

MARIE-THERES WEBER¹
 NADJA STRATZ²
 JONATHAN FLEINER³
 DIRK SCHULZE⁴
 CHRISTIAN HANNIG¹

¹ Poliklinik für Zahnerhaltung
 mit Bereich Kinderzahnheil-
 kunde, Universitätsklinikum
 Carl Gustav Carus, Dresden

² Zahnarztpraxis Fürstenberg,
 Konstanz

³ Oral Imaging Center, Medi-
 zинische Fakultät, Katholieke
 Universiteit Leuven

⁴ Dentales Diagnostikzentrum
 Breisgau

KORRESPONDENZ

Poliklinik für Zahnerhaltung mit
 Bereich Kinderzahnheilkunde
 Universitätsklinikum Carl
 Gustav Carus
 Fetscherstrasse 74
 D-01307 Dresden
 Tel. +49 (0)351 458-2713
 Fax +49 (0)351 458-5381
 E-Mail: Marie-Theres.Weber
 @uniklinikum-dresden.de

SWISS DENTAL JOURNAL SSO 125:
 303-311 (2015)
 Zur Veröffentlichung angenom-
 men: 18. August 2014

Möglichkeiten und Grenzen der Darstellung von endodontischen Strukturen mit der DVT

SCHLÜSSELWÖRTER

Dentale Volumentomographie;
 Endodontie;
 Diagnostik;
 zweidimensionale Röntgendiagnostik

ZUSAMMENFASSUNG

Eine adäquate Darstellung der Wurzelkanalanato-
 mie mit bildgebenden Verfahren ist die Voraus-
 setzung für eine erfolgreiche endodontische Dia-
 gnostik und Therapie. Mit der Einführung der
 dentalen digitalen Volumentomographie (DVT)
 konnte die bildgebende Diagnostik erheblich
 erweitert werden. Ziel der Studie war die Evaluie-
 rung der Darstellbarkeit endodontischer Struktu-
 ren mithilfe der dentalen DVT. 120 Zähne wurden
 mit der dentalen DVT untersucht. Die Befunde der
 dreidimensionalen Aufnahmen wurden mit zwei-
 dimensionalen Einzelzahnaufnahmen und Tan-
 gentialschliffpräparaten der untersuchten Zähne
 verglichen und evaluiert. Befunde mit hoher Prä-
 valenz wie vorhandene Wurzeln und Wurzelkanäle

als auch Befunde mit niedriger Prävalenz wie
 die feinsten anatomischen Strukturen liessen sich mit
 der dentalen DVT präzise visualisieren; Seiten-
 kanäle, Ramifikationen, Kommunikationen, Den-
 tikel und Obliterationen konnten detektiert wer-
 den. Zusätzlich liess sich die Länge gekrümmter
 Kanäle exakt bestimmen. Wurzelfrakturen konn-
 ten ebenfalls mit der dentalen DVT dargestellt
 werden. Demgegenüber liessen sich kariöse
 Läsionen nicht adäquat diagnostizieren und die
 Beurteilung von Füllungen und prothetischen
 Versorgungen war durch Artefakte erschwert.
 Die dentale DVT eignet sich zur Visualisierung und
 Diagnostik kleinster anatomischer Strukturen des
 Endodonts in drei Raumebenen.

Einleitung

Die Zahl endodontischer Behandlungen hat im Verlauf der letz-
 ten Jahrzehnte mit dem Rückgang von Extraktionen sowie bes-
 seren Möglichkeiten der Zahnerhaltung deutlich zugenommen
 (FARRELL & BURKE 1989); die Wurzelkanalbehandlung ist eine der
 häufigsten therapeutischen Massnahmen in der Zahnerhaltung
 geworden. Mit therapeutischen Erfolgsraten von 80 bis 90%
 darf bei einer richtigen Diagnose und Therapie gerechnet wer-
 den (FRIEDMANN 2002, HÜLSMANN 2005). Dennoch kann eine suffi-
 ziente Therapie durch eine komplexe Wurzelkanalanatomie
 (FISCHER 1907, MEYER 1971), z.B. stark gekrümmte Kanäle, akzes-
 sorische und obliterierte Kanäle, Dentikel oder Ramifikationen,
 erschwert sein. Bislang stellt die analoge respektive digitale

zweidimensionale intraorale Einzelzahnaufnahme ein unver-
 zichtbares Hilfsmittel in der klinischen Praxis zur Behandlungs-
 planung, Unterstützung der Therapie und Kontrolle des Thera-
 pieerfolges dar. Der Informationsgehalt der zweidimensionalen
 intraoralen Einzelzahnaufnahme kann jedoch die komplexe
 dreidimensionale Wurzelkanalanatomie nur eingeschränkt
 wiedergeben und gibt insbesondere bei spezifischen Fragestel-
 lungen wie Längsfrakturen oder Wurzelresorptionen oft nicht
 ausreichend Aufschluss (BRÄGGER ET AL. 2005, DOWKER ET AL.
 1997). Seit 1997 findet die dentale digitale Volumentomographie
 (DVT) zunehmend Eingang in die Zahn-, Mund-, und Kiefer-
 heilkunde. Im Gegensatz zur Erhebung einer Vielzahl zwei-
 dimensionaler Schnittbildaufnahmen wie bei der Computer-

tomographie (CT) wird bei der dentalen DVT nach Akquisition eines Aufnahmevolumens ein dreidimensionaler Datensatz rekonstruiert. Demgegenüber weist die Technik der dentalen DVT im Vergleich zur CT eine erheblich geringere Strahlenbelastung des Patienten auf (MOZZO ET AL. 1998, MÖBES ET AL. 2000, SCHULZE ET AL. 2005, ZIEGLER ET AL. 2002). Die DVT mit der Möglichkeit der überlagerungs- und verzerrungsfreien sowie präzisen Darstellung von Strukturen wird in der Zahnheilkunde vorrangig bei oralchirurgischen Fragestellungen angewendet (ARAKI ET AL. 2007, COHENCA ET AL. 2007). Auch in anderen Disziplinen der Zahnmedizin wie in der Parodontologie, Prothetik, Kieferorthopädie und in der Endodontologie finden hochauflösende dentale DVT-Aufnahmen eine immer breitere Anwendung (FLEINER ET AL. 2013A, FU ET AL. 2007, GANZ 2008, LOFTHAG-HANSEN ET AL. 2008). Weitere dreidimensionale Aufnahmetechniken wie das flächendetektorbasierte Volumen-CT (FD-VCT) (HANNIG ET AL. 2006) und die Tuned-Aperture Computed Tomography (TACT) (NAIR ET AL. 2001, NAIR ET AL. 2003) sind auf diesem Gebiet ebenfalls sehr vielversprechend. Allerdings beschränkt sich ihre Anwendung bislang nur auf experimentelle und präklinische Studien, da die Geräte entweder eine verhältnismässig hohe Strahlenbelastung aufweisen (HANNIG ET AL. 2006, HERRMANN ET AL. 2005), die variable Einblendung des Röntgenstrahls nicht möglich ist (HAHN ET AL. 2009), eine zu lange Scanzeit beansprucht wird (HANNIG ET AL. 2005, HEIDRICH ET AL. 2005, PETERS ET AL. 2000) oder ihre Sensitivität und Bildqualität noch nicht zufriedenstellend sind (NAIR ET AL. 2001, NAIR ET AL. 2003).

Mit der Microcomputertomographie (μ -CT) können Strukturen von bis zu 20 μ m evaluiert werden (BJØRNDAL ET AL. 1999, NIELSEN ET AL. 1995, PATEL ET AL. 2012, PETERS ET AL. 2003, RHODES ET AL. 2000). Die μ -CT wird aufgrund der hohen Strahlendosis, der geringen Gantrygrösse und der langen Belichtungszeit von bis zu mehreren Stunden nur *in vitro* angewendet. Ziel der präklinisch-experimentellen Studie war es, die Darstellbarkeit unterschiedlicher endodontischer Befunde mithilfe der DVT zu untersuchen. Es galt die Indikationsstellung für die Verwendung der DVT zu definieren und ihre Grenzen besser abschätzen zu können. Die Beurteilung der Befunde erfolgte im Vergleich mit zweidimensionalen Einzelzahnaufnahmen und Tangentialschliffpräparaten als Goldstandard.

Material und Methoden

Untersuchungspräparat

Einhundertzwanzig humane Zähne wurden im Rahmen von Routinebehandlungen der Zahnklinik Freiburg extrahiert und anonymisiert der Untersuchung zugeführt (Tab. I). Die Incisivi, Prämolaren und Molaren wurden bis zur Untersuchung in einer 1%-Thymol-Lösung gelagert und zur Dokumentation fotografiert. Um eine exakte Reproduzierbarkeit der unterschiedlichen Aufnahmetechniken gewährleisten zu können, wurden die Zähne jeweils in einen Kunststoffblock eingebettet (Technovit, Heraeus Kulzer GmbH, Wehrheim, Deutschland).

Zweidimensionale Darstellung mittels Einzelzahnaufnahmen

Die digitalen Röntgenaufnahmen der einzelnen Zähne wurden mit dem Gerät Gendex Oralix AC, Kavo Dental GmbH, Hamburg, Deutschland in Speicherfolientechnik mit den Massen 2 \times 4 cm angefertigt (2+, D1415588, 2008-01, Dürr Dental AG, Bietigheim-Bissingen, Deutschland), mit dem System VistaScan Perio (Dürr Dental AG, Bietigheim-Bissingen) eingelesen und als TIFF-Datei exportiert. Die Aufnahmen

Tab. I Anatomische Verteilung der untersuchten Zähne

Zahntyp	Anzahl
Oberkieferfrontzähne	5
Unterkieferfrontzähne	7
Oberkieferreckszähne	6
Unterkieferreckszähne	2
Oberkieferprämolaren	9
Unterkieferprämolaren	6
Oberkiefermolaren	26
Unterkiefermolaren	24
Milchzähne	20
Weisheitszähne	14
Gemination	1

der Prüfkörper in Rechtwinkeltechnik wurden mit einem vestibulo-oralen Strahlengang und einer optimalen Belichtungsdauer von 0,26 s standardisiert angefertigt. Die Röhrenspannung betrug 65 kV bei einer Röhrenstromstärke von 7,5 mA. Ein definierter Fokus-Objekt-Abstand konnte durch eine speziell für den Versuch angefertigte Vorrichtung sichergestellt werden.

Dreidimensionale Darstellung mittels dentaler Volumentomographie

Die dentale DVT-Analyse der Zähne erfolgte mithilfe des Gerätes ProMax 3-D (Planmeca, Helsinki, Finnland). Für die hergestellten Kunststoff-Zahn-Blöcke wurde eine geeignete Vorrichtung aus Polytetrafluorethylen (PTFE) angefertigt, die eine reproduzierbare und konstante Positionierung der Prüfkörper in dem dentalen DVT-Gerät gewährleistete, sowie einen standardisierten Abstand von Strahlenquelle zu Flächendetektor vorgab. Zusätzlich wurde die Position der Zähne mithilfe eines Laser-Lichtvisiers optimiert. Für die vorliegende Studie wurde eine Bildauflösung (Voxelgrösse) von 160 μ m verwendet. Die Anfertigung der dentalen DVT-Aufnahmen erfolgte mit einer Röhrenspannung von 82 kV und einer Röhrenstromstärke von 6 mA. Anhand der 3-D-Bilderfassungssoftware kann im 3-D-Imaging-Modul ein Objekt in den drei relevanten Ebenen axial, koronal und sagittal sowie in einer gerenderten 3-D-Ansicht betrachtet werden. Zusätzlich können mithilfe von Bildbearbeitungswerkzeugen die Bildqualität verbessert werden und mit unterschiedlichen Funktionen wie Winkel- und Längenmessungen ergänzende Auswertungen vorgenommen werden.

Herstellung der Tangentialschliffpräparate

Abschliessend wurden nach Anfertigung der digitalen Röntgenbilder und DVT-Aufnahmen mithilfe eines destruktiven Verfahrens die unterschiedlichen Wurzelkanalanatomien visualisiert. Dazu wurden aus den in Kunststoff eingebetteten Zahnproben mit einem Nassschleifgerät (Knuth-Rotor-3, Struers, Willich, Deutschland) und Schleifpapierscheiben verschiedener Körnungsgrade (500, 800 und 1200) jeweils ein Tangentialschliffpräparat hergestellt. Daraufhin erfolgten eine Politur (Körnung: 4000) sowie digital-mikroskopische Aufnahmen

der Zahnscheiben. Die angefertigten Tangentialschliffpräparate fungierten als Goldstandard und wurden mit den Befunden der dentalen DVT-Aufnahmen verglichen.

Prinzip der Datenauswertung

Die unterschiedlichen radiologischen Verfahren (zweidimensionale Einzelzahnaufnahmen und dreidimensionale dentale digitale Volumetomographie) und die Fotografien der Schliffpräparate wurden hinsichtlich der Beurteilbarkeit endodontischer Strukturen evaluiert. Hierfür wurden die zweidimensionalen Einzelzahnaufnahmen und dentalen DVT-Aufnahmen sowie die Fotografien der zu untersuchenden Zähne randomisiert mit verschiedenen Zahlenkombinationen kodiert, um eine geblindete Untersuchung zu ermöglichen. Die Untersucher, zwei approbierte Zahnärzte, wurden in die Betrachtungsprogramme eingewiesen und anhand von Beispielbildern kalibriert. Sie verwendeten für die Betrachtung der Bilder stets denselben PC und denselben Bildschirm in einem abgedunkelten Raum. Des Weiteren bestand für die Untersucher die Möglichkeit, die Grösse der dargestellten Röntgenbilder sowie deren Helligkeit und Kontrast zu ändern.

Jeder Untersucher begutachtete eine Aufnahme pro Zahn und verglich sie mit dem Goldstandard. Hierbei untersuchte Zahnarzt A z.B. die zweidimensionale Einzelzahnaufnahme des Zahnes Nr. 1 und Zahnarzt B die dreidimensionale dentale DVT-Aufnahme des Zahnes Nr. 1.

