

Dreidimensionale Bildgebende Verfahren in der zahnärztlichen Röntgendiagnostik

Zum aktuellen Stand der zahnärztlichen Radiologie

Ein Beitrag von Dr. Jörg Neugebauer, Dr. Lutz Ritter, Dr. Dr. Martin Scheer, Priv.-Doz. Dr. Dr. Robert A. Mischkowski und Univ. Prof. Dr. Dr. Joachim E. Zöller, Köln

Die dreidimensionale Röntgendiagnostik wird zurzeit aus therapeutischer, wirtschaftlicher und strahlenhygienischer Sicht intensiv diskutiert. Die Schnittstellenproblematik und die relativ hohe Strahlenbelastung schränken die Durchführung der weit verbreiteten Computertomographie für zahnärztliche Fragestellungen ein. Geräte zur digitalen Volumentomographie (DVT), auch Cone-Beam CT genannt, werden in zahlreichen Typen angeboten. Sie unterscheiden sich bezüglich der Auflösung, der Größe des darstellbaren Volumens und der Strahlenbelastung. Diese Parameter können, je nach Gerät, den Einsatz für einzelne Fragestellungen begrenzen. Zudem unterscheiden sich die Geräte in der Software zur Bildanalyse, was die Effektivität der zahnärztlichen Befundung oder die Weiterverarbeitung der Daten in speziellen Planungsprogrammen limitieren kann.

Radiologische Diagnostik

Die Entdeckung der Röntgenstrahlen vor über 100 Jahren hat zu deren mannigfachen Anwendung in der Medizin geführt. Die Radiologie stellt heute für den Zahnarzt das wesentliche bildgebende Verfahren zur Diagnostik und zur Verlaufskontrolle von Befunden dar. Die Spezialisierung des Zahnarztes auf eine relativ kleine Region des menschlichen Körpers erfordert die genaue Kenntnis der räumlichen Anordnung der Strukturen in diesem Areal. Nur dann kann er pathologische Prozesse frühzeitig erkennen und bei Interventionen die anatomischen Strukturen weitgehend schützen.

Die Anatomie des Gesichtsschädels beschreibt nicht nur detailliert die Zähne, sondern die komplexen Knochenstrukturen erzeugen im Röntgenbild verschieden stark ausgeprägte Konturen unterschiedlicher Dichte und Lumina. Dies gilt auch für die Aus- und Eintrittsöffnungen der sensiblen und motorischen Nerven, sowie deren Verlauf im Knochen. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die Anwen-

dung von Röntgenstrahlen in der zahnärztlichen Praxis mit einer Häufigkeit von 33 % aller Röntgenuntersuchungen auf medizinischem Gebiet – nach den Skelettaufnahmen der Unfall- und Orthopädischen Chirurgie mit 35 % – die zweithäufigste ist. Im Vergleich dazu werden aber lediglich 0,2% der auf die Gesamtbevölkerung einwirkenden effektiven Strahlenbelastung durch die zahnärztliche Radiologie erzeugt [11]. Da im Rahmen einer zahnärztlichen Behandlung, besonders bei der Wurzelkanalbehandlung, mehrmals geröntgt werden muss, oder etwa auch die Implantattherapie Verlaufskontrollen benötigt, wurden für die Zahnheilkunde spezielle Verfahren zur Verringerung der Strahlenbelastung entwickelt. Dies sind zum Beispiel die Bildverstärkerfolien oder digitale Aufnahmetechniken, die mit einer geringen Strahlenexposition eine hohe Informationsdichte ermöglichen (Abb. 1).

So wurden die intraoralen Röntgenfilme durch verschiedene Sensorgenerationen der digitalen Aufnahmetechnik abgelöst, wobei die Sensoren heute nur noch wenig Platz einnehmen. Zudem enthalten die Geräte für digitale Orthopantomogramme unterschiedliche Steuerungsmöglichkeiten, um gezielt Aufnahmen für Kinder, Erwachsene, aber auch im Rahmen spezieller Untersuchungsmethoden herzustellen. Zudem stehen spezielle Programme zur Verfügung, welche zusätzlich transversale Schichten ab-



Abb. 1: Postoperatives konventionelles OPG nach implantatprothetischer Versorgung

bilden, die senkrecht zur klassischen Panoramakurve ausgerichtet sind. Derartige Aufnahmen liefern eine dreidimensionale Information, die besonders für die Implantatplanung genutzt werden kann.

Computertomographie

In der Allgemeinmedizin wird die Computertomographie mit einer Häufigkeit von 6 % aller Röntgenuntersuchungen angewendet. Bei der effektiven Dosis werden hierbei in Deutschland 48,2 % der kollektiven Strahlenbelastung erzeugt. Dabei hat sich seit Einführung der Computertomographie die Aufnahmetechnik kontinuierlich verbessert, so dass heute Geräte mit 128 Zeilen eine hohe Auflösung bei geringer Strahlenexposition ermöglichen. Infolge der zeilenförmigen Aufnahme der Information muss der Patient mit der zu untersuchenden Region durch den Strahlengang bewegt werden. Durch einen kontinuierlichen Vorschub wird dann das so genannte Spiral-CT erzeugt (Abb. 2).

Die Computertomographie steht dem Zahnarzt in speziellen radiologischen Zentren zur Verfügung. Dort ist jedoch auch die jeweils individuelle Erfahrung mit zahnärztlichen Fragestellungen für die diagnostische Aussagekraft der CT-Aufnahmen entscheidend. Damit aufgrund der systembedingt hohen Strahlenbelastung beim CT die Patienten nicht einer unnötigen Strahlenexposition ausgesetzt werden, ist es wichtig, dass das Untersuchungsfenster entsprechend eingeschränkt wird. Dies kann aber bedeuten, dass relevante Detailinformationen nicht dargestellt werden. Durch die Schnittstelle Zahnarztpraxis – Radiologe entsteht so durchaus das Risiko, dass Aufnahmen wiederholt oder ergänzt werden müssen. Ferner ist bei der Computertomographie auf einen adäquaten Schichtabstand zu achten. Dieser liegt standardmäßig zwischen einem und zwei

Millimetern [6]. Besonders die feinen Strukturen im Bereich des Gesichtsschädels mit zahnärztlichen Befunden, wie etwa ein erweiterter Parodontalspalt, können bei diesen Schichtabständen, trotz hoher Ortsauflösung der einzelnen Schicht, nicht suffizient diagnostiziert werden.

Digitale Volumentomographie

Daher hat sich in der Zahnheilkunde seit etwa zehn Jahren die digitale Volumentomographie etabliert [8]. Bei der DVT wird ein konischer Strahlengang verwendet, was eine volumetrische Darstellung des untersuchten Areals ermöglicht. Das Verfahren wird seit Jahren auch in der Unfallchirurgie verwendet, um intraoperativ die Lage von Instrumenten oder von Osteosynthesematerial zu überprüfen. Bei der digitalen Volumentomographie wird der Gesichtsschädel mit dem Röntgenstrahler und dem Sensor auf einer Kreisbahn umfahren. Dabei werden in der Regel zwischen 100 und 400 Aufnahmen erzeugt (Abb. 2 und 3). Aus diesen Rohaufnahmen können dann durch entsprechende Algorithmen klassische Schichtaufnahmