan- und Rekonstruktionsparameter, Unterschiede in der Auflösung und der Anzahl der ausgewerteten Querschnittsbilder, aber auch eine Fehlinterpretation digitaler Artefakte könnten ebenfalls zu abweichenden Ergebnissen geführt haben (Bayram et al. 2017). Wiederum zeigte eine andere Mikro-CT-Analyse, dass auch unabhängig von der Arbeitslänge die angewandten Präparationstechniken keine apikalen Dentindefekte erzeugten (de Oliveira et al. 2017). Des Weiteren nutzten De-Deus et al. (2017) das Mikro-CT für die Beurteilung unterschiedlicher Obturationstechniken und das Auftreten von Dentinrissen. Dabei wurden Scans jeweils vor und nach der Präparation sowie nach erfolgter Obturation angefertigt. Bei der Analyse der Scans stellten die Autoren fest, dass dieselben Mikrorisse in den wurzelkanalgefüllten Zähnen bereits in den Aufnahmen sowohl vor als auch nach der Präparation zu sehen waren. Demzufolge wurde schlussgefolgert, dass die untersuchten Obturationstechniken keine neuen Mikrorisse induzierten (De-Deus et al. 2017). Laut den Ergebnissen jüngster Veröffentlichungen hat die Wurzelkanalbehandlung keinen Einfluss auf die Rissentwicklung im Dentin (Bayram et al. 2017, De-Deus et al. 2017, de Oliveira et al. 2017, Shemesh et al. 2018). Diese Erkenntnis widerspricht der bisherigen Auffassung. Eine mögliche Erklärung der beiden konträren Ansichten ist in dem methodischen Ansatz der Untersuchungen (Mikro-CT versus Sägeschnitttechnik) zu

finden (De-Deus et al. 2015, 2016, 2017, de Oliveira et al. 2017). Darüber hinaus wurde spekuliert, dass die Lagerungsbedingung der extrahierten Zähne vor, während und nach den endodontischen Maßnahmen das Auftreten von Mikrorissen beeinflussen kann (Versiani et al. 2015, De-Deus et al. 2016, Saber und Schäfer 2016, De-Deus et al. 2017). Durch die Dehydrierung des Dentins findet ein Verlust des gebundenen Wassers aus der Kollagenmatrix statt (Agee et al. 2015), wodurch das mechanische Verhalten des Dentins negativ beeinflusst wird (Shemesh et al. 2018). Demzufolge wurde vermutet, dass es zur Entstehung und / oder spontanen Ausbildung neuer Mikrorisse kommen kann (Versiani et al. 2015). Die Angaben in früheren Mikro-CT-Studien sind jedoch bezüglich der Lagerungsbedingungen der extrahierten Zähne inhomogen. Die Mehrheit der Autoren gaben eine Lagerung der Proben in einer 0,1%igen Thymol-Lösung bei 5 °C an (De-Deus et al. 2014, 2015, 2016, 2017, Zuolo et al. 2017). Bayram et al. (2017) und de Oliveira et al. (2017) machten diesbezüglich keine Angaben. Ebenso wurde in den meisten Studien nicht berichtet, welche Bedingungen bezüglich des Feuchtigkeitsgehaltes der Zahnproben unmittelbar vor und während des Scanvorgangs vorlagen (De-Deus et al. 2015, Ceyhanli et al. 2016, De-Deus et al. 2016, Bayram et al. 2017, Zuolo et al. 2017). Lediglich eine Studie gab an, dass der Zahn vor der Durchführung der endodontischen Maßnahmen zunächst in einer 0,1%igen Thymol-Lösung gelagert, aber die 25-minütige Scanprozedur unter trockenen Bedingungen durchgeführt wurde (De-Deus et al. 2017). Nach Auswertung der Aufnahmen wurden keine neuen Mikrorisse festgestellt. Somit schlussfolgerten die Autoren, dass weder die Austrocknung des Dentins während des Scanverfahrens noch die endodontischen Maßnahmen einen Effekt auf die Entwicklung neuer Risse ausüben (De-Deus et al. 2017). In einer kürzlich veröffentlichten Studie von Shemesh et al. (2018) wurde der Zusammenhang zwischen der Dehydrierung und der Rissentwicklung an nicht präparierten sowie an präparierten Proben untersucht. Dabei wurden die Auswirkungen der zunehmenden Dehydrierungsvorgänge auf das Dentin mit zwei unterschiedlichen Methoden analysiert. Zum einen wurde die herkömmliche Sägeschnitttechnik angewandt und zum anderen kam das Mikro-CT-Verfahren zum Einsatz. Die Autoren konnten anhand der Mikroskop- sowie der rekonstruierten Querschnittsbilder eine Zunahme an Rissen in den dehydrierten Proben unabhängig von der Wurzelkanalpräparation nachweisen (Shemesh et al. 2018).

3 Ziel der Untersuchung

Das Ziel dieser In-vitro-Studie war es, den Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts des Wurzelkanal Dentins auf den Nachweis von Mikrorissen mittels der Mikro-Computertomografie zu untersuchen. Darüber hinaus wurde überprüft, inwiefern eine Austrocknung der Wurzeln die Entstehung neuer Risse begünstigt.

4 Material und Methode

4.1 Auswahl und Vorbereitung der Zähne

Für die Studie wurden nach Genehmigung des Ethikkomitees (Antragsnummer 27/8/13) mit Einverständniserklärung der Patienten insgesamt 20 extrahierte Oberkiefermolaren und Unterkieferprämolaren gesammelt. Die Extraktion der Zähne stand in keinem Zusammenhang mit der vorliegenden Untersuchung. Während des ganzen Studienverlaufs wurden die verwendeten Zähne in einer 1%igen Thymol-Lösung feucht gehalten, um eine Austrocknung zu vermeiden.

Für die Vorauswahl der Zähne wurden folgende Einschlusskriterien festgelegt:

- Unterkieferprämolaren und Oberkiefermolaren mit abgeschlossenem Wurzelwachstum und intaktem Apex
- Keine vorangegangene Wurzelkanalbehandlung

Nach der Vorauswahl wurden die Zähne zunächst mit einem wasserfesten Stift durchnummeriert, um späteren Verwechslungen vorzubeugen. Anschließend wurde mit Hilfe eines hoctourigen Winkelstücks (KaVo, Biberach/Riß) und eines Diamanten (Komet, Lemgo) unter Wasserkühlung eine Zugangskavität angelegt. Es folgte die Sondierung der Wurzelkanäle mit einem Reamer der ISO-Größe 10 (Dentsply, Konstanz). Zähne, die obliterierte Wurzelkanäle aufwiesen und somit nicht vollständig bis zum Foramen apicale gängig waren, wurden aus der Studie ausgeschlossen.

Es wurden ausschließlich die palatinale Wurzel der Oberkiefermolaren verwendet. Dafür wurden die palatinalen Wurzeln unter Wasserkühlung mit einer diamantierten Trennscheibe (Komet, Lemgo) im Bereich der Trifurkation abgetrennt.

Im nächsten Schritt erfolgte mit derselben diamantierten Trennscheibe die Kürzung aller Zähne von koronal auf eine standardisierte Wurzelkanallänge von 15 mm. Hierfür wurde ein auf 15 mm markierter Reamer der ISO-Größe 10 in den Wurzelkanal eingeführt, bis die Instrumentenspitze am Foramen apicale sichtbar war. Anschließend wurde die Markierung auf die Zahnoberfläche übertragen und die Krone entsprechend gekürzt. Im Anschluss wurden die vorbereiteten Wurzeln

mit folgenden Parametern in bucco-lingualer und mesial-distaler Richtung digital geröntgt (Trophy Elitys, Croissy-Beaubourg, Frankreich): Röhrenspannung 70 kV, Röhrenstrom 4 mA, Belichtungszeit 0,035 s. Es wurden ausschließlich Wurzeln mit einem einzelnen Wurzelkanal ausgewählt.

Die verbliebenen Wurzeln wurden unter 25-facher Vergrößerung mit Hilfe eines Stereomikroskops (Zeiss Stemi SV 11, Carl Zeiss, Jena) aus vier verschiedenen Ebenen auf Mikrorisse, Frakturen, Karies und sonstige Defekte inspiziert. Mit Hilfe einer am Mikroskop befestigten digitalen Kamera (Motic 3.0 MP, Motic Deutschland GmbH, Wetzlar) wurde pro Wurzel und Ebene jeweils ein Bild angefertigt. Anschließend wurden die Fotografien mit einer Software (Motic Images Plus 2,0, Motic Deutschland GmbH, Wetzlar) kritisch auf Mikrorisse analysiert und die definitive Auswahl getroffen. Letztendlich wurden jeweils fünf Wurzeln mit und ohne sichtbare Risse für die weitere Untersuchung ausgewählt (**Abbildung 4-1**, **Abbildung 4-2**). Es erfolgte eine erneute Nummerierung der Proben mit einem wasserfesten Stift für den weiteren Versuchsablauf (**Tabelle 4-1**).

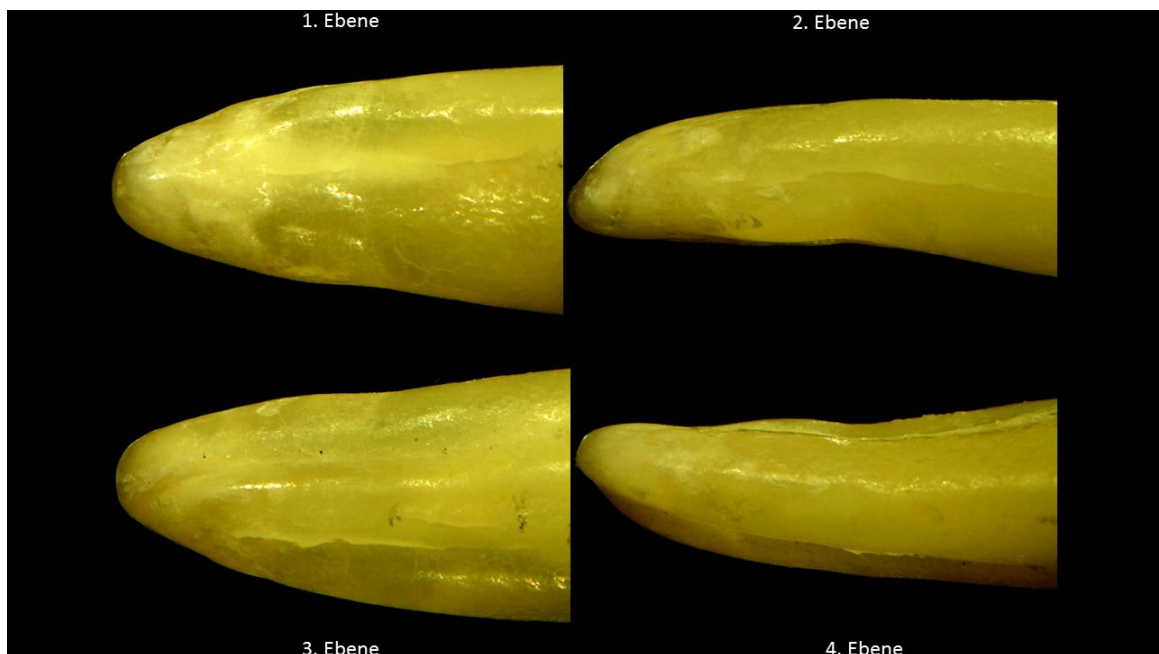


Abbildung 4-1: Stereomikroskopische Aufnahmen einer Wurzel mit sichtbaren Rissen in den unterschiedlichen Ebenen.

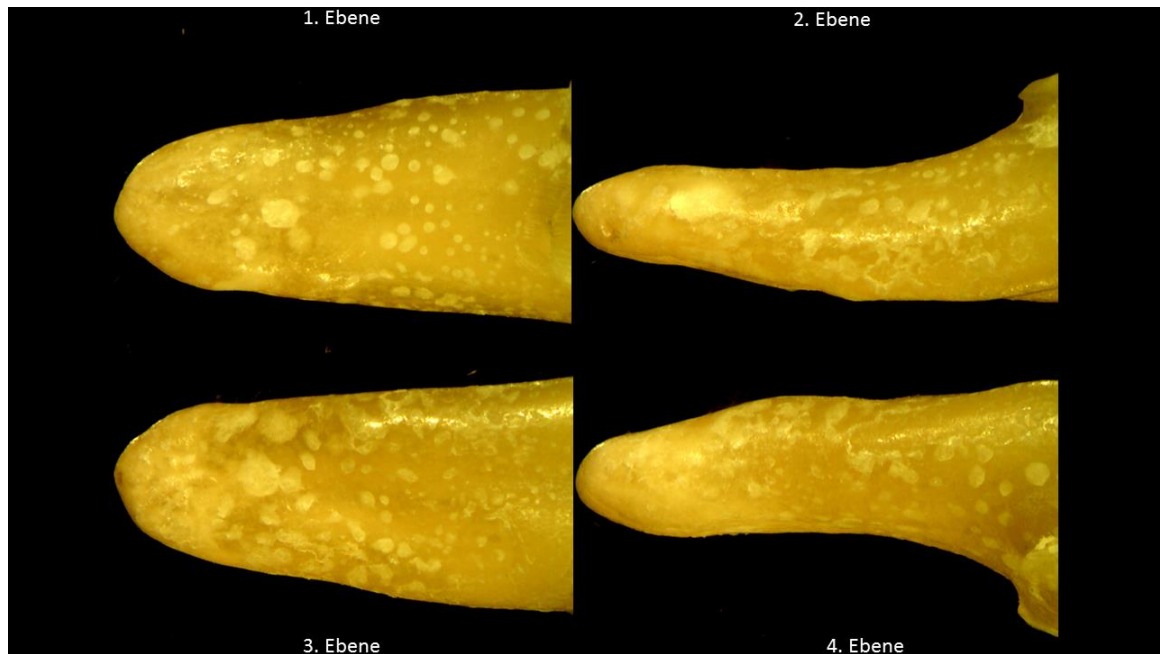


Abbildung 4-2: Stereomikroskopische Aufnahmen einer Wurzel ohne Risse in den vier verschiedenen Ebenen.

Tabelle 4-1: Nummerierung der verwendeten Wurzeln.

UK = Unterkieferprämolar; OK = Oberkiefermolar (palatinale Wurzel)

Wurzeln mit Rissen	Wurzeln ohne Risse
UK – 1	OK – 6
UK – 2	OK – 7
UK – 3	OK – 8
UK – 4	OK – 9
OK – 5	OK – 10

4.2 Mikro-CT-Untersuchung

Die zehn Wurzeln wurden mit Hilfe des Mikro-Computertomografen SkyScan 1272 (Bruker microCT, Kontich, Belgium) eingescannt und dreidimensional rekonstruiert. Dabei wurde jede einzelne Wurzel in einer definierten Reihenfolge und unter standardisierten Feuchtigkeitsbedingungen sechsmal hintereinander eingescannt (**Abbildung 4-3**).

4.2.1 Scanprotokoll

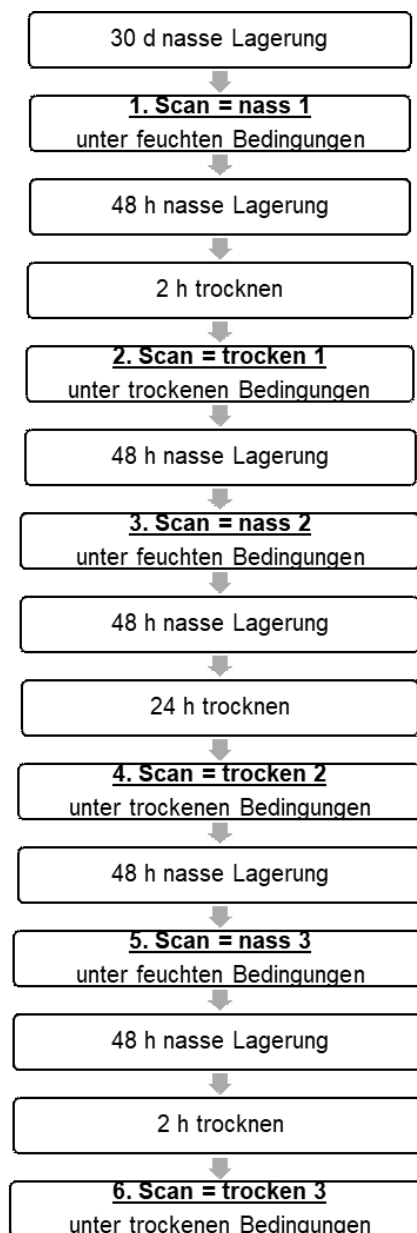


Abbildung 4-3: Überblick über den Scanablauf.

Zu Beginn des Versuchs wurden die Wurzeln für 30 Tage in einer 1%igen Thymol-Lösung gelagert. Nach jedem Scanvorgang erfolgte eine 48-stündige Zwischenlagerung der Proben in dieser Flüssigkeit. Die Scanvorgänge 1, 3 und 5 wurden unter feuchten Bedingungen durchgeführt, indem die Wurzeln während des Scanvorgangs auf einem feuchten Schaumstoff gelagert wurden. Die Scans 2, 4 und 6 hingegen fanden unter trockenen Bedingungen statt, wobei die Wurzeln auf einem trockenen Stück Schaumstoff positioniert wurden. Vor dem 2. und 6. Scan wurden die Wurzeln für zwei Stunden und vor dem 4. Scan für 24 Stunden getrocknet.

Um ein Verrutschen der Probe während der Rotationsbewegung zu vermeiden, wurden die Wurzeln mit Hilfe von Schaumstoff in einem durchsichtigen Röhrchen von oben und unten fixiert (**Abbildung 4-4**) und anschließend im Scanner platziert (**Abbildung 4-5**).



Abbildung 4-4: Fixierung der Wurzeln mit Hilfe von Schaumstoff, der je nach Scanvorgang nass oder trocken verwendet wurde.

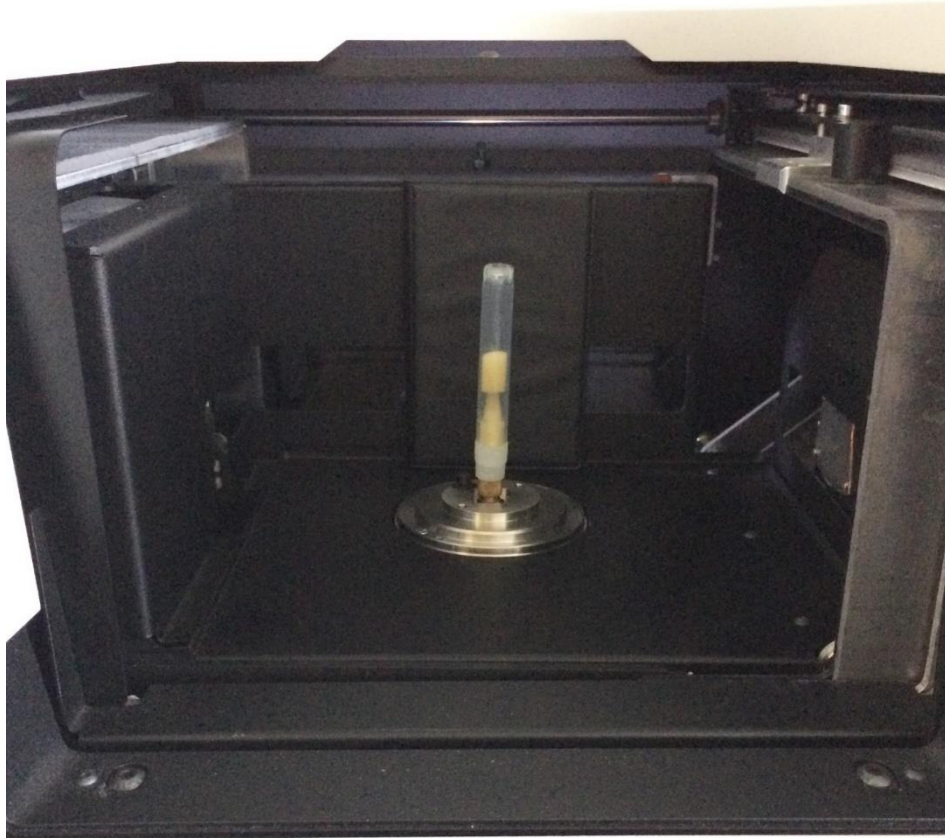


Abbildung 4-5: Positionierung der Probe im Scanner.

Die korrekte Position der Probe wurde vor dem eigentlichen Scan mit Hilfe einer kontinuierlichen Röntgenaufnahme kontrolliert und der Objektträger gegebenenfalls durch eine Höhen- und Mittenverschiebung korrigiert. Vorweg wurde einmalig und für alle nachfolgenden Scanvorgänge eine Kalibrierung des Bildes, die *flat-field*-Korrektur, d. h. ein Schwarz-Weiß-Abgleich ohne Probe durchgeführt. Anschließend wurde jeder Scan mit festgelegten Parametern durchgeführt, wobei die Röhrenspannung 80 kV und der Röhrenstrom 125 μ A betrug. Zusätzlich wurden die Röntgenstrahlen durch einen 1 mm dicken Aluminiumfilter geleitet. Bei allen Scans wurde ein *frame averaging* von 3 ausgewählt, sodass aus drei aufgenommenen Projektionen ein Bild berechnet wurde um das Bildrauschen zu reduzieren. Des Weiteren wurde die Probe während eines Scans um 180° mit Rotationsschritten von 0,2° gedreht, sodass insgesamt 940 Bilder aufgenommen wurden. Die effektive Pixelgröße betrug 10,5 μ m bei einem Detektor-Modus von 2 x 2. Die Be-

lichtungszeit betrug für jede Projektion 2,2 s, woraus eine Aufnahmedauer für jeden Scan von 122 min resultierte. Die während des Scans erzeugten Projektionen wurden automatisch im tiff-Format abgespeichert, wobei jeder Scanvorgang unter der Bezeichnung der Wurzel und der Nummer des Scans (Feuchtigkeitszustand – vgl. **Abbildung 4-3**) abgelegt wurde.

4.2.2 Rekonstruktion

Die Rekonstruktion der zweidimensionalen Projektionen zu einer dreidimensionalen Abbildung erfolgte mit Hilfe der NRecon Software (Bruker microCT). Um die Qualität der rekonstruierten Bilder zu erhöhen, wurden mögliche Artefakte mit Hilfe von Korrekturmaßnahmen wie *beam-hardening*, *post-alignment*, *ring-artefact* und *smoothing* ausgeglichen.

Zu Beginn jedes Rekonstruktionsvorgangs wurde mit Hilfe der *xy alignment with a reference scan*-Funktion die thermische Drift-Korrektur vorgenommen. Hierdurch wurden mögliche Bewegungen der Probe während des Scanvorgangs ausgeglichen. Dabei werden nach dem eigentlichen Scanvorgang zusätzliche Bilder in größeren Abständen aufgenommen, um diese bei der Drift-Korrektur mit Projektionen der gleichen Position zu vergleichen und gegebenenfalls zu korrigieren.

Mit der *post-alignment*-Korrektur wurden manuell für jeden aufgerufenen Datensatz etwaige mechanische Fehlausrichtungen während des Scanvorgangs kompensiert, wobei Werte zwischen -3,5 und 4 ausgewählt wurden. Dies ist ein sehr entscheidender Vorgang, da eine falsche Ausrichtungskompensation zu Verzerrungen oder Flügelbildung im rekonstruierten Bild führt (**Abbildung 4-6**).

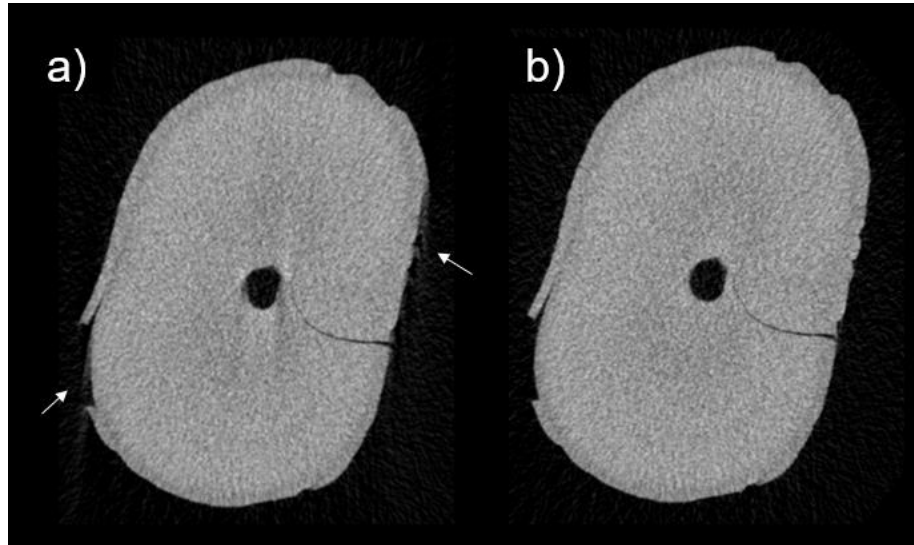


Abbildung 4-6: Darstellung eines rekonstruierten Schnittbildes mit einem *post-alignment*-Wert von 0,5 (a) und einem Wert von -3,5 (b). Die Pfeile zeigen die Flügelbildung bei einem schlecht gewählten *post-alignment*-Wert.

Bei der *beam-hardening*-Korrektur wird die Strahlungsaufhärtung korrigiert. Diese entsteht beim Scannen, wenn während der Durchdringung des Objektes die niederenergetischen Photonen der polyenergetischen Strahlung stärker absorbiert werden. Dadurch entstehen anschließend bei der Rekonstruktion Artefakte, die an der Kontur der rekonstruierten Proben als dunkle Ränder sichtbar werden (**Abbildung 4-7**). Um diese Artefakte zu minimieren, wurde bereits bei den Scansvorgängen ein 1 mm dicker Aluminiumfilter ausgewählt und zusätzlich bei der Rekonstruktion ein *beam-hardening*-Wert von 60% eingestellt.

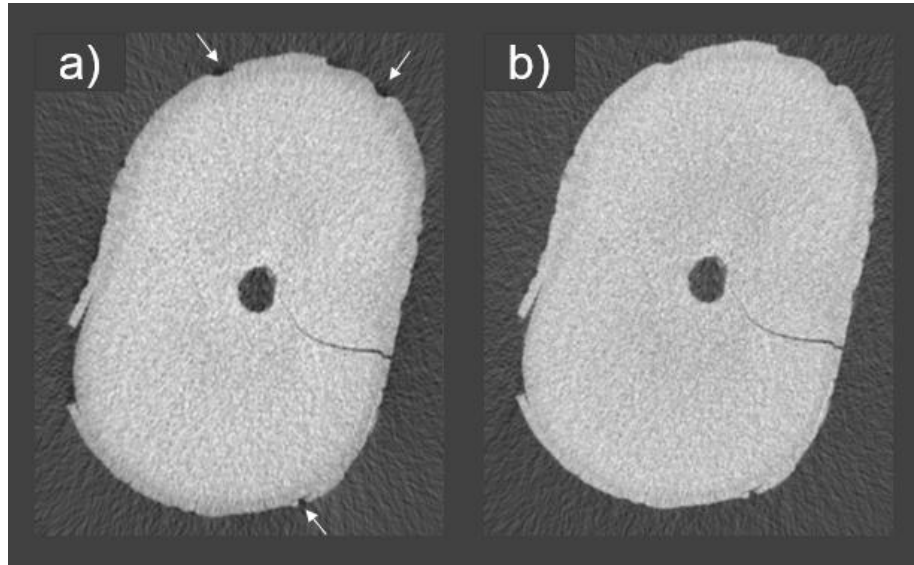


Abbildung 4-7: Darstellung eines rekonstruierten Schnittbildes mit einem *beam-hardening*-Wert von 90% (a) und einem Wert von 60% (b). Die Pfeile zeigen die Aufhärtingsartefakte bei einem schlecht gewählten *beam-hardening*-Wert.

Ein weiteres, oft auftretendes Artefakt in den rekonstruierten Bildern ist das sogenannte Ring-Artefakt (**Abbildung 4-8**). Es entsteht während des Scanvorgangs durch kleine Pixel-Defekte auf dem Detektor, Temperaturunterschiede oder Staubpartikel. Daher wurden bei den Rekonstruktionen Werte von 11-15 zur Reduktion der Ringartefakte gewählt.

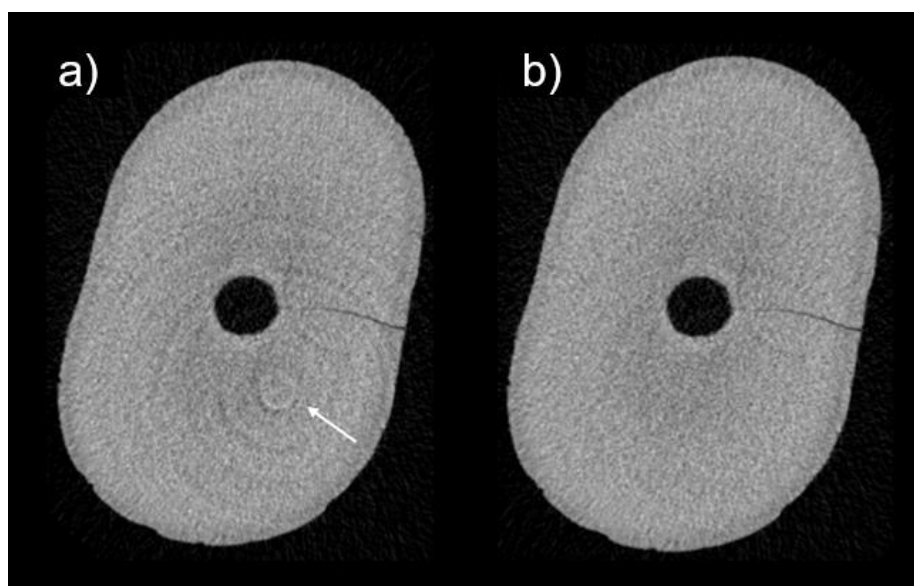


Abbildung 4-8: Darstellung eines rekonstruierten Schnittbildes mit einem *ring-artefact*-Wert von 3 (a) und einem Wert von 11 (b). Der Pfeil zeigt auf die ring-

förmigen Artefakte bei einem schlecht gewählten *ring-artefact*-Wert.

Zum Schluss wurde für alle Rekonstruktionen ein *smoothing*-Wert von 0 eingestellt, da gegebenenfalls die Abbildungen durch eine Glättung verfälscht und somit vor allem kleine Risse im Dentin möglicherweise nicht mehr erkennbar wären (**Abbildung 4-9**).

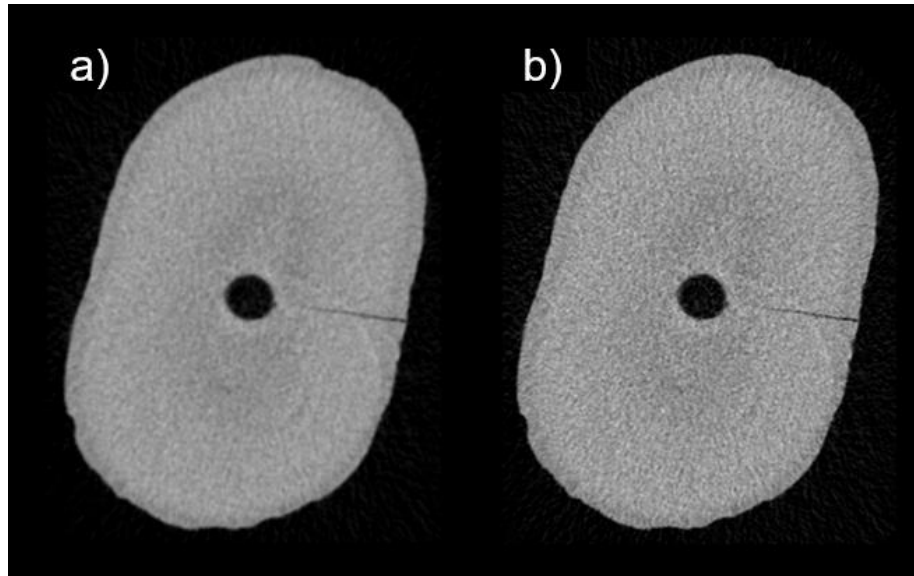


Abbildung 4-9: Darstellung eines rekonstruierten Schnittbildes mit einem *smoothing*-Wert von 4 (a) und einem Wert von 0 (b).

Insgesamt wurden pro Rekonstruktion 1400 bis 1600 Querschnittsbilder generiert. Die rekonstruierten Tomografie-Daten wurden ebenfalls für die jeweilige Wurzel und dem dazugehörigen Scan abgespeichert.

4.2.3 3D-Registrierung

Pro Wurzel wurden jeweils sechs Scanvorgänge mit unterschiedlichen Feuchtigkeitsbedingungen des Wurzeldentins durchgeführt. Da die jeweilige Probe nicht bei allen Scans exakt dieselbe Positionierung im Mikro-CT aufwies, mussten die rekonstruierten Bilder möglichst exakt zueinander ausgerichtet werden, um bei den Rekonstruktionen vergleichbare Querschnittsbilder für die jeweilige Wurzel zu erhalten. Zunächst wurden die Schnittbilder mit dem Data Viewer (Bruker microCT) betrachtet und anschließend die 3D-Registrierung vorgenommen. Dabei

wurde aus dem rekonstruierten Datensatz der jeweiligen Wurzel ein Schnittbild als Referenzbild festgelegt, zu dem alle anderen Schnittbilder der weiteren Scans ausgerichtet wurden. Für eine bestmögliche Übereinstimmung wurden die rekonstruierten 3D-Bilder in allen drei Ebenen an das Referenzbild angepasst (**Abbildung 4-10**). Diese Datensätze wurden erneut als *reference-target*-Querschnittsbilder abgespeichert und anschließend für die weiteren Analysen verwendet.

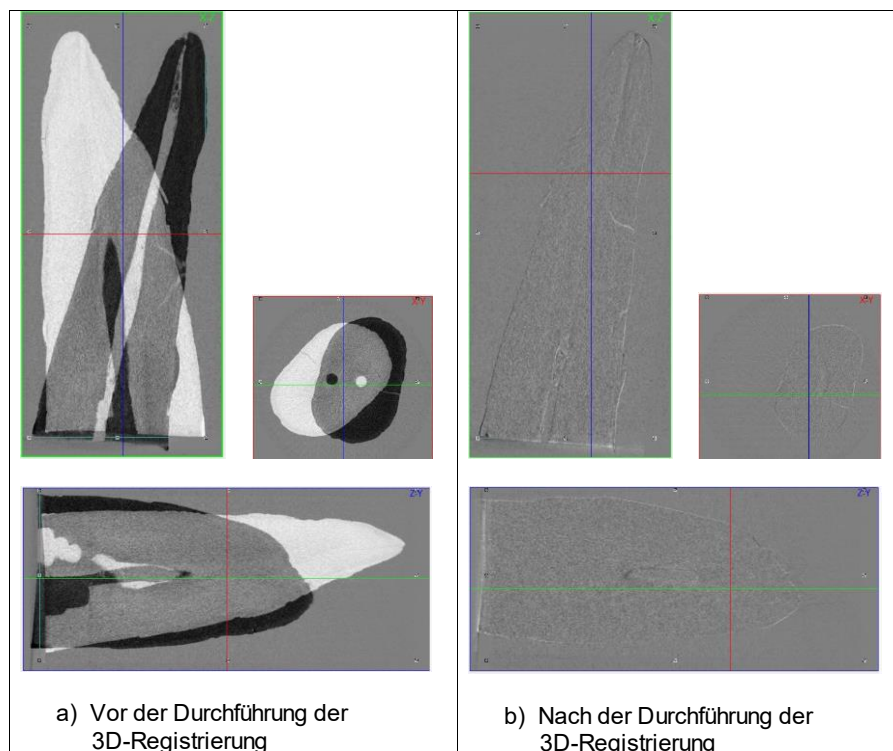


Abbildung 4-10: Darstellung a) zeigt Situation vor der dreidimensionalen Überlagerung. Die drei Bilder stellen jeweils eine Ebene dar (X-Z-grün, X-Y-rot, Z-Y-blau). Die schwarze Kontur dient als *target*-Wurzel, an die jeweils eine *referent*-Wurzel (weiße Kontur) angepasst wurde. Darstellung b) zeigt die Situation, wenn beide Wurzeln zueinander ausgerichtet wurden, wobei beide Konturen zu einer gemeinsamen grauen Kontur verschmelzen.

4.3 Analyse ausgewählter Bilder

Für die Bewertung der Mikrorisse im Wurzelentin wurden lediglich die apikalen 12 mm der Wurzel betrachtet. Dabei wurden von jeder Wurzel vom Apex in 1 mm-Schritten vergleichbare Querschnittsbilder extrahiert, sodass insgesamt 780 Bilder für die Analysen zur Verfügung standen. Zu Beginn der Auswertung wurden 72 Bilder aus der Analyse ausgeschlossen, da bei den palatinalen Wurzeln der Wurzelkanal in den weiter koronal liegenden Segmenten bereits in die Furkation auslief und somit nicht zirkulär von Wurzelentin umfasst wurde. Die 708 verbliebenen Bilder wurden mit Hilfe eines Zufallsgenerators (www.random.org) in einer randomisierten Reihenfolge angeordnet, sodass die einzelnen Bilder weder einer bestimmten Probe noch einer Scan-Nummer zugeordnet werden konnten.

Diese Bilder wurden durch fünf kalibrierte, verblindete Untersucher unter standardisierten Bedingungen zweimal im Abstand von vier Wochen bezüglich vorhandener Mikrorisse im Wurzelentin bewertet. Die Bilder wurden jeweils für exakt 5 s und unter denselben Lichtverhältnissen über einen Projektor auf eine Leinwand übertragen, wobei jeder Untersucher die Anzahl der Mikrorisse pro Bild in eine Excel-Tabelle eintrug. Als Kalibrierung zwischen den Untersuchern wurden lediglich solche Dentinrisse gewertet, die eine Mindestlänge von 200 µm aufwiesen. Weiterhin wurden ausschließlich Mikrorisse gezählt, die von der Wurzeloberfläche beziehungsweise vom Wurzelkanallumen rechtwinklig durch das Dentin zogen, (**Abbildung 4-11**). Auch vollständig von der Wurzeloberfläche bis in den Kanal durchgängige Risse wurden als Mikrorisse gewertet (**Abbildung 4-12**). Abschließend wurden die Messwerte aus den Excel-Tabellen den jeweiligen Proben mit der entsprechenden Schnittebene und dem Feuchtigkeitszustand des Dentins zugeordnet und statistisch ausgewertet.