Evaluierte Parameter

Die Beurteilbarkeit verschiedener endodontischer Strukturen wurde, in für die Studie entwickelten Auswertungsbögen, festgehalten. Es erfolgte für alle Parameter jeweils die Begutachtung in der zweidimensionalen Einzelzahnaufnahme und in der dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahme. Im Anschluss erfolgte der Vergleich der Befunde mit dem Goldstandard. Folgende Parameter wurden in dieser Studie evaluiert:

Die Anzahl sichtbarer Wurzeln und Wurzelkanäle der einzelnen Zähne wurde mit den unterschiedlichen Visualisierungsmög-

lichkeiten der Aufnahmetechniken beurteilt. Des Weiteren wurde die Anzahl sichtbarer Seitenkanäle bestimmt. Hierbei handelte es sich um das Vorhandensein von akzessorischen Wurzelkanälen, die sich zusätzlich zu der in der Literatur angegebenen Wurzelkanalanzahl pro Zahn im Wurzelkanalsystem eines Zahnes befinden können. Dünne Verzweigungen der Hauptwurzelkanäle, *Ramifikationen*, und Verbindungen der Wurzelkanäle untereinander, *Kommunikationen*, wurden bezüglich ihrer Visualisierbarkeit mit den unterschiedlichen Aufnahmetechniken evaluiert. Zusätzlich wurden die Wurzelkanäle auf ihre Kontinuität sowie die mögliche Ausbildung von Hartgewebsappositionen, *Obliterationen*, innerhalb des Wurzelkanals überprüft. Das Vorhandensein von *Querfrakturen* und *Längsfrakturen* wurde als Diskontinuität der Wurzel in horizontaler oder vertikaler Ausrichtung beurteilt.

Die Anzahl vorhandener koronaler Füllungen und prothetischer Versorgungen und ihre Suffizienz hinsichtlich ihres Randschlusses sowie die Suffizienz (Homogenität, Randsichtigkeit und Vollständigkeit) von Wurzelkanalfüllungen wurden ebenfalls bewertet.

Neben der Unterscheidung zwischen Schmelz und Dentin und dem Vermerk von Artefakten mit den unterschiedlichen Aufnahmetechniken erfolgte die Beurteilung kariöser Läsionen hinsichtlich ihrer Ausdehnung.

Röntgenologische Vermessung

Die Arbeitslänge, ein sehr wichtiger therapeutischer Parameter für die Wurzelkanalbehandlung, wurde beim Vergleich zwischen zweidimensionaler Einzelzahnaufnahme und dreidimensionaler dentaler DVT-Aufnahme berücksichtigt. Bei allen 120 zweidimensionalen Einzelzahnaufnahmen sowie bei allen 120 dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahmen erfolgte die Messung der Distanz zwischen Pulpenkammerdach und physiologischem Foramen apicale der Wurzelkanäle. Hierbei wurde die Arbeitslänge der digitalen Einzelzahnaufnahmen mit der Software DBSWIN 4.5 (Dürr Dental AG, Bietigheim-Bissingen, Deutschland) und die Arbeitslänge der dreidimensionalen

Tab. II Gesamtübersicht der Untersuchungsergebnisse

Untersuchungskriterien	Goldstandard	Zahnfilm	DVT
	korrekte Befunde in absoluten Zahlen		
Wurzelszahl	250	245	249
Wurzelkanäle	295	230	294
Seitenkanäle	16	5	10
Wurzelkanalfüllungen	16	16	16
Querfrakturen	5	3	4
Längsfrakturen	5	2	5
Ramifikationen	43	26	41
Kommunikationen	20	7	19
Obliteration	4	3	4
Füllungen	65	61	46
Karies	83	79	55
Artefakte	0	10	60

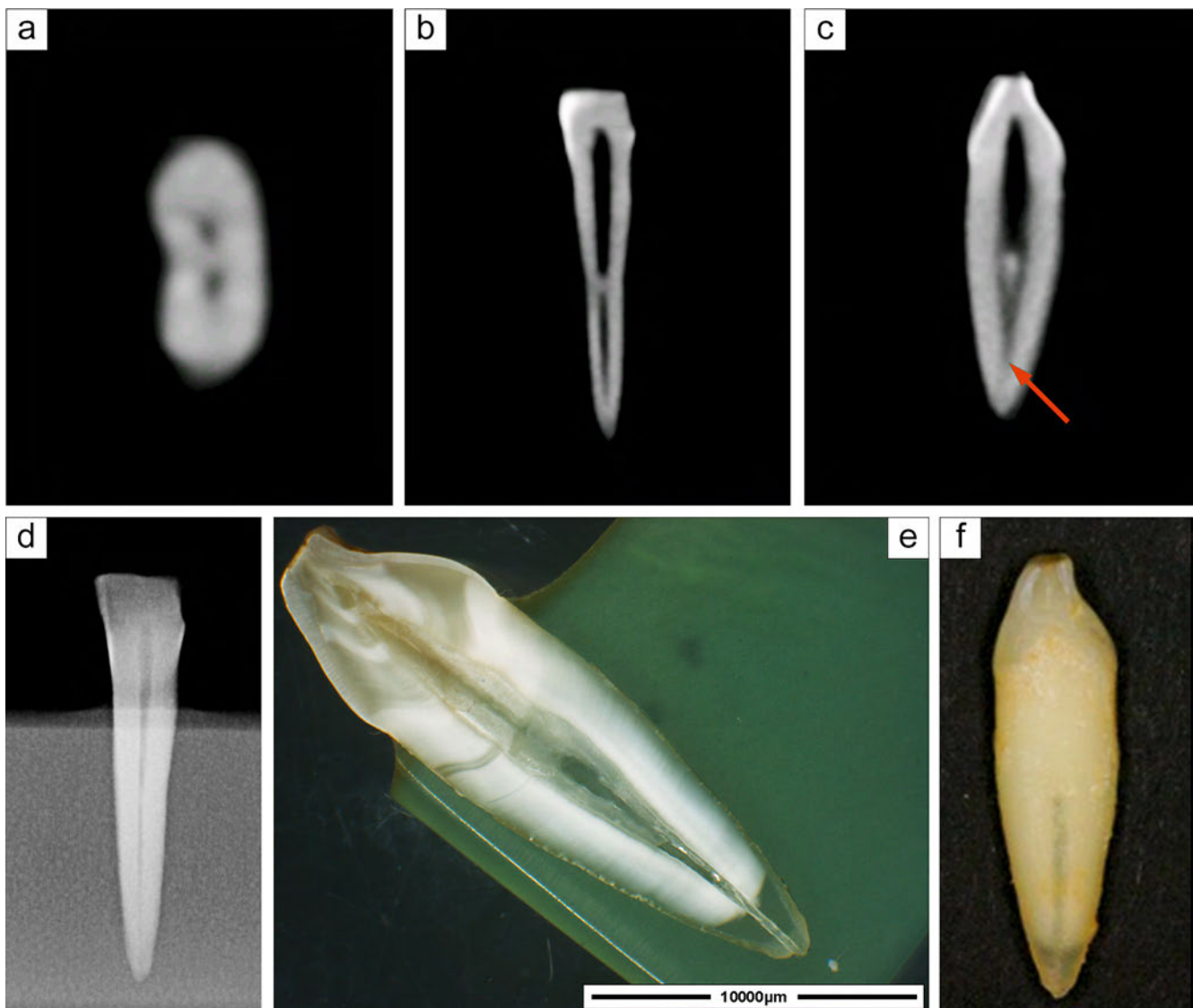


Abb. 1 Unterkieferfrontzahn mit 2 Wurzelkanälen:
 a DVT-Darstellung in axialer Schnittebene, zwei Wurzelkanäle sind detektierbar
 b DVT-Darstellung in coronaler Ansicht
 c DVT-Darstellung in sagittaler Schnittebene, Wurzelkanalkonfiguration Typ II, markierte Konfluenz
 d Zahnfilmaufnahme in üblicher vestibulo-oraler Projektion, lediglich ein Kanal ist erkennbar, relativ schmales Kanallumen
 e Mesio-distales Schliffpräparat
 f Ansicht des Zahnes von mesial

dentalen DVT-Aufnahmen mithilfe der 3-D-Bilderfassungssoftware der dentalen DVT (Planmeca Romexis 3-D Explorer, Planmeca, Helsinki, Finnland) bestimmt.