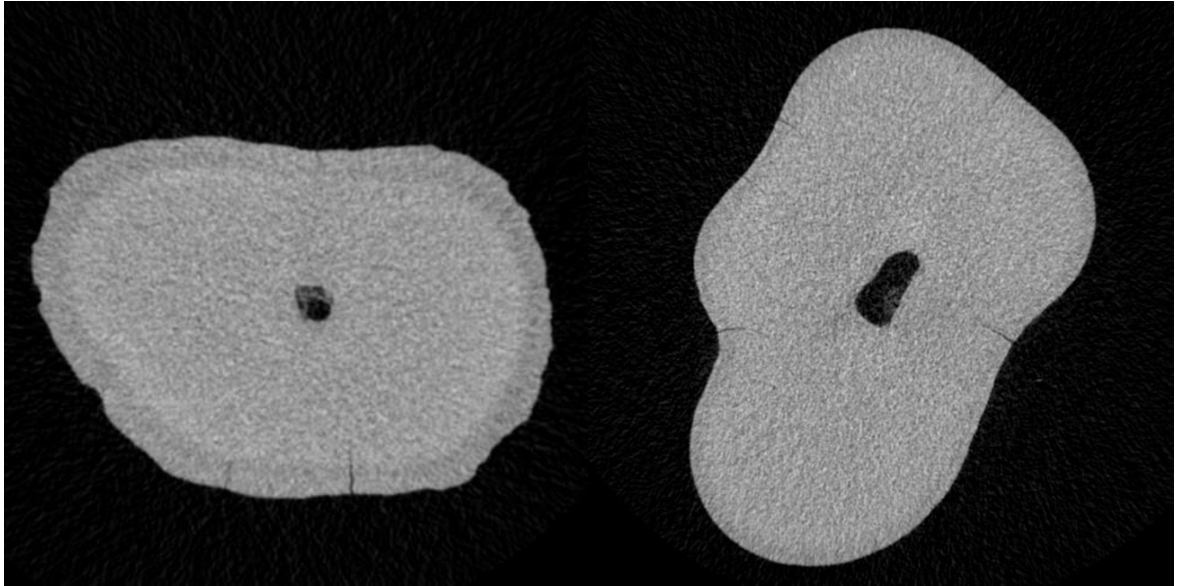


Abbildung 4-11: Horizontale Mikro-CT-Aufnahmen mit von der Wurzeloberfläche ausgehenden Mikrorissen.

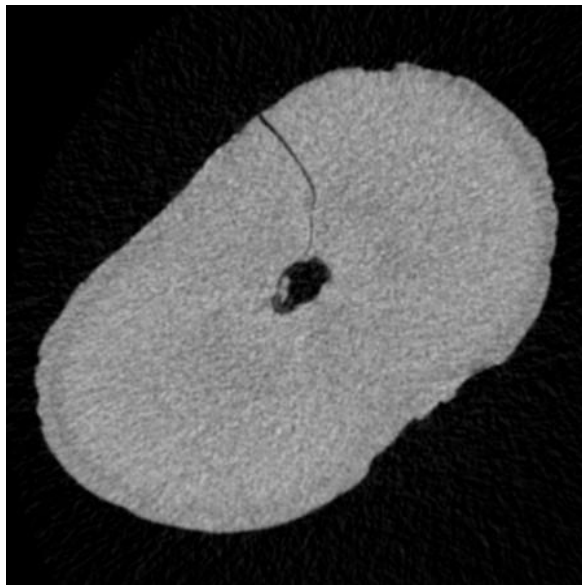


Abbildung 4-12: Horizontale Mikro-CT-Aufnahme mit einem von der Wurzelaußenseite bis zum Wurzelkanal durchgängigen Mikroriss.

4.4 Statistische Auswertung

Die Intra- und Interrater-Reliabilität wurde durch die Berechnung der prozentualen Übereinstimmung zwischen den zwei Untersuchungszeitpunkten bzw. den fünf Untersuchern bestimmt. Aufgrund der guten Intrarater-Übereinstimmung von über 90% wurde pro Untersucher und Scanzeitpunkt der Median über beide Untersuchungszeitpunkte als repräsentativer Wert für die Rissanzahl genommen. Die Auswertung erfolgte mittels nichtparametrischer zweifaktorieller Varianzanalyse für longitudinale Daten (1. Faktor: Scanzeitpunkt, 2. Faktor: Untersucher). Aufgrund des multiplen Testens erfolgte eine Adjustierung der p-Werte mit der Bonferroni-Holm Methode. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 5\%$ festgelegt. Alle Analysen wurden mit der statistischen Software R (Version 3.1.2, www.r-project.org) durchgeführt.

5 Ergebnisse

5.1 Intrarater- und Interrater-Reliabilität

Die Intrarater-Reliabilität lag zwischen 92% und 98%. **Tabelle 5-1** zeigt die prozentualen Übereinstimmungen zwischen den zwei Zeitpunkten für jeden einzelnen Untersucher. Bei einer zu tolerierenden Abweichung von ± 1 Riss betrug die Intrarater-Reliabilität sogar 99-100%.

Die Interrater-Reliabilität zwischen allen Untersuchern zu den beiden verschiedenen Untersuchungszeitpunkten betrug 81% bzw. 83% (**Tabelle 5-2**). Bei einer Abweichung von ± 1 Riss lag die Übereinstimmung zwischen allen Untersuchern bei 96%.

Tabelle 5-1: Prozentuale Intrarater-Übereinstimmung der fünf Untersucher in Bezug auf beide Untersuchungszeitpunkte.

Untersucher	Prozentuale Übereinstimmung	Prozentuale Übereinstimmung bei Toleranz (± 1 Riss)
1	98	100
2	97	100
3	98	100
4	92	99
5	95	99

Tabelle 5-2: Prozentuale Interrater-Übereinstimmung der fünf Untersucher zu den beiden verschiedenen Untersuchungszeitpunkten.

Zeitpunkt	Prozentuale Übereinstimmung	Prozentuale Übereinstimmung bei Toleranz (± 1 Riss)
1	83	96
2	81	96

5.2 Vergleich der unterschiedlichen Scanzeitpunkte

Die Ergebnisse der mikrocomputertomografischen Daten zeigen, dass der Feuchtigkeitsgehalt des Dentins eine entscheidende Rolle bei dem Nachweis von Mikrorissen spielt. Die Auswertung verdeutlicht, dass eine feuchte Lagerung der Proben und ein Scan unter feuchten Bedingungen zu falsch negativen Ergebnissen führen. Trotz des Vorhandenseins von Mikrorissen im Dentin sind diese Risse auf Mikro-CT-Bildern nicht erkennbar. Gleichzeitig ist festzuhalten, dass während einer bis zu 24-stündigen Trocknung der Proben keine neuen Risse entstehen.

Die Ergebnisse der Rissauswertung anhand von Mikro-CT-Aufnahmen sind in einem Balken-Diagramm (**Abbildung 5-1**) dargestellt. Aufgrund der sehr hohen Interrater-Reliabilität wurde die Anzahl der ermittelten Mikrorisse für alle fünf Untersucher zusammengefasst und als Median über beide Untersuchungszeitpunkte für die unterschiedlichen Scanzeitpunkte aufgelistet.

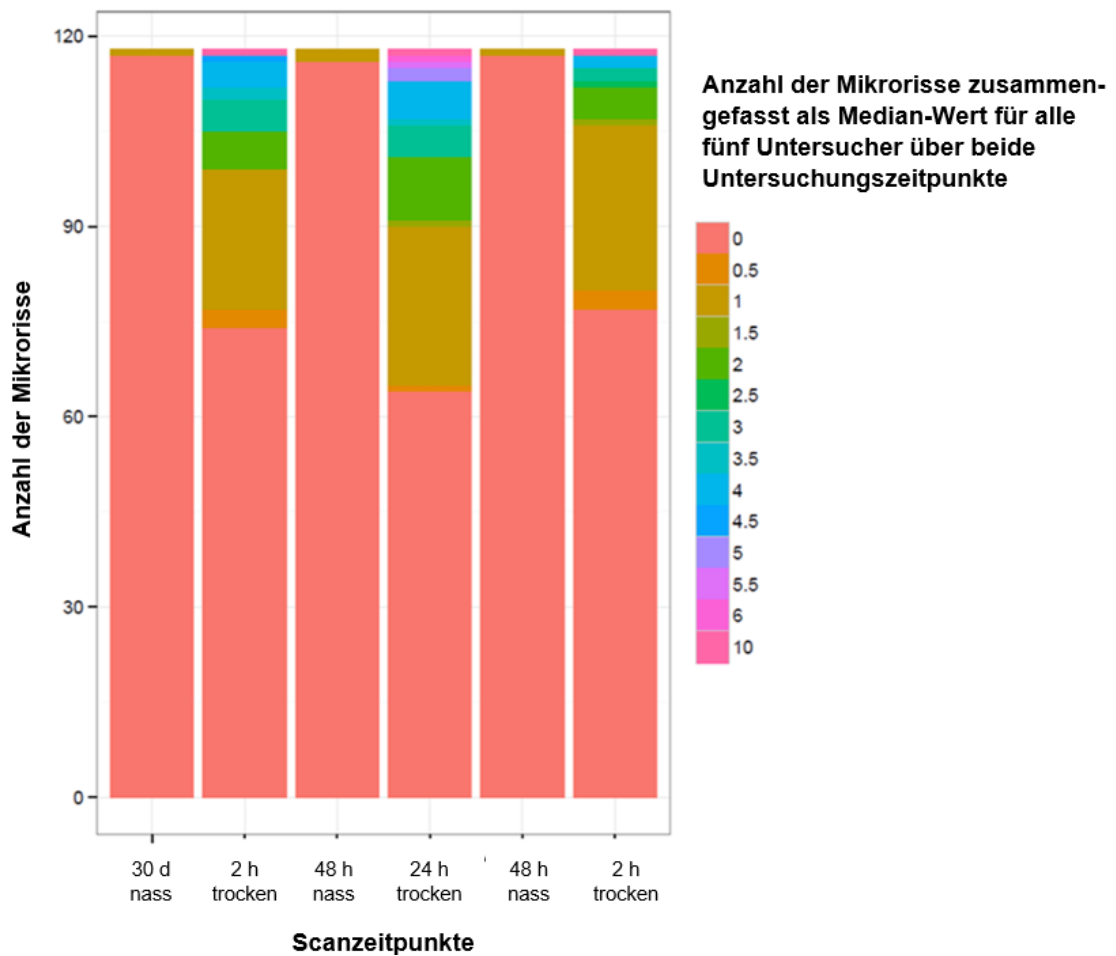


Abbildung 5-1: Balken-Diagramm zur Darstellung der Median-Werte der Mikrorisse für sechs verschiedene Scanzeitpunkte. Die Anzahl der Mikrorisse wird hierbei für alle fünf Untersucher über beide Untersuchungszeitpunkte zusammengefasst.

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass sowohl bei nasser Lagerung der Proben als auch feuchten Bedingungen während des Scanvorgangs einige wenige Risse entdeckt wurden. Dabei lag kein signifikanter Unterschied zwischen dem 1., 3. und 5. Scanzeitpunkt vor ($P > 0,05$) (**Abbildung 5-1, Abbildung 5-2**). Im Vergleich dazu wurden nach einer 2-stündigen Austrocknung des Wurzel dentins signifikant mehr Mikrorisse identifiziert ($P < 0,001$) (**Abbildung 5-1, Abbildung 5-2**). Weiterhin bestand kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Anzahl der Mikrorisse zwischen den Scanzeitpunkten 2 und 6, bei denen das Dentin jeweils 2 Stunden ausgetrocknet war ($P > 0,05$) (**Abbildung 5-2**). Das bedeutet, dass während einer 24-stündigen Trocknung der Proben keine neuen Risse im Dentin entstanden sind. Weiterhin wurden nach 24 h Trocknungszeit signifikant mehr Risse im Vergleich zu

der nassen Lagerung ($P < 0,001$) sowie der 2-stündigen Trocknungszeit ($P < 0,004$) gezählt.

In der nachfolgenden Abbildung (**Abbildung 5-2**) sind repräsentative Mikro-CT-Querschnittsbilder unterschiedlicher Wurzeln (a-d) dargestellt, die den Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts des Wurzelentins auf den Nachweis von Mikrorissen veranschaulichen. **Abbildung 5-2** zeigt den Unterschied hinsichtlich der Erkennbarkeit von Mikrorissen im Dentin anhand feuchter und getrockneter Proben. Hierbei handelt es sich um vier verschiedene Wurzeln, die jeweils nach dem oben beschriebenen Untersuchungsprotokoll eingescannt wurden. Bei allen Proben sind im feuchten Zustand keine (a-c) bzw. kaum (d) Risse erkennbar, wohingegen die Risse bei getrocknetem Wurzelentin eindeutig sichtbar sind (a-d). Nach einer 24-stündigen Trocknung der Proben waren signifikant mehr Risse erkennbar als nach einer 2-stündigen Trocknung (a).

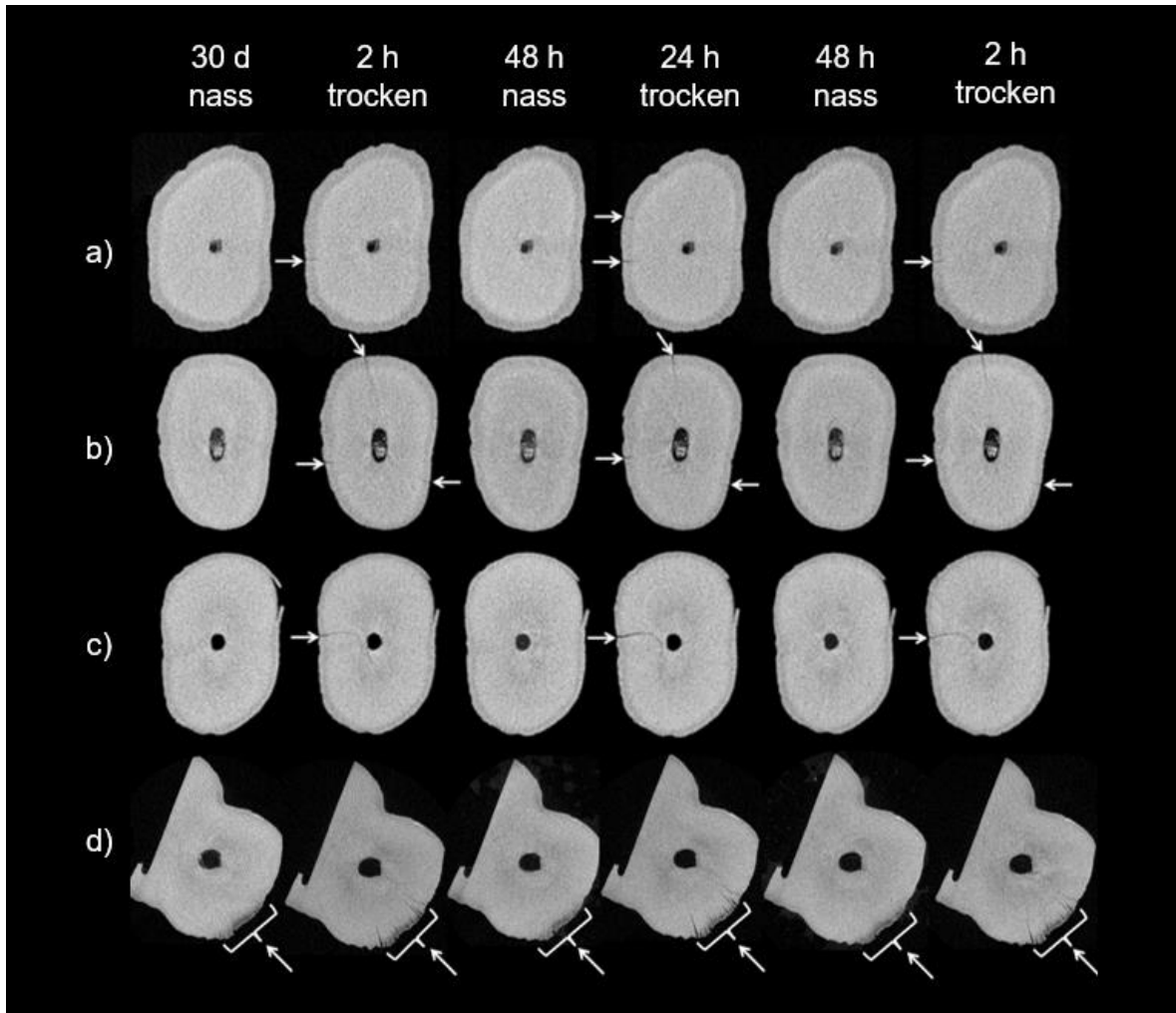


Abbildung 5-2: Sechs verschiedene Mikro-CT-Scans vier verschiedener Proben (a-d) mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt des Dentins. Bei ausgetrockneten Proben sind Mikrorisse im Dentin eindeutig erkennbar (Pfeile), während diese Risse nach Wiederbefeuchten der Probe bzw. Scans unter feuchten Bedingungen verschwinden oder kaum sichtbar sind.

6 Diskussion

6.1 Diskussion von Material und Methode

Bevor die Untersuchung der Proben mit Hilfe des Mikro-CT erfolgen konnte, wurden die Wurzeln zunächst auf eine standardisierte Länge von 15 mm gekürzt. Zusätzlich wurden die Wurzeln unter Zuhilfenahme eines Stereomikroskops bei 25-facher Vergrößerung auf Mikrorisse, Frakturen oder sonstige Defekte inspiziert. Auch in anderen Studien wurden die Außenflächen der Wurzeln präoperativ mit Hilfe eines Stereomikroskops und variablen Vergrößerungen von 8- bis 100fach begutachtet (Bier et al. 2009, Shemesh et al. 2011, Barreto et al. 2012, Bürklein et al. 2013, Kansal et al. 2014, De-Deus et al. 2015, Ceyhanli et al. 2016, De-Deus et al. 2017, Pedullà et al. 2017). Für die vorliegende Untersuchung wurden jeweils fünf Wurzeln mit und ohne sichtbare Risse ausgesucht. Mit dieser Auswahl sollte überprüft werden, welchen Einfluss die De- und Rehydrierung des Wurzel Dentins auf die Entstehung und Erkennbarkeit von Mikrorissen besitzen. Darüber hinaus wurde ein Scanprotokoll erarbeitet, bei dem die Wurzeln in einer definierten Reihenfolge und unter standardisierten Feuchtigkeitsbedingungen wiederholt mit dem Mikro-CT gescannt wurden. Dieses Protokoll diente dazu, verschiedene Feuchtigkeitszustände des Dentins und deren Einfluss auf das Rissverhalten sowie die Erkennbarkeit dieser Mikrorisse im Mikro-CT reproduzierbar zu untersuchen. Ein Studiendesign dieser Art wurde in der Literatur bisher nicht beschrieben. In vergleichenden Mikro-CT-Studien wurde die Rissentstehung nach unterschiedlichen Wurzelkanalbehandlungen untersucht, wobei der Feuchtigkeitsgehalt des Dentins außer Acht gelassen wurde (De-Deus et al. 2014, Jamleh et al. 2015, De-Deus et al. 2016, de Oliveira et al. 2017).

In der Literatur wurde bisher ausgiebig über die Auswirkung endodontischer Maßnahmen auf die Rissbildung im Dentin diskutiert (Bier et al. 2009, Shemesh et al. 2010, 2011, Yoldas et al. 2012, Adorno et al. 2013, Bürklein et al. 2013, De-Deus et al. 2014, Ustun et al. 2015, Ceyhanli et al. 2016, Saber und Schäfer 2016, De-Deus et al. 2017, de Oliveira et al. 2017, Pedullà et al. 2017). Die Mehrzahl dieser Studien wählte als Untersuchungsmethode die sogenannte Sägeschnitttechnik in Kombination mit einer stereomikroskopischen Auswertung der horizontalen Den-

tinscheiben (Bier et al. 2009, Shemesh et al. 2010, 2011, Yoldas et al. 2012, Adorno et al. 2013, Bürklein et al. 2013, Ustun et al. 2015, Saber und Schäfer 2016, Pedullà et al. 2017). Übereinstimmend postulierten die Autoren, dass jegliche Maßnahmen der Wurzelkanalbehandlung ein unterschiedliches Ausmaß an Mikrorissen im Dentin induzieren. Jedoch liegen keine homogenen Daten bezüglich der Häufigkeit von Rissen vor. Entsprechend variiert deren Vorkommen je nach Studie von 0% bis zu 80% (Versiani et al. 2015). Bei näherer Betrachtung der angewandten Untersuchungsmethode zeigt sich, dass sowohl Unregelmäßigkeiten auf der geschnittenen Dentinoberfläche als auch Lichtreflexionen beim Mikroskopieren die Erkennung von Dentinrissen erschweren (Clark et al. 2003, Versiani et al. 2015, Pedullà et al. 2017). Hierdurch können die stark variierenden Ergebnisse unter anderem erklärt werden. Darüber hinaus ermöglicht die Sägeschnitttechnik die Beurteilung von nur wenigen, willkürlich ausgewählten Dentinscheiben pro Zahn. Hinzukommend gehen durch den Schneidevorgang gewisse Areale des Dentins und letztendlich auch Informationen verloren, wodurch eine Unter- oder Überschätzung von Mikrorissen verursacht wird (Versiani et al. 2015).

Der Einsatz des Mikro-CT ermöglicht eine dreidimensionale, nicht-destruktive Visualisierung und Bewertung von Mikrorissen im Dentin (De-Deus et al. 2014, 2015) und bietet somit als alternative Untersuchungsmethode den Vorteil, verschiedene Einschränkungen bisheriger Methoden zu umgehen. Die Studie von De-Deus et al. (2016) belegte, dass das Mikro-CT eine genauso gute Zuverlässigkeit bei der Nachweisbarkeit von Dentinrissen wie die Stereomikroskopie aufweist. Trotzdem kann argumentiert werden, dass auch beim Mikro-CT Risse sowohl vor als auch nach endodontischen Maßnahmen vorliegen könnten, diese aber nicht beurteilbar sind, da sie unterhalb der räumlichen Auflösungsschwelle liegen. In der vorliegenden Studie wurden die Scans mit einer Auflösung von 10,5 µm durchgeführt. Diese Auswahl des Einstellungsparameters ist mit der in bisherigen Mikro-CT-Studien verwendeten Auflösung vergleichbar. Hierbei wurden die Proben mit einer Auflösung zwischen 10 µm (Jamleh et al. 2015) und 14,25 µm (De-Deus et al. 2017) gescannt. Im Gegensatz zu Studien, in denen die Sägeschnitttechnik zum Einsatz kam, wurde in der Mehrzahl der Mikro-CT-Untersuchungen kein Zusammenhang hinsichtlich der Wurzelkanalbehandlung und der Entstehung von Mikrorissen festgestellt (De-Deus et al. 2014, 2015, 2016, 2017, de Oliveira et al.

2017, Zuolo et al. 2017). Die Autoren konstatierten, dass alle postoperativen Mikrorisse bereits bei den entsprechenden präoperativen Aufnahmen sichtbar waren. Sie schlussfolgerten, dass weder durch die Präparation noch durch die Obturation des Wurzelkanals neue Risse entstanden sind. Die Mikro-CT-Studie von Jamleh et al. (2015) zeigte hingegen, dass sowohl die Wurzelkanalpräparation mit rotierenden als auch mit reziproken Instrumenten Mikrorisse im apikalen Bereich verursachte. Die Ursache für diese kontroversen Ergebnisse ist vermutlich auf die kontrastverstärkte Mikro-CT-Bildgebung zurückzuführen. Die in dieser Studie verwendete Färbung der Proben mit Bariumsulfat (BaSO_4) verbesserte die Darstellung der Mikrorisse im Mikro-CT, wodurch eine höhere Übereinstimmung zwischen den Untersuchern erzielt wurde (Jamleh et al. 2015). Auch andere Autoren stellten mit Hilfe der Mikro-CT einen signifikanten Zuwachs von Mikrorissen nach der Wurzelkanalpräparation mit unterschiedlichen NiTi-Systemen fest (Ceyhanli et al. 2016). Die Diskrepanz der beschriebenen Resultate könnte vermutlich auch auf unterschiedliche Scan- und Rekonstruktionsparameter und auf Unterschiede in der Anzahl der ausgewerteten Querschnittsbilder zurückzuführen sein (Bayram et al. 2017). Dementsprechend sollten in den Mikro-CT-Studien standardisierte Bedingungen vorherrschen, um eine bessere Vergleichbarkeit der Resultate zu ermöglichen.

Um das Vorhandensein von Mikrorissen vor Versuchsbeginn auszuschließen, wurden die Wurzelaußenseiten der Proben während des Auswahlverfahrens mit einem Stereomikroskop inspiziert. Frühere Untersuchungen belegten allerdings, dass bereits bei unversehrten, extrahierten Zähnen Mikrorisse im Dentin vorhanden waren (De-Deus et al. 2014, 2015, Bayram et al. 2017, Zuolo et al. 2017). De-Deus et al. konnten bereits in den präoperativen Aufnahmen Mikrorisse mit einer Häufigkeit von 27,64% bis 34,62% aller Querschnittsbilder feststellen (De-Deus et al. 2014, 2015). Zuolo et al. (2017) entdeckten sogar in 41,11% aller präoperativer Aufnahmen bereits vorhandene Dentinrisse. In einer anderen Studie lag die Häufigkeit präoperativer Mikrorisse bei 12,31% (Bayram et al. 2017). Die unterschiedlichen Angaben bezüglich der Häufigkeit präoperativer Mikrorisse lassen sich mit der unterschiedlichen Anzahl an ausgewerteten Querschnittsbildern sowie verschiedenen Lagerungsbedingungen der Proben begründen. In der vorliegenden Studie zeigten Mikro-CT-Aufnahmen Mikrorisse in allen Wurzeln, die zuvor mittels

der Stereomikroskopie als "Wurzeln ohne sichtbaren Riss" eingestuft worden waren. Dies erklärt zwar den Umstand, dass in einigen früheren Sägeschnitt-Studien bereits präoperativ Risse festgestellt wurden (Barreto et al. 2012, Bürklein et al. 2013, Arias et al. 2014). Gleichwohl zeigt sich allerdings, dass trotz vorheriger Betrachtung der Wurzel mit einem Stereomikroskop, das Ausschließen von bereits existierenden Mikrorissen im Inneren des Dentins nicht möglich ist. Aus diesem Grund sollte für das vollständige Verständnis über die Rissentstehung durch endodontische Maßnahmen eine Untersuchungsmethode wie das Mikro-CT gewählt werden, bei der auf nicht-destruktive und dreidimensionale Weise Bewertungen ermöglicht werden.