Statistische Auswertung

Die Befunde der evaluierten Parameter mit dem jeweiligen Röntgenverfahren (dreidimensionales dentales DVT/zweidimensionaler Einzelzahnfilm) wurden in Bezug zu den Befunden des Goldstandards gesetzt. Für den evaluierten Parameter röntgenologische Vermessung wurden die statistischen Kenngrößen Mittelwert, Standardabweichung sowie ein Korrelationskoeffizient bestimmt. Der berechnete Korrelationskoeffizient r nach Pearson quantifiziert die Stärke des Zusammenhangs und beschreibt den Zusammenhang der röntgenologischen Verfahren (dreidimensionales dentales DVT/zweidimensionale Einzelzahnfilm).

Resultate

Anhand festgelegter Kriterien in Form eines Prüfbogens konnten die erhobenen Befunde der 120 extrahierten Zähne untereinander verglichen werden. Für die unterschiedlichen radiologischen Verfahren liessen sich Vor- und Nachteile aufzeigen. Ein direkter Vergleich zwischen den zweidimensionalen Einzelzahnfilm und der dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahme ist der Tabelle II zu entnehmen.

Die Anzahl an Wurzeln, Wurzelkanälen und deren Konfiguration, Ramifikationen und Obliterationen konnte in der dreidimensionalen Bildgebung deutlicher dargestellt werden als mit einer zweidimensionalen Einzelzahnfilm.

Verdeutlicht wird dieses in dem in Abbildung 1 dargestellten Befund eines Unterkieferfrontzahnens mit zwei Wurzelkanälen, die mit einer Einzelzahnfilm nicht vollständig erfasst werden konnten. Ein ähnliches Beispiel zeigt Abbildung 2, hier

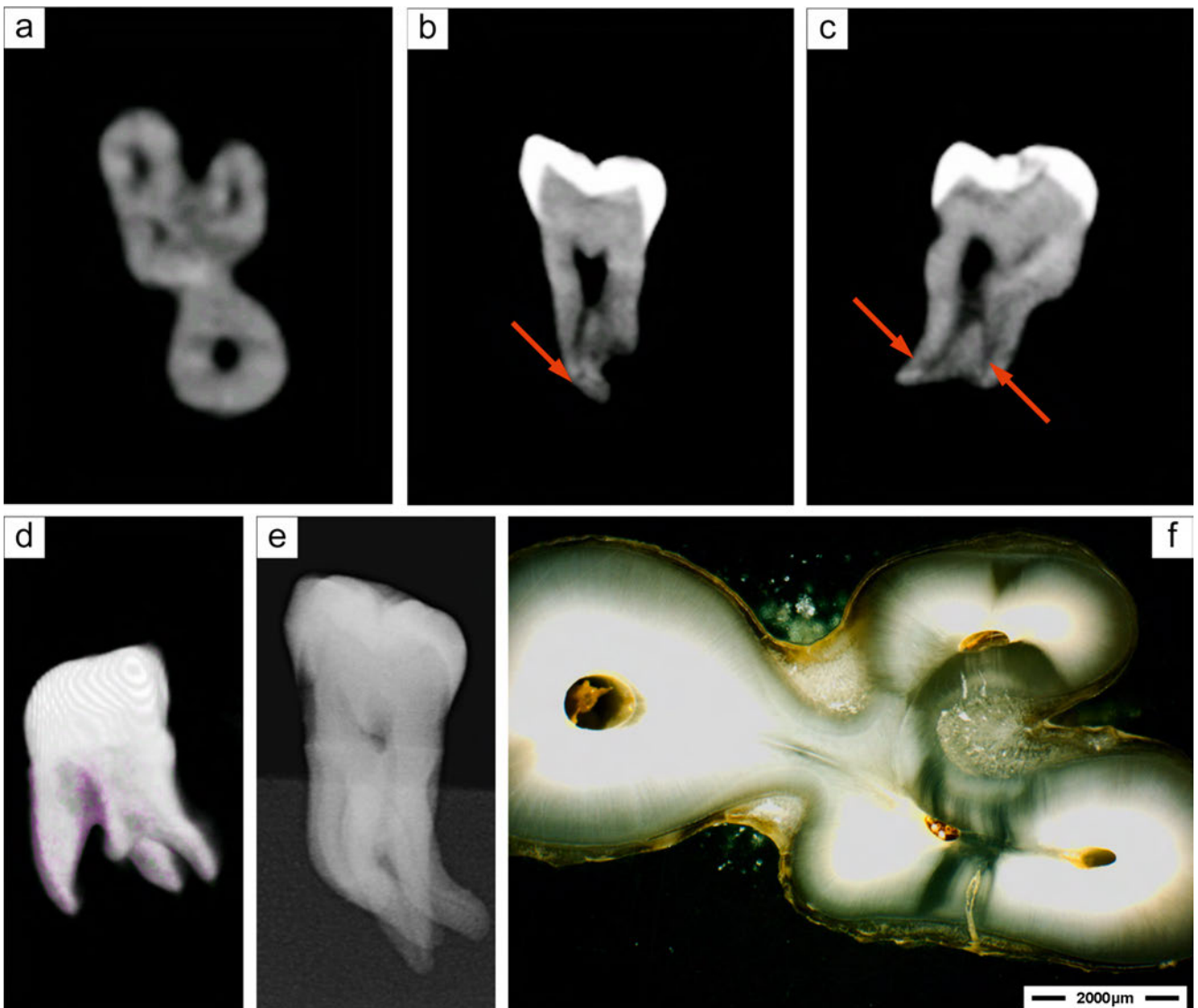


Abb. 2 Oberkiefermolar mit abnormer Wurzelanzahl und komplexer Wurzelkanalanatomie:
 a DVT-Darstellung in axialer Schnittebene, vier Wurzelkanäle sind sichtbar
 b DVT-Darstellung in coronaler Darstellung, Seitenkanal in der mesiobukkalen Wurzel (Pfeil)
 c DVT-Darstellung in sagittaler Schnittebene, Darstellung mb1 und mb2 mit Dentinüberhang (Pfeile)
 d DVT-Darstellung in gerendeter Ansicht, vier Wurzeln sind differenzierbar
 e Zahnfilm in vestibulo-oraler Projektion, vier Wurzeln sowie vier Kanäle sind nicht deutlich differenzierbar
 f Schliffpräparat, apikal-koronale Darstellung des Wurzelkanalsystems ca. 3 mm unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze

handelt es sich um einen Oberkiefermolaren mit abnormer Wurzelanzahl und Wurzelkanalanatomie. Erst mithilfe der dentalen DVT gelang es, eine vollständige Übersicht über die vierwurzelige Morphologie des Zahnes und Komplexität der Wurzelkanalanatomie zu erfassen.

Die Wurzelanzahl wurde mit dem Goldstandard auf 250 erkennbare Zahnwurzeln festgesetzt. Mit der dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahme wurden 249 (99,6%) Zahnwurzeln korrekt erkannt und mit der zweidimensionalen Einzelaufnahme 245 (98%) Zahnwurzeln befundet. Bei der Untersuchung der Anzahl an Wurzelkanälen wurden von insgesamt 295 im Goldstandard vorhandenen Wurzelkanälen mit der dentalen DVT 294 (99%) Kanäle erkannt und mit den zweidimensionalen Einzelaufnahmen 230 (78%) Wurzelkanäle. Von insgesamt 16 im Goldstandard vorhandenen Seitenkanälen/akzessorischen Kanälen wurden mit der dentalen DVT 10 Seitenkanäle

detektiert. Mit den zweidimensionalen Einzelaufnahmen konnten fünf Seitenkanäle korrekt diagnostiziert werden. Hinzuzufügen ist, dass mit den zweidimensionalen Einzelaufnahmen sieben falsch positive Ergebnisse befundet wurden, was mit der dentalen DVT nicht vorkam.