Darüber hinaus wird in einer aktuellen Studie von De-Deus et al. (2018) angeführt, dass In-situ-Methoden wie die Verwendung von im Kieferknochen befindlichen Zähnen frisch verstorbener Körperspender in Kombination mit mikrocomputertomografischen Analysen den aktuellen Goldstandard für die Untersuchung von Mikrorissen im Dentin darstellen (De-Deus et al. 2018). Die Untersuchung von Kiefersegmenten, bei denen die Zähne in ihrer natürlichen Umgebung verbleiben, hat den wesentlichen Vorteil, dass dieser methodische Ansatz den In-vivo-Bedingungen sehr nahekommt. Die Autoren untersuchten mit Hilfe dieser In-situ-Methode das Auftreten von Mikrorissen bei nicht-endodontisch behandelten Zähnen und zeigten, dass das Dentin dieser Zähne keine Mikrorisse aufwies (De-Deus et al. 2018). Mikrorisse traten erst nach einer vorsichtigen Entfernung der Zähne aus dem Alveolarknochen und einer kontrollierten Dehydrierung des Dentins auf. Somit scheinen Dentinrisse ein experimentell bedingtes Phänomen zu sein. Sie werden vermutlich durch die bei der Extraktion auftretenden Kräfte oder zu trockene Lagerung der extrahierten Zähne verursacht (De-Deus et al. 2018).

In der vorliegenden Studie wurden für die Bewertung der Mikrorisse im Wurzel-dentin lediglich die apikalen 12 mm der Wurzel in 1 mm-Schritten betrachtet. Die insgesamt 708 horizontalen Mikro-CT-Schnittbilder wurden durch fünf kalibrierte, verblindete Untersucher unter standardisierten Bedingungen zweimal im Abstand von vier Wochen bezüglich vorhandener Mikrorisse im Wurzel-dentin bewertet. In vergleichbaren Studien wurde hingegen entweder die Gesamtheit der Wurzel durch zwei (Bayram et al. 2017) bzw. drei (De-Deus et al. 2015, Zuolo et al. 2017) verblindete Untersucher oder lediglich die apikalen 10 mm der Wurzel in 1 mm-

Schritten von zwei verblindeten Untersuchern (Ceyhanli et al. 2016) bewertet. Die größere Anzahl an Untersuchern in der vorliegenden Studie diente dazu, den subjektiven Einfluss des Untersuchers zu reduzieren. Die Validität der Untersuchungsmethode wird sowohl durch die sehr gute Übereinstimmung, welche die verschiedenen Untersucher zu verschiedenen Zeitpunkten erzielten (Intrarater-Reliabilität von 92% und 98%), als auch die gute Übereinstimmung zwischen den fünf Untersuchern (Interrater-Reliabilität von 81% bzw. 83%) verdeutlicht.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

In der vorliegenden Untersuchung wurde insbesondere der Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts des Wurzelkanaldentins auf das Rissverhalten und die Erkennbarkeit der Risse im Mikro-CT untersucht. Durch Anwendung des in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Scanprotokolls konnten an derselben Probe die Auswirkungen der wechselnden Feuchtigkeitsbedingungen verglichen werden. Es besteht nämlich die Annahme, dass Mikrorisse spontan durch Austrocknung des Dentins entstehen können (Versiani et al. 2015, Shemesh et al. 2018). Darüber hinaus führten Autoren ebenfalls an, dass verschiedene Lagerungsbedingungen extrahierter Zähne vor, während und nach endodontischen Maßnahmen die Häufigkeit von Mikrorissen beeinflussen können (Bürklein et al. 2013, Versiani et al. 2015, Saber und Schäfer 2016, De-Deus et al. 2017). Aus diesem Grund wurden in vorangegangenen In-vitro-Studien die Proben im gesamten Verlauf des Experiments feucht gehalten (Bürklein et al. 2013, Kansal et al. 2014, Saber und Schäfer 2016). Es ist jedoch praktisch unmöglich, diese Anforderung vollständig umzusetzen. Bei näherer Betrachtung des Versuchsablaufes ist davon auszugehen, dass das Dentin während der Wurzelkanalpräparation, der Herstellung der horizontalen Sägeschnitte oder während des Mikroskopierens dennoch zu einem gewissen Grad austrocknet. Auch bei den Mikro-CT-Studien vermieden die Autoren die Austrocknung der Proben zwischen den Scans, indem die Zähne in einer 0,1%igen Thymol-Lösung feucht gelagert wurden (De-Deus et al. 2014, 2015, Ceyhanli et al. 2016, Zuolo et al. 2017). Die Angaben über den Feuchtigkeitsgehalt des Dentins während der Scanprozedur wurden, bis auf eine Studie (De-Deus et al. 2017), jedoch nicht näher erläutert. Zudem wurde in einer früheren Untersuchung gezeigt, dass bei der Computertomografie eine unvermeidliche Erwärmung der Probe abhängig von der

Röntgendosis, der Scandauer und der Belichtungszeit auftrat (Sprawls 1995). Pedullà et al. (2017) schlussfolgerten daraus, dass die erhöhte Temperatur während des Scanverfahrens zu einer Austrocknung der Proben und somit zur Mikrorissbildung führen kann. Obwohl das Mikro-CT eine zeitaufwändige Technologie mit Scanzeiten bis zu mehreren Stunden ist (Dowker et al. 1997), führte in der vorliegenden Studie eine Scandauer von ungefähr zwei Stunden nicht zur Entstehung neuer oder einer Vergrößerung bereits existierender Mikrorisse.

In einer aktuellen Studie von Shemesh et al. (2018) wurden Zähne zunächst unter feuchten Bedingungen eingescannt und daraufhin für eine Woche kontinuierlich getrocknet. Anschließend wurden die Zähne erneut, diesmal jedoch unter trockenen Bedingungen, mit Hilfe der Mikro-CT eingescannt. Die Autoren stellten 60% mehr Risse nach der Trocknung fest und schlussfolgerten daraus, dass die Dehydrierung zur einer spontanen Rissbildung im Dentin führte (Shemesh et al. 2018). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie haben eindeutig gezeigt, dass weder die Dehydrierung von Zähnen bis zu 24 Stunden noch die wiederholenden Scans unter feuchten oder trockenen Bedingungen neue Mikrorisse hervorgerufen haben. Bei eingehender Inspektion der Aufnahmen derselben Probe zeigte sich, dass der Feuchtigkeitszustand des Dentins lediglich die Sichtbarkeit von Rissen im Mikro-CT beeinflusst hat. Es wurde deutlich, dass die Mikrorisse bei den getrockneten Proben gut identifiziert werden konnten, jedoch nach dem Wiederbefeuchten des Dentins nicht mehr auf den Mikro-CT-Aufnahmen sichtbar waren. Demzufolge kann das Scannen nasser Proben zu falsch negativen Ergebnissen und zu einer Unterschätzung der Bildung von Dentinrissen im Zusammenhang mit endodontischen Maßnahmen führen.

Die Mikrorisse in den nassen Proben sind aufgrund der hydrophilen Natur und der Kapillareffekte in der porösen Struktur des Dentins meist vollständig mit Wasser gefüllt. Dadurch gleichen sich die Mikrorisse und das Dentin in ihrer Dichte an und verhalten sich ähnlich in der Absorption der Röntgenstrahlung. Somit beruht die schlechtere Sichtbarkeit der Risse im nassen Zustand auf dem geringeren Kontrast zwischen Wasser und Dentin. Anders verhält es sich bei Mikrorissen in trockenen Proben. Hierbei stellen sich die Mikrorisse als luftgefüllte Bereiche dar und sind somit aufgrund des höheren Kontrastes zwischen Luft und Dentin deutlich sichtbarer. Die zum Verdampfen des Wassers erforderliche Zeit hängt unter ande-

rem von der Größe des Risses, der Probendicke und den Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab. Dadurch wurden in der vorliegenden Studie erst nach 24-stündiger Dehydrierung auch die kleineren Mikrorisse sichtbar, die zuvor nicht detektierbar waren. Dies führte zu einer signifikant höheren Rissanzahl im Vergleich zu derselben Probe im nassen Zustand. Um eine Fehlinterpretation des Rissverhaltens im Zusammenhang mit endodontischen Maßnahmen unter Verwendung des Mikro-CT zu vermeiden, sollten daher Proben bis zu 24 Stunden getrocknet sowie der Scanvorgang unter trockenen Bedingungen durchgeführt werden. Darüber hinaus zeigt sich, dass standardisierte Scanprotokolle entwickelt werden sollten, damit die Ergebnisse der Studien besser miteinander vergleichbar sind.

6.3 Schlussfolgerungen

In Übereinstimmung mit vorherigen Studien (De-Deus et al. 2016, 2017, Zuolo et al. 2017, Shemesh et al. 2018) zeigt sich, dass das Mikro-CT als eine innovative Untersuchungsmethode geeignet ist, Mikrorisse auf nicht-destruktive Weise darzustellen.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, dass der Feuchtigkeitsgehalt des Dentins einen entscheidenden Einfluss auf die Nachweisbarkeit von Mikrorissen mittels der Mikro-CT-Technologie hat. So führt das Austrocknen des Dentins bis zu 24 Stunden nicht zur Entstehung neuer Mikrorisse im Wurzelentin. Vielmehr ist die Austrocknung von Proben sowie trockene Bedingungen während des Scanvorgangs die Voraussetzung, um Mikrorisse in vollem Umfang zu identifizieren.

7 Zusammenfassung

Hintergrund und Ziel der Untersuchung: Eine vertikale Wurzelfraktur stellt eine äußerst dramatische Komplikation bei einer Wurzelkanalbehandlung dar, da sie in der Regel die Entfernung des betroffenen Zahnes erfordert. Angesichts dessen, dass Mikrorisse im Dentin als Vorläufer für vertikale Wurzelfrakturen angesehen werden, ist ein umfassendes Verständnis für die Rissentstehung im Dentin gerade im Hinblick auf den Zusammenhang mit endodontischen Maßnahmen unabdingbar. Bedingt durch unterschiedliche Untersuchungsmethoden (Sägeschnitttechnik versus Mikro-CT) liegen konträre Ansichten bezüglich der Rissentwicklung und der Kausalität durch endodontische Maßnahmen vor. Des Weiteren scheint die Austrocknung der Proben in In-vitro-Studien das Rissverhalten des Dentins negativ zu beeinflussen. Das Ziel dieser Studie war es daher, den Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts des Dentins auf die Entstehung und den Nachweis von Mikrorissen mithilfe der Mikro-Computertomografie zu untersuchen.

Material und Methode: Zunächst wurden extrahierte Zähne unter 25-facher Vergrößerung mittels eines Stereomikroskops auf Mikrorisse inspiziert. Anschließend wurden zehn Wurzeln mit und ohne sichtbare Risse (jeweils $n = 5$) für die Untersuchung ausgewählt. Jede einzelne Wurzel wurde in einer definierten Reihenfolge und unter standardisierten Feuchtigkeitsbedingungen mit einem Mikro-Computertomografen bei 80 kV und 125 μ A sowie einer Auflösung von 10,5 μ m eingescannt.

Die Scanbedingungen waren wie folgt:

1. Scan: 30 Tage nasse Lagerung + Scan unter nassen Bedingungen
2. Scan: 2 Stunden trockene Lagerung + Scan unter trockenen Bedingungen
3. Scan: 48 Stunden nasse Lagerung + Scan unter nassen Bedingungen
4. Scan: 24 Stunden trockene Lagerung + Scan unter trockenen Bedingungen
5. Scan: 48 Stunden nasse Lagerung + Scan unter nassen Bedingungen
6. Scan: 2 Stunden trockene Lagerung + Scan unter trockenen Bedingungen

Nach dreidimensionaler Rekonstruktion der Proben wurden von jedem der sechs Scans zweidimensionale Querschnittsbilder derselben Wurzelebene in 1 mm-Abständen extrahiert ($n = 13$ pro Wurzel). Von den insgesamt 780 Aufnahmen wurden jedoch 72 aufgrund der Konfluenz des Wurzelkanals mit der Furkation verworfen. Die verbliebenen 708 Querschnittsbilder wurden durch fünf kalibrierte und verblindete Untersucher unter standardisierten Bedingungen zweimal, im Abstand von vier Wochen, auf das Vorhandensein von Mikrorissen analysiert. Dabei wurden alle Risse gewertet, die eine Mindestlänge von 200 μm aufwiesen, sowie diejenigen, die von der Wurzeloberfläche beziehungsweise vom Wurzelkanallumen rechtwinklig durch das Dentin zogen. Die Anzahl der Mikrorisse wurde dabei für jedes Bild separat notiert. Die statistische Auswertung wurde unter Verwendung einer nichtparametrischen Varianzanalyse und der Bonferroni-Holm-Methode ($P = 0,05$) durchgeführt.

Ergebnisse: Die Intrarater-Reliabilität lag zwischen 92% und 98%. Die Interrater-Reliabilität zwischen allen Untersuchern zu den beiden verschiedenen Untersuchungszeitpunkten betrug 81% bzw. 83%. Nach nasser Lagerung der Proben (Scan 1, 3 und 5) wurden nur wenige Mikrorisse beobachtet, wobei zwischen diesen drei Gruppen keine signifikanten Unterschiede ($P > 0,05$) auftraten. Nach einer 2-stündigen Austrocknung des Wurzel dentins und trockenen Scanbedingungen wurden signifikant mehr Mikrorisse ($P < 0,001$) als bei den feuchten Proben festgestellt, dabei bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den Scanzeitpunkten 2 und 6 ($P > 0,05$). Während einer 24-stündigen Trocknung der Proben entstanden keine neuen Risse im Dentin. Des Weiteren führte das Trocknen der Proben für 24 Stunden vor dem Scannen zu einer signifikant besseren Erkennbarkeit von Mikrorissen im Vergleich zu der nassen Lagerung ($P < 0,001$) sowie der 2-stündigen Trocknungszeit ($P < 0,004$).