In Bezug auf die Längenmessung der Wurzelkanäle wurde ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,915$ ermittelt, der einen starken, gleichsinnigen Zusammenhang zwischen der Längenmessung mit der dreidimensionalen dentalen DVT und der zweidimensionalen Einzelaufnahme beschreibt.

Bei Untersuchung der Befunde auf Querfrakturen wurden mit der dentalen DVT vier von fünf vorhandenen Querfrakturen diagnostiziert. Anhand der zweidimensionalen Einzelaufnahmen konnten drei der vorhandenen Querfrakturen korrekt identifiziert werden. Längsfrakturen liessen sich, verglichen mit dem Goldstandard, zu 100% im dentalen DVT

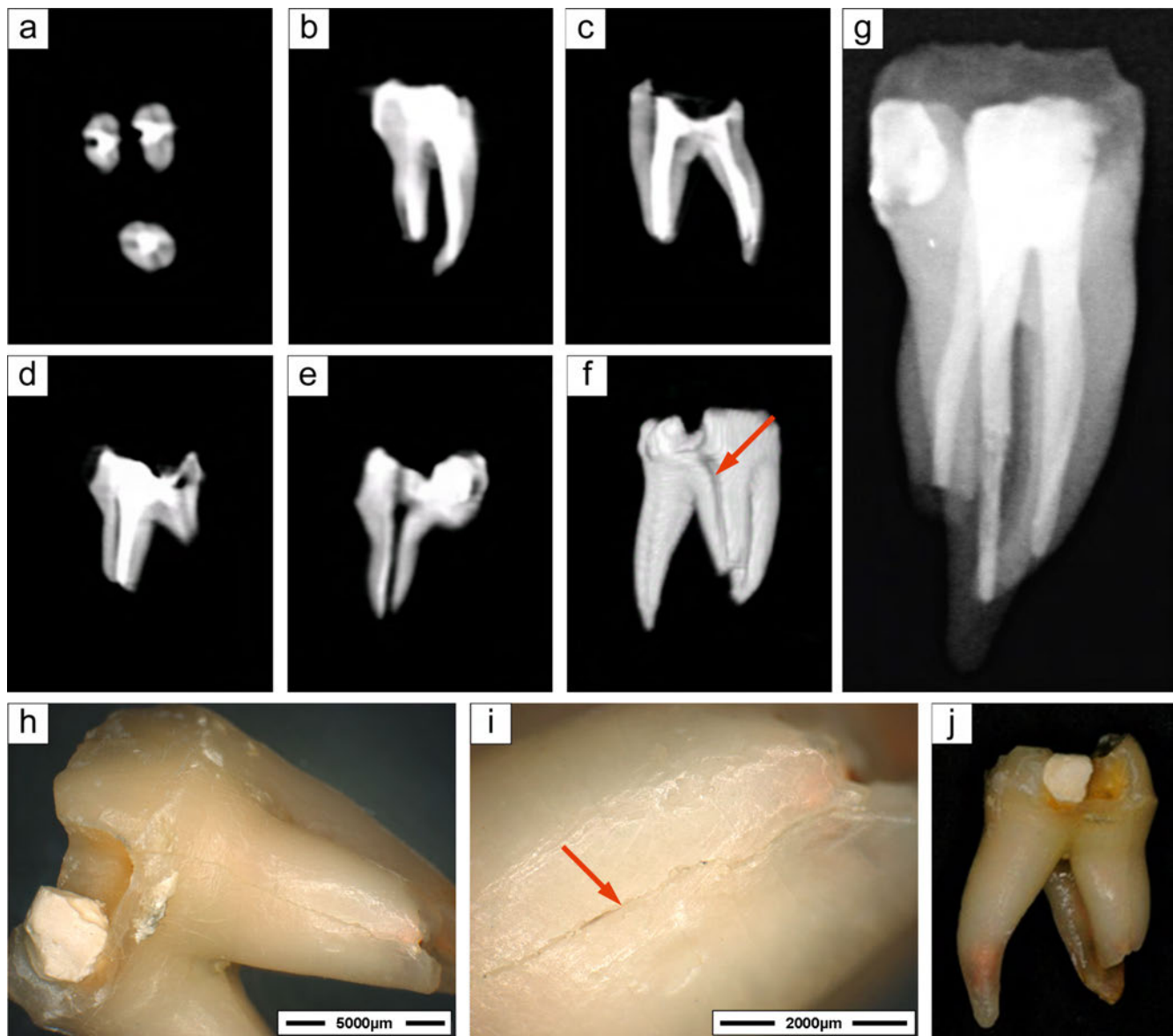


Abb. 3 Oberkiefermolar mit Längsfraktur, Zustand nach Wurzelspitzenresektion:

- a DVT-Darstellung in axialer Ansicht, drei wurzelgefüllte Kanäle sind erkennbar, Qualität der Wurzelfüllung nicht ausreichend beurteilbar
- b/c DVT-Darstellung in coronaler Ansicht
- d/e DVT-Darstellung in sagittaler Ansicht
- f DVT-Darstellung in geraderter Ansicht, vertikale Wurzelfraktur der mesiobukkalen Wurzel, Zustand nach WSR (Pfeil)
- g Zahnfilm, insuffiziente Wurzelfüllung
- h-j Digitale Fotografien, vertikale Wurzelfraktur (Pfeil)

detektieren. In der zweidimensionalen Einzelaufnahme wurden zwei von fünf im Goldstandard detektierten Längsfrakturen diagnostiziert. Der Befund in Abbildung 3 stellt einen Oberkiefermolar mit Längsfraktur und Zustand nach Wurzelspitzenresektion dar. In der zweidimensionalen Röntgenaufnahme jedoch, ist die Längsfraktur der mesiobukkalen Wurzel nicht erkennbar.

Sowohl mit zweidimensionalen Einzelaufnahmen als auch mit dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahmen konnten vorhandene Wurzelfüllungen diagnostiziert werden. Die Beurteilung der Qualität und Suffizienz der Wurzelfüllung hingegen war mithilfe von Schnittbilddatensätzen durch Artefaktbildung des Wurzelfüllmaterials erschwert und liess sich nur adäquat mit zweidimensionalen Einzelaufnahmen realisieren.

Ebenso beeinträchtigten metallische Restaurationen die Bildqualität der dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahmen. Abbildung 4 zeigt einen Zahn mit Amalgamfüllung, die in der dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahme zu Artefaktbildung führte und die Befundung der Aufnahme erheblich einschränkte. Auch in Wurzelkanäle eingebrachte Metallstifte resultierten in der Entstehung von Artefakten und liessen eine Diagnostik nur erschwert zu (Abb. 5). Dagegen wiesen zweidimensionale Einzelaufnahmen von Zahnwurzeln mit Metallstiften keine Artefakte auf.

Die für die endodontische Therapie notwendigen Informationen über die Wurzelkanallänge als auch die Länge von Seitenkanälen konnten bei allen untersuchten Wurzelkanälen korrekt mit der dentalen DVT erhoben werden.

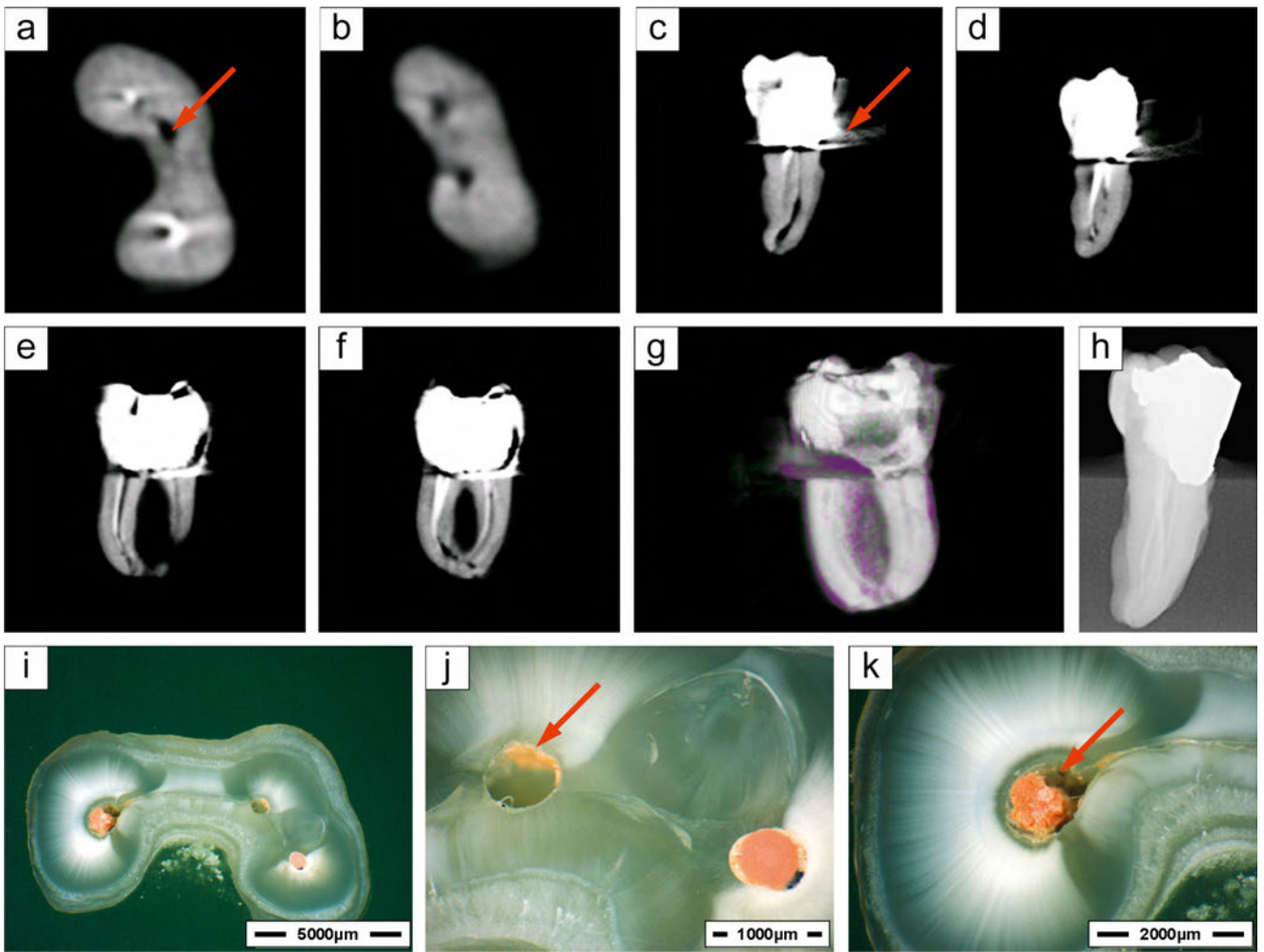


Abb. 4 Unterkiefermolar mit drei Wurzelkanälen und insuffizienter Wurzelfüllung:

- a DVT-Darstellung in axialer Ansicht, drei Wurzelkanäle erkennbar, davon zwei wurzelgefüllt (unbehandelter Wurzelkanal markiert)
- b DVT-Darstellung in axialer Ansicht, beide Wurzelkanäle ohne Füllungsmaterial
- c/d DVT-Darstellungen in sagittaler Ansicht, Luftsinschlüsse zwischen der Wurzelfüllung und der Kanalwand, Artefakte der coronalen Restauration (Pfeil)
- e/f DVT-Darstellungen in coronaler Ansicht, C-förmiger Verlauf des mesio-lingualen und des distalen Kanals, Qualität der Füllung infolge der Artefakte nicht zu beurteilen
- g DVT-Darstellung in gerendeter Ansicht, füllungsbedingte Artefakte
- h Zahnfilm, Anzahl der Wurzeln wie auch das Wurzelkanalsystem sind nicht differenzierbar
- i-k Fotografien der Schliffpräparate, apikal-koronaler Schliff, Wurzelfüllung im distalen und mesio-lingualen Kanal nicht randständig, insuffizient kondensiert (siehe Markierung in Abbildung k), im mesio-bukkalen Kanal Reste von Wurzelfüllmaterial (siehe Abbildung j)

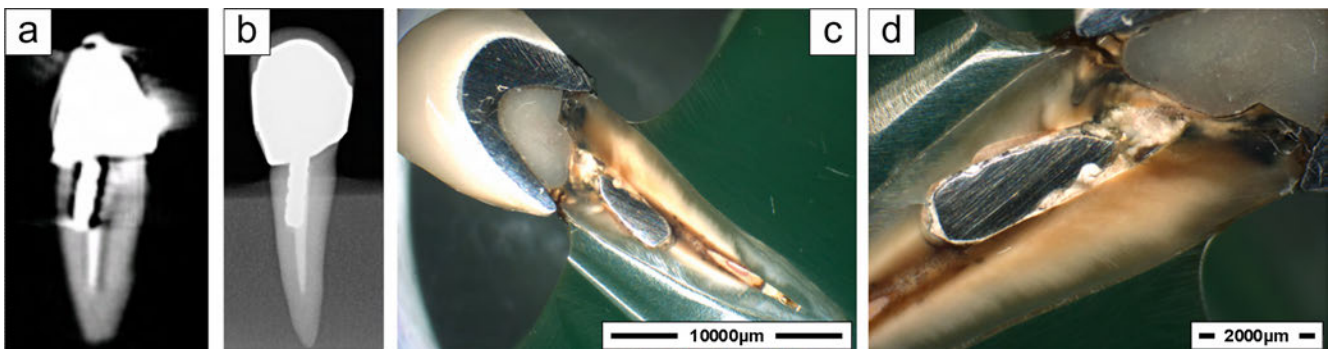


Abb. 5 Oberkieferfrontzahn mit Stift-Stumpfaufbau:

- a DVT-Darstellung in sagittaler Ansicht, Wurzelfüllung des zentralen Kanals erscheint zu kurz, Stift weicht nach vestibulär von der ursprünglichen Wurzelkanalachse ab, Suffizienz der prothetischen Versorgung aufgrund restaurationsbedingter Artefakte nicht zu beurteilen
- b Zahnfilm, Wurzelfüllung insuffizient, Stift nicht achsengerecht
- c/d Fotografien der Schliffpräparate, Schliff von bukkal nach oral, durch Stift verursachte Perforation der bukkalen Kanalwand, Randschluss der Krone insuffizient, kariöse Läsionen