Schlussfolgerungen: Das Mikro-CT ist als Untersuchungsmethode geeignet, um Mikrorisse auf nicht-destruktive Weise darzustellen. Der Feuchtigkeitsgehalt des Dentins beeinflusst jedoch dabei die Identifikation von Mikrorissen. In zukünftigen Mikro-CT-Studien sollte daher der Scanvorgang mit getrockneten Proben und unter trockenen Bedingungen durchgeführt werden, um Mikrorisse vollends sichtbar zu machen. Das Austrocknen des Dentins bis zu 24 Stunden führt nicht zur Entstehung neuer Mikrorisse.

8 Anhang

8.1 Einverständniserklärung

Universitätsmedizin Göttingen, 37099 Göttingen
Zentrum für Zahn- Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und

Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Präventive Zahnmedizin,
Parodontologie und Kariologie

Direktorin
Prof. Dr. A. Wiegand

37099 Göttingen **Briefpost**
Robert-Koch-Straße 40, 37075 Göttingen **Adresse**
0551 / 39-22884 **Telefon**
0551 / 39-22037 **Fax**
Annette.wiegand@med.uni-goettingen.de **E-Mail**

Informationsbogen und Einverständniserklärung zur Verwendung extrahier-

Sehr geehrte Patientin, sehr geehrter Patient,

die Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie der Universitätsmedizin Göttingen möchte sowohl die zahnmedizinische Ausbildung als auch die Durchführung wissenschaftlicher Projekte auf hohem Niveau gewährleisten. Hierzu bitten wir nachfolgend um Ihre Unterstützung: Da für eine möglichst realitätsnahe Ausbildung und Forschung die Verwendung extrahierter Zähne unerlässlich ist, möchten wir Sie bitten, Ihre(n) extrahierten oder operativ entfernten Zahn/Zähne der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie zur Verfügung zu stellen.

Bitte beachten Sie folgende wichtige Hinweise:

- Ihre Einwilligung ist vollkommen freiwillig. Falls Sie nicht einwilligen oder Ihre Einwilligung später zurückziehen, entstehen Ihnen hieraus keine Nachteile.
- Ihr(e) Zahn/Zähne werden in anonymisierter Form, d.h. ohne die Angabe personenbezogener Daten aufbewahrt und verwendet.
- Es werden keine gendiagnostischen Untersuchungen vorgenommen.
- Bei allen wissenschaftlichen Projekten, die mit Hilfe extrahierter Zähne durchgeführt werden, erfolgt eine Begutachtung durch die zuständige Ethik-Kommission.

Herzlichen Dank für Ihre Unterstützung!

Hiermit erkläre ich mich mit der Verwendung meines/meiner extrahierten oder operativ entfernten Zahnes/Zähne für Lehr- und Forschungszwecke durch die Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie der Universitätsmedizin Göttingen einverstanden. Den dazugehörigen Informationsbogen zur Verwendung extrahierter Zähne habe ich gelesen. Wenn ich nicht zustimme, entstehen mir keine Nachteile. Ich kann jederzeit ohne Angabe von Gründen meine Zustimmung widerrufen. Mir ist bekannt, dass die Zähne anonymisiert (also ohne Hinweise zu meiner Person) gelagert werden. Damit ist später eine Rückgabe oder auf meinen Wunsch hin durchgeführte Vernichtung meiner persönlichen Zähne nicht mehr möglich.

Ort und Datum

Unterschrift Patient/-in

9 Literaturverzeichnis

- Abou-Rass M (1983): Crack lines: The precursors of tooth fractures – their diagnosis and treatment. *Quintessence* 14, 437–447
- Adorno CG, Yoshioka T, Suda H (2010): The effect of working length and root canal preparation technique on crack development in the apical root canal wall. *Int Endod J* 43, 321–327
- Adorno CG, Yoshioka T, Suda H (2011): Crack Initiation on the Apical Root Surface Caused by Three Different Nickel-Titanium Rotary Files at Different Working Lengths. *J Endod* 37, 522–525
- Adorno CG, Yoshioka T, Jindan P, Kobayashi C, Suda H (2013): The effect of endodontic procedures on apical crack initiation and propagation ex vivo. *Int Endod J* 46, 763–768
- Aesaert G (2001): Lassen sich Zähne mit vertikaler Wurzelfraktur erhalten? *Endodontie* 10, 163–176
- Agee KA, Prakki A, Abu-Haimed T, Naguib GH, Nawareg MA, Tezvergil-Mutluay A, Scheffel DLS, Chen C, Jang SS, Hwang H, et al. (2015): Water distribution in dentin matrices: Bound vs. unbound water. *Dent Mater* 31, 205–216
- Andreasen JO, Farik B, Munksgaard EC (2002): Long-term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of root fracture. *Dent Traumatol* 18, 134–137
- Arias A, Lee YH, Peters CI, Gluskin AH, Peters OA (2014): Comparison of 2 Canal Preparation Techniques in the Induction of Microcracks: A Pilot Study with Cadaver Mandibles. *J Endod* 40, 982–985
- Arslan H, Karataş E, Capar ID, Özsu D, Doğanay E (2014): Effect of ProTaper Universal, Endoflare, Revo-S, HyFlex Coronal Flaring Instruments, and Gates Glidden Drills on Crack Formation. *J Endod* 40, 1681–1683
- Athanassiadis B, Abbott PV, Walsh LJ (2008): The use of calcium hydroxide, antibiotics and biocides as antimicrobial medicaments in endodontics. *Aust Dent J* 52, 64–82
- Barreto MS, Moraes R do A, da Rosa RA, Moreira CHC, Só MVR, Bier CAS (2012): Vertical Root Fractures and Dentin Defects: Effects of Root Canal Preparation, Filling, and Mechanical Cycling. *J Endod* 38, 1135–1139
- Bayram HM, Bayram E, Ocak M, Uzuner MB, Geneci F, Celik HH (2017): Micro-computed Tomographic Evaluation of Dentinal Microcrack Formation after Using New Heat-treated Nickel-titanium Systems. *J Endod* 43, 1736–1739
- Berman LH, Kuttler S (2010): Fracture Necrosis: Diagnosis, Prognosis Assessment, and Treatment Recommendations. *J Endod* 36, 442–446

- Bier CAS, Shemesh H, Tanomaru-Filho M, Wesselink PR, Wu M-K (2009): The Ability of Different Nickel-Titanium Rotary Instruments To Induce Dentinal Damage During Canal Preparation. *J Endod* 35, 236–238
- Bürklein S, Tsotsis P, Schäfer E (2013): Incidence of Dentinal Defects after Root Canal Preparation: Reciprocating versus Rotary Instrumentation. *J Endod* 39, 501–504
- Capar ID, Arslan H, Akçay M, Uysal B (2014): Effects of ProTaper Universal, ProTaper Next, and HyFlex Instruments on Crack Formation in Dentin. *J Endod* 40, 1482–1484
- Ceyhanli KT, Erdilek N, Tatar İ, Celik D (2016): Comparison of ProTaper, RaCe and Safesider instruments in the induction of dentinal microcracks: a micro-CT study. *Int Endod J* 49, 684–689
- Chan C-P, Lin C-P, Tseng S-C, Jeng J-H (1999): Vertical root fracture in endodontically versus nonendodontically treated teeth. A survey of 315 cases in Chinese patients. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 87, 504–507
- Clark DJ, Sheets CG, Paquette JM (2003): Definitive Diagnosis of Early Enamel and Dentin Cracks Based on Microscopic Evaluation. *J Esthet Restor Dent* 15, 391–401
- Dane A, Capar ID, Arslan H, Akçay M, Uysal B (2016): Effect of Different Torque Settings on Crack Formation in Root Dentin. *J Endod* 42, 304–306
- Dang DA, Walton RE (1989): Vertical root fracture and root distortion: Effect of spreader design. *J Endod* 15, 294–301
- de Oliveira BP, Câmara AC, Duarte DA, Heck RJ, Antonino ACD, Aguiar CM (2017): Micro-computed Tomographic Analysis of Apical Microcracks before and after Root Canal Preparation by Hand, Rotary, and Reciprocating Instruments at Different Working Lengths. *J Endod* 43, 1143–1147
- De-Deus G, Silva EJNL, Marins J, Souza E, Neves A de A, Gonçalves Belladonna F, Alves H, Lopes RT, Versiani MA (2014): Lack of Causal Relationship between Dentinal Microcracks and Root Canal Preparation with Reciprocation Systems. *J Endod* 40, 1447–1450
- De-Deus G, Belladonna FG, Souza EM, Silva EJNL, Neves A de A, Alves H, Lopes RT, Versiani MA (2015): Micro-computed Tomographic Assessment on the Effect of ProTaper Next and Twisted File Adaptive Systems on Dentinal Cracks. *J Endod* 41, 1116–1119
- De-Deus G, Belladonna FG, Marins JR, Silva EJNL, Neves A de A, Souza EM, Machado A de C, Lopes RT, Versiani MA (2016): On the Causality Between Dentinal Defects and Root Canal Preparation: A Micro-CT Assessment. *Braz Dent J* 27, 664–669
- De-Deus G, Belladonna FG, Silva EJNL, Souza EM, Carvalhal JCA, Perez R, Lo-

- pes RT, Versiani MA (2017): Micro-CT assessment of dentinal micro-cracks after root canal filling procedures. *Int Endod J* 50, 895–901
- De-Deus G, Cavalcante DM, Belladonna FG, Carvalhal J, Souza EM, Lopes RT, Versiani MA, Silva EJNL, Dummer PMH (2018): Root dentinal microcracks: a post-extraction experimental phenomenon? *Int Endod J*, doi: 10.1111/iej.13058 (im Druck)
- Deutsch AS, Musikant BL, Cavallari J, Silverstein L, Lepley J, Ohlen K, Lesser M (1985): Root fracture during insertion of prefabricated posts related to root size. *J Prosthet Dent* 53, 786–789
- Dowker SEP, Davis GR, Elliott JC (1997): X-ray microtomography: Nondestructive three-dimensional imaging for in vitro endodontic Studies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 83, 510–516
- Doyon GE, Dumsha T, von Fraunhofer JA (2005): Fracture Resistance of Human Root Dentin Exposed to Intracanal Calcium Hydroxide. *J Endod* 31, 895–897
- Engelke K, Karolczak M, Lutz A, Seibert U, Schaller S, Kalender W (1999): Mikro-CT. Technologie und Applikationen zur Erfassung von Knochenarchitektur. *Radiologie* 39, 203–212
- European Society of Endodontology (2006): Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 39, 921–930
- Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW (1984): Practical cone-beam algorithm. *J Opt Soc Am A* 1, 612–619
- Feldkamp LA, Goldstein SA, Parfitt MA, Jasion G, Kleerekoper M (1989): The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography. *J Bone Miner Res* 4, 3–11
- Frentzen M, Schmitt UH, Braun A (2004): Dimensionsstabilität von Gutta-perchastiften bei unterschiedlichen Desinfektionsmaßnahmen. *ZWR* 113, 73–80
- Fuss Z, Lustig J, Tamse A (1999): Prevalence of vertical root fractures in extracted endodontically treated teeth. *Int Endod J* 32, 283–286
- Garberoglio R, Brännström M (1976): Scanning electron microscopic investigation of human dentinal tubules. *Arch Oral Biol* 21, 355–362
- Gu L, Wei X, Ling J, Huang X (2009): A Microcomputed Tomographic Study of Canal Isthmuses in the Mesial Root of Mandibular First Molars in a Chinese Population. *J Endod* 35, 353–356
- Guelzow A, Stamm O, Martus P, Kielbassa AM (2005): Comparative study of six rotary nickel–titanium systems and hand instrumentation for root canal preparation. *Int Endod J* 38, 743–752

- Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2008): Three-dimensional Evaluation of Effectiveness of Hand and Rotary Instrumentation for Retreatment of Canals Filled with Different Materials. *J Endod* 34, 1370–1373
- Hammad M, Qualtrough A, Silikas N (2009): Evaluation of Root Canal Obturation: A Three-dimensional In Vitro Study. *J Endod* 35, 541–544
- Harvey TE, White JT, Leeb IJ (1981): Lateral condensation stress in root canals. *J Endod* 7, 151–155
- Haueisen H, Ratka-Krüger P, Heidemann D (1999): Diagnostik vertikaler Wurzelfrakturen endodontisch behandelter Zähne. *Dtsch Zahnärztl Z* 54, 249–252
- Hellwig E, Klimek J, Attin T: Einführung in die Zahnerhaltung. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage; Deutscher Zahnärzte-Verlag, Köln 2009
- Hin ES, Wu M-K, Wesselink PR, Shemesh H (2013): Effects of Self-Adjusting File, Mtwo, and ProTaper on the Root Canal Wall. *J Endod* 39, 262–264
- Holcomb JQ, Pitts DL, Nicholls JI (1987): Further investigation of spreader loads required to cause vertical root fracture during lateral condensation. *J Endod* 13, 277–284
- Hülsmann M: Checklisten der Zahnmedizin Endodontie. Thieme-Verlag, Stuttgart 2008
- Hülsmann M (2013): Effects of mechanical instrumentation and chemical irrigation on the root canal dentin and surrounding tissues. *Endod Top* 29, 55–86
- Hülsmann M, Gressmann G, Schäfers F (2003): A comparative study of root canal preparation using FlexMaster and HERO 642 rotary Ni–Ti instruments. *Int Endod J* 36, 358–366
- Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH (2005): Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endod Top* 10, 30–76
- Iwamoto N, Ruse ND (2003): Fracture toughness of human dentin. *J Biomed Mater Res A* 66, 507–512
- Jainaen A, Palamara JEA, Messer HH (2009): Effect of dentinal tubules and resin-based endodontic sealers on fracture properties of root dentin. *Dent Mater* 25, e73–e81
- Jamleh A, Komabayashi T, Ebihara A, Nassar M, Watanabe S, Yoshioka T, Miyara K, Suda H (2015): Root surface strain during canal shaping and its influence on apical microcrack development: a preliminary investigation. *Int Endod J* 48, 1103–1111
- Jung M, Lommel D, Klimek J (2005): The imaging of root canal obturation using micro-CT. *Int Endod J* 38, 617–626
- Kahler B, Swain MV, Moule A (2003): Fracture-toughening mechanisms responsible for differences in work to fracture of hydrated and dehydrated dentine. *J*