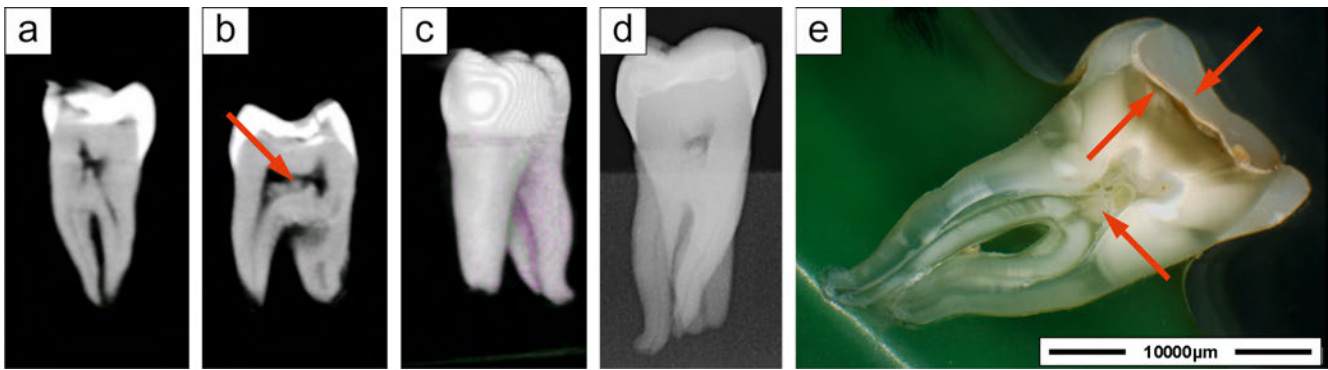


Abb. 6 Oberkiefermolar mit Dentikel:

- a DVT-Darstellung in coronaler Ansicht
- b DVT-Darstellung in sagittaler Ansicht, Dentikel in der Kronenpulpa adhärent am Pulpakammerboden (Pfeil)
- c DVT-Darstellung in gerendeter Ansicht
- d Zahnfilm, Wurzelkanalanatomie und Dentikel nicht eindeutig zu differenzieren
- e Schliffpräparat, Darstellung des in der Kronenpulpa lokalisierten Dentikels und Füllung mit Sekundärkaries (siehe Markierungen)

Erweichte, denaturierte sowie demineralisierte kariöse Zahnhartsubstanz stellte sich in der dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahme grössenabhängig als schwarze Fläche dar. Von 83 im Goldstandard diagnostizierten kariösen Defekten liessen sich lediglich 55 (66,3%) der Läsionen korrekt mit der dentalen DVT erkennen. Demgegenüber liessen sich 79 (95,2%) der kariösen Läsionen mit zweidimensionalen Einzelzahnaufnahmen darstellen. Eine genaue Beurteilung der kariösen Läsionen war mit der dentalen DVT nicht möglich, während anhand der zweidimensionalen Einzelzahnaufnahmen das Ausmass der Demineralisation bzw. der Schweregrad der Karies präzise erfasst werden konnte.

Das Vorhandensein und das Ausmass zusätzlicher Dentinstrukturen, Dentikel, liessen sich in der zweidimensionalen Einzelzahnaufnahme lediglich schwer ausmachen. Die Abbildung 6 stellt einen Oberkiefermolar mit Dentikeln im Pulpenkavum dar. In der zweidimensionalen Einzelzahnaufnahme konnten zwei der drei Dentikelstrukturen detektiert werden. In der dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahme hingegen wurden alle drei Dentikel erkannt. Weiterhin besteht mit der dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahme die Möglichkeit, mithilfe der koronalen und sagittalen Schnittebene die Ausdehnung der Dentikel zu bestimmen.

Diskussion

In der vorliegenden präklinisch-experimentellen Studie wurde die Darstellbarkeit von Wurzelkanalanatomien anhand von zweidimensionalen Einzelzahnaufnahmen und dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahmen evaluiert und verglichen. Zusätzlich erfolgte ein Vergleich mit Tangentialschliffpräparaten der untersuchten Zähne.

Bei der Evaluation der standardisierten zweidimensionalen Einzelzahnaufnahmen muss beachtet werden, dass die *In-vitro*-Aufnahmen der extrahierten Zähne nicht die physiologische Situation widerspiegeln. Die Aufnahmeposition wurde über eine Röntgenvorrichtung standardisiert und war reproduzierbar. Bewegungsartefakte, Objektverzerrungen und zusätzliche Überlagerungen der Zähne durch benachbarte Strukturen und Weichgewebe (PATEL ET AL. 2009), wie sie unter *In-vivo*-Bedingungen immer der Fall sind, konnten demzufolge ausgeschlossen werden.

Als Goldstandard wurden für den Nachweis spezieller anatomischer Wurzelkanalsysteme Tangentialschliffpräparate angefertigt. Allerdings handelte es sich hierbei um ein destruktives zweidimensionales Verfahren, bei dem nur ausgewählte anatomische Merkmale visualisiert werden konnten.

Mit der dentalen DVT ist es möglich, das gesamte Endodont und umgebende Strukturen zu rekonstruieren. Die Rekonstruktionsmöglichkeiten in sagittaler, axialer und koronaler Schnittebene ermöglicht die Analyse spezieller Strukturen aus unterschiedlichen Richtungen. Mithilfe dynamischer Bildinterpretation/-befundung kann der Zahn in seiner gesamten Länge in allen drei Raumebenen durchfahren und auf pathologische Befunde untersucht werden. Dagegen tritt bei zweidimensionalen Einzelzahnaufnahmen, insbesondere bei mehrwurzeligen Zähnen, oft die Problematik der Überlagerung von Wurzelkanälen auf. Die Diagnostik ist dann meist nur mithilfe von exzentrischen Einzelzahnaufnahmen möglich, die allerdings ebenfalls Überlagerungen aufweisen können, häufig nicht das gesamte Wurzelkanalsystem darstellen und einen geübten Interpreten voraussetzen (HÜLSMANN 2008, RHODES ET AL. 1999).

Die Wurzelkanalbehandlung von Zähnen mit diffiziler und von der Norm abweichender Kanalconfiguration stellt nach wie vor eine diagnostische und technische Herausforderung dar. Die Erfassung aller Kanalstrukturen und Entfernung des Nervengewebes ist für die endodontische Behandlung essenziell. Nichtbehandelte Kanalabschnitte führen immer wieder zu Reinfektionen und Misserfolgen (LIN ET AL. 1991, SIQUEIRA ET AL. 1997, TANEJA ET AL. 2010). Konventionelle als auch digitale zweidimensionale Einzelzahnaufnahmen erfassen nur schwer die Existenz von Seitenkanälen, Kommunikationen, Ramifikationen und Frakturen (KOTTOOR ET AL. 2010). Mit der dentalen DVT hingegen konnten in der vorliegenden Studie feinste anatomische Strukturen des Endodonts wie Wurzelkanäle und deren Konfigurationstyp, Seitenkanäle, Kommunikationen, Obliterationen und Dentikel zuverlässig detektiert werden. Weitere Studien bestätigen diese Ergebnisse und geben zusätzlich an, dass bei der Diagnostik von Wurzelresorptionen, Perforationen (*via falsa*) und apikalen Parodontitiden ebenfalls die Anwendung der dentalen DVT von Vorteil ist (BALL ET AL. 2013, BLATTNER ET AL. 2010, KOTTOOR ET AL. 2010, LIANG ET AL. 2011, MICHETTI ET AL. 2010, PATEL ET AL. 2012, SHEMESH ET AL. 2011, YOSHIOKA ET AL. 2011,

YOUNG 2007). Ferner stellt die dentale DVT ein innovatives, diagnostisches Verfahren dar, mit der Möglichkeit endodontische Besonderheiten wie c-förmige Wurzelkanäle, *radices entomolares*, Invaginationen sowie dritte mesiale Wurzelkanäle in unteren Molaren zu bestimmen (ABELLA ET AL. 2011, DURACK & PATEL 2011, LA ET AL. 2010, ZHENG ET AL. 2011).