Biomech 36, 229-237

- Kansal R, Rajput A, Talwar S, Roongta R, Verma M (2014): Assessment of Dentinal Damage during Canal Preparation Using Reciprocating and Rotary Files. *J Endod* 40, 1443–1446
- Karataş E, Gündüz HA, Kırıcı DÖ, Arslan H, Topçu MÇ, Yeter KY (2015): Dentinal Crack Formation during Root Canal Preparations by the Twisted File Adaptive, ProTaper Next, ProTaper Universal, and WaveOne Instruments. *J Endod* 41, 261–264
- Kim H-C, Lee M-H, Yum J, Versluis A, Lee C-J, Kim B-M (2010): Potential Relationship between Design of Nickel-Titanium Rotary Instruments and Vertical Root Fracture. *J Endod* 36, 1195–1199
- Kramer E, Robra BP, Walther W, Heners M (2008): Vertikale Wurzelfrakturen an endodontisch behandelten Zähnen. *Dtsch Zahnärztl Z* 63, 330–336
- Layton CA, Marshall JG, Morgan LA, Baumgartner JC (1996): Evaluation of cracks associated with ultrasonic root-end preparation. *J Endod* 22, 157–160
- Lertchirakarn V, Palamara JEA, Messer HH (1999): Load and strain during lateral condensation and vertical root fracture. *J Endod* 25, 99–104
- Li S, Lu Y, Song D, Zhou X, Zheng Q, Gao Y, Huang D (2015): Occurrence of Dentinal Microcracks in Severely Curved Root Canals with ProTaper Universal, WaveOne, and ProTaper Next File Systems. *J Endod* 41, 1875–1879
- Liu R, Hou BX, Wesselink PR, Wu M-K, Shemesh H (2013): The Incidence of Root Microcracks Caused by 3 Different Single-file Systems versus the ProTaper System. *J Endod* 39, 1054–1056
- Löst C, Wesselink P, Winkler R (1992): Grundlagen und Prinzipien der modernen Endodontie. *Endodontie* 1, 7–18
- Marending M, Luder HU, Brunner TJ, Knecht S, Stark WJ, Zehnder M (2007): Effect of sodium hypochlorite on human root dentine – mechanical, chemical and structural evaluation. *Int Endod J* 40, 786–793
- Meister F, Lommel TJ, Gerstein H (1980): Diagnosis and possible causes of vertical root fractures. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 49, 243–253
- Monga P, Bajaj N, Mahajan P, Garg S (2015): Comparison of incidence of dentinal defects after root canal preparation with continuous rotation and reciprocating instrumentation. *Singapore Dent J* 36, 29–33
- Moore J, Fitz-Walter P, Parashos P (2009): A micro-computed tomographic evaluation of apical root canal preparation using three instrumentation techniques. *Int Endod J* 42, 1057–1064
- Morfis AS (1990): Vertical root fractures. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 69, 631–635

- Ng Y-L, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K (2008): Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature – Part 2. Influence of clinical factors. *Int Endod J* 41, 6–31
- Onnink PA, Davis RD, Wayman BE (1994): An in vitro comparison of incomplete root fractures associated with three obturation techniques. *J Endod* 20, 32–37
- Paqué F, Balmer M, Attin T, Peters OA (2010): Preparation of Oval-shaped Root Canals in Mandibular Molars Using Nickel-Titanium Rotary Instruments: A Micro-computed Tomography Study. *J Endod* 36, 703–707
- Pedullà E, Genovesi F, Rapisarda S, La Rosa GRM, Grande NM, Plotino G, Adorno CG (2017): Effects of 6 Single-File Systems on Dentinal Crack Formation. *J Endod* 43, 456–461
- Peters OA, Laib A, Rügsegger P, Barbakow F (2000): Three-dimensional Analysis of Root Canal Geometry by High-resolution Computed Tomography. *J Dent Res* 79, 1405–1409
- Peters OA, Schönenberger K, Laib A (2001): Effects of four Ni–Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J* 34, 221–230
- Pitts DL, Natkin E (1983): Diagnosis and treatment of vertical root fractures. *J Endod* 9, 338–346
- PradeepKumar AR, Shemesh H, Jothilatha S, Vijayabharathi R, Jayalakshmi S, Kishen A (2016): Diagnosis of Vertical Root Fractures in Restored Endodontically Treated Teeth: A Time-dependent Retrospective Cohort Study. *J Endod* 42, 1175–1180
- PradeepKumar AR, Shemesh H, Chang JWW, Bhowmik A, Sibi S, Gopikrishna V, Lakshmi-Narayanan L, Kishen A (2017): Preexisting Dentinal Microcracks in Nonendodontically Treated Teeth: An Ex Vivo Micro-computed Tomographic Analysis. *J Endod* 43, 896–900
- Rivera E, Walton RE: *Endodontics: Colleagues for Excellence*. American Association of Endodontists, Chicago 2008
- Rôças IN, Siqueira JF (2011): In Vivo Antimicrobial Effects of Endodontic Treatment Procedures as Assessed by Molecular Microbiologic Techniques. *J Endod* 37, 304–310
- Rödig T, Hülsmann M, Nordmeyer S, Drebenstedt S: *Grundlagen der modernen Endodontie*. Spitta Verlag, Balingen 2009
- Rödig T, Kupis J, Konietschke F, Dullin C, Drebenstedt S, Hülsmann M (2014): Comparison of hand and rotary instrumentation for removing gutta-percha from previously treated curved root canals: a microcomputed tomography study. *Int Endod J* 47, 173–182

- Roggendorf MJ, Legner M, Ebert J, Fillery E, Frankenberger R, Friedman S (2010): Micro-CT evaluation of residual material in canals filled with Activ GP or GuttaFlow following removal with NiTi instruments. *Int Endod J* 43, 200–209
- Saber SEDM, Schäfer E (2016): Incidence of dentinal defects after preparation of severely curved root canals using the Reciproc single-file system with and without prior creation of a glide path. *Int Endod J* 49, 1057–1064
- Sathorn C, Palamara JE, Messer HH (2005): A Comparison of the Effects of Two Canal Preparation Techniques on Root Fracture Susceptibility and Fracture Pattern. *J Endod* 31, 283–287
- Schäfer E, Hickel R, Geurtsen W, Heidemann D, Löst C, Petschelt A, Raab W (2000): Wurzelkanalaufbereitungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 55, 719
- Schäfer E, Schulz-Bongert U, Tulus G (2004): Comparison of Hand Stainless Steel and Nickel Titanium Rotary Instrumentation: A Clinical Study. *J Endod* 30, 432–435
- Schäfer E, Erler M, Dammaschke T (2006a): Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J* 39, 196–202
- Schäfer E, Erler M, Dammaschke T (2006b): Comparative study on the shaping ability and cleaning efficiency of rotary Mtwo instruments. Part 2. Cleaning effectiveness and shaping ability in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J* 39, 203–212
- Schilder H (1974): Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am* 18, 269–296
- Shemesh H, van Soest G, Wu M-K, Wesselink PR (2008): Diagnosis of Vertical Root Fractures with Optical Coherence Tomography. *J Endod* 34, 739–742
- Shemesh H, Bier CAS, Wu M-K, Tanomaru-Filho M, Wesselink PR (2009): The effects of canal preparation and filling on the incidence of dentinal defects. *Int Endod J* 42, 208–213
- Shemesh H, Wesselink PR, Wu M-K (2010): Incidence of dentinal defects after root canal filling procedures. *Int Endod J* 43, 995–1000
- Shemesh H, Roeleveld AC, Wesselink PR, Wu M-K (2011): Damage to Root Dentin During Retreatment Procedures. *J Endod* 37, 63–66
- Shemesh H, Lindtner T, Portoles CA, Zaslansky P (2018): Dehydration Induces Cracking in Root Dentin Irrespective of Instrumentation: A Two-dimensional and Three-dimensional Study. *J Endod* 44, 120–125
- Sim TPC, Knowles JC, Ng Y-L, Shelton J, Gulabivala K (2001): Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain. *Int Endod J* 34, 120–132

- Siqueira JF, Guimarães-Pinto T, Rôças IN (2007): Effects of Chemomechanical Preparation With 2.5% Sodium Hypochlorite and Intracanal Medication With Calcium Hydroxide on Cultivable Bacteria in Infected Root Canals. *J Endod* 33, 800–805
- Soros C, Zinelis S, Lambrianidis T, Palaghias G (2008): Spreader load required for vertical root fracture during lateral compaction ex vivo: evaluation of periodontal simulation and fracture load information. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 106, e64–e70
- Sprawls P: *Physical Principles of Medical Imaging*. 2. Auflage; Medical Physics Publishing, Madison 1995
- Tamse A (2006): Vertical root fractures in endodontically treated teeth: diagnostic signs and clinical management. *Endod Top* 13, 84–94
- Tamse A, Fuss Z, Lustig J, Kaplavi J (1999): An evaluation of endodontically treated vertically fractured teeth. *J Endod* 25, 506–508
- Telli C, Gülkan P, Raab W (1999): Additional studies on the distribution of stresses during vertical compaction of gutta-percha in the root canal. *Br Dent J* 187, 32–37
- Testori T, Badino M, Castagnola M (1993): Vertical root fractures in endodontically treated teeth: A clinical survey of 36 cases. *J Endod* 19, 87–90
- Touré B, Faye B, Kane AW, Lo CM, Niang B, Boucher Y (2011): Analysis of Reasons for Extraction of Endodontically Treated Teeth: A Prospective Study. *J Endod* 37, 1512–1515
- Trope M, Maltz DO, Tronstad L (1985): Resistance to fracture of restored endodontically treated teeth. *Dent Traumatol* 1, 108–111
- Ustun Y, Aslan T, Sagsen B, Kesim B (2015): The effects of different nickel-titanium instruments on dentinal microcrack formations during root canal preparation. *Eur J Dent* 9, 41–46
- Vaudt J, Bitter K, Neumann K, Kielbassa AM (2009): Ex vivo study on root canal instrumentation of two rotary nickel–titanium systems in comparison to stainless steel hand instruments. *Int Endod J* 42, 22–33
- Versiani MA, Pécora JD, Sousa-Neto MD (2013): Microcomputed tomography analysis of the root canal morphology of single-rooted mandibular canines. *Int Endod J* 46, 800–807
- Versiani MA, Souza E, De-Deus G (2015): Critical appraisal of studies on dentinal radicular microcracks in endodontics: methodological issues, contemporary concepts, and future perspectives. *Endod Top* 33, 87–156
- Walton RE, Michelich RJ, Smith GN (1984): The histopathogenesis of vertical root fractures. *J Endod* 10, 48–56

- Wilcox LR, Roskelley C, Sutton T (1997): The relationship of root canal enlargement to finger-spreader induced vertical root fracture. *J Endod* 23, 533–534
- Yared G (2008): Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *Int Endod J* 41, 339–344
- Yoldas O, Yilmaz S, Atakan G, Kuden C, Kasan Z (2012): Dentinal Microcrack Formation during Root Canal Preparations by Different NiTi Rotary Instruments and the Self-Adjusting File. *J Endod* 38, 232–235
- Zuolo ML, De-Deus G, Belladonna FG, Silva EJNL, Lopes RT, Souza EM, Versiani MA, Zaia AA (2017): Micro-computed Tomography Assessment of Dentinal Micro-cracks after Root Canal Preparation with TRUShape and Self-adjusting File Systems. *J Endod* 43, 619–622

Danksagung

Zuallererst gilt mein außerordentlicher Dank Frau PD Dr. med. dent. Tina Rödiger, Oberärztin der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, für die Möglichkeit der Promotion und die Vergabe des Dissertationsthemas. Dabei möchte ich vor allem die fortwährende, engagierte und sorgfältige Unterstützung sowie Betreuung dieser Arbeit betonen.

Ein großer Dank gilt Frau Dr. rer. nat. Marta Rizk, ebenfalls aus der Poliklinik für Präventive Zahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, für die zuverlässige Einweisung am Mikro-CT und die herzliche Unterstützung.

Für die Hilfe bei der statistischen Auswertung danke ich Frau M. Sc. Xenia Schulz aus dem Institut für Medizinische Statistik der Universität Göttingen.

Weiterhin gilt mein Dank Frau Monika Hoch und den Mitarbeiter/ -innen des Labors der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie für die Hilfestellungen während der Laborarbeiten.