Des Weiteren war es in dieser Studie möglich, mithilfe der dentalen DVT exakt die Längen gekrümmter Kanäle, Kommunikationen und Seitenkanäle zu ermitteln. Weitere Studien beschreiben die Bestimmung der Länge und Position frakturierter Wurzelkanalinstrumente (ARNOLD 2011, D'ADDAZIO ET AL. 2011) sowie die präzise Beurteilung der Lage und Ausdehnung ungewünschter Stufenpräparationen mit der dentalen DVT (YOUNG 2007).

Sowohl die hohe Auflösung als auch die genaue Übersicht und Darstellung angrenzender Strukturen mit der dentalen DVT ermöglichen eine frühzeitige Frakturerkennung (EDLUND ET AL. 2011, FLEINER ET AL. 2013B, HANNIG ET AL. 2005, HASSAN ET AL. 2009). In der vorliegenden Studie konnten mithilfe der dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahmen 100% (n=5) der Wurzellängsfrakturen und 80% (n=5) der Querfrakturen diagnostiziert werden. Demgegenüber liessen sich 2 von 5 der Längsfrakturen und 3 von 5 der Querfrakturen mit zweidimensionalen Einzelzahaufnahmen visualisieren.

Die Studien von OZER (2010) und WANG ET AL. (2012) bestätigten diese Ergebnisse. Sie zeigen auf, dass dreidimensionale dentale DVT-Aufnahmen den zweidimensionalen orthoradialen Einzelzahaufnahmen bei der Frakturdiagnostik überlegen waren. Allerdings muss bei der Beurteilung der vorliegenden Ergebnisse das Nyquist-Theorem berücksichtigt werden. Dieses besagt, dass sich nur Strukturen darstellen lassen, welche die Grösse von zwei Voxeln aufweisen. Unterschreitet ein Frakturspalt diese Dimensionierung, kann eine vorliegende Fraktur unter Umständen nicht detektiert werden (FLEINER ET AL. 2013B). Weiterhin lassen sich Längsfrakturen bei bereits wurzelgefüllten Zähnen nur erschwert mit der dentalen DVT diagnostizieren (HASSAN ET AL. 2009). In einer Studie von PATEL ET AL. (2013) resultierten die durch Guttapercha bedingten Artefakte in einer Fehlinterpretation vertikaler Frakturen. Lediglich 57% der vorhandenen Längsfrakturen konnten mit der dentalen DVT diagnostiziert werden. Im Vergleich dazu wiesen zweidimensionale Einzelzahaufnahmen eine höhere Spezifität, aber eine niedrigere Sensitivität bei der Beurteilung vorhandener Längsfrakturen auf als die dentale DVT.

Im Gegensatz zu den bereits genannten Vorteilen kann die Diagnostik kariöser Läsionen effektiver mit zweidimensionalen Einzelzahaufnahmen realisiert werden. In dieser Studie wurden lediglich 66,3% (n=83) der vorhandenen kariösen Läsionen mit der dentalen DVT diagnostiziert. Eine Studie von ZHANG ET AL. (2007) bestätigt diese Ergebnisse und gibt an, dass bedingt durch Artefakte ausgehend von Metallrestorationen oder der Zahnhartsubstanz der Nachbarzähne eine approximale Kariesdiagnostik kaum möglich ist (RITTER ET AL. 2009). Im Gegensatz

dazu zeigt eine Studie der Arbeitsgruppe HAAK ET AL. (2006) an, dass mit der klassischen Bissflügeltechnik nur 29% der Läsionen bezüglich ihres Schweregrades (Läsionstiefe, Kariesdiagnose) richtig beurteilt werden. Demgegenüber wies die dreidimensionale dentale DVT-Aufnahme bezüglich der approximalen Kariesdiagnostik eine Sensitivität von 80% bei einer Spezifität von 96% auf. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich kariöse Läsionen mit und ohne Kavitation im Dentin sehr gut mit der dentalen DVT visualisieren lassen und lediglich die Differenzierung von Diskontinuitäten im Zahnschmelz Schwierigkeiten bereitet (HAAK ET AL. 2006). Dagegen beschreibt VALIZADEH ET AL. (2012), dass dreidimensionale dentale DVT-Aufnahmen im Vergleich zu konventionellen zweidimensionalen Einzelzahaufnahmen zu keiner verbesserten Diagnostik kariöser approximaler Läsionen führen.

Die dentale DVT bietet zwar in den meisten Fällen eine umfassendere Diagnostik als zweidimensionale Einzelzahaufnahmen (JACOBS 2011); allerdings sind die dreidimensionalen Aufnahmen mit einer erhöhten Strahlenbelastung des Patienten verbunden. Gemäss der deutschen Röntgenverordnung (2002) ist nach § 23 für jede Aufnahme eine rechtfertigende Indikation erforderlich, und jede diagnostische Fragestellung ist mit der niedrigsten möglichen effektiven Dosis zu bearbeiten. Bei der Anfertigung von zweidimensionalen Einzelzahaufnahmen muss mit einer durchschnittlichen effektiven Dosis von 4–8 µSv gerechnet werden (OKANO ET AL. 2009). Die effektive Dosis bei der Anfertigung einer dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahme ist prinzipiell abhängig vom verwendeten Gerätetyp, dem Untersuchungsvolumen sowie insbesondere den Expositionsparametern der Aufnahme. Bei einer dreidimensionalen dentalen DVT-Aufnahme mit mittlerem FOV (field of view) wird der Patient einer durchschnittlichen effektiven Dosis zwischen 69–560 µSv ausgesetzt (LUDLOW & IVANOVIC 2008). Demzufolge sollte der gesundheitliche Nutzen des Menschen gegenüber der Anwendung von Röntgenstrahlung immer überwiegen (§ 23 RöV). Aufgrund der im Vergleich zur CT verringerten Strahlenbelastung der dentalen DVT weiten sich die Indikationsgebiete in die unterschiedlichen zahnmedizinischen Fachrichtungen aus. Die Leitlinie «DVT» der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) vom 6. April 2009 definiert Indikationen und Anwendungsbereiche der DVT in der Kieferorthopädie, Parodontologie, Endodontologie, Implantologie und bei der Diagnostik von Kiefergelenkserkrankungen (HONEY ET AL. 2007, VANDENBERGHE ET AL. 2007). Für die Endodontie wird laut Leitlinie «DVT» bislang die Anwendung bei apikalen Veränderungen empfohlen, deren Ausmass in der zweidimensionalen Bildgebung nicht ersichtlich ist sowie bei Verdacht auf Wurzelfrakturen und Resorptionen (DGZMK 2009).

Die vielfältigen Visualisierungstechniken der dentalen DVT führen bei schwierigen endodontischen Fragestellungen zu einer Verkürzung und Optimierung des therapeutischen Vorgehens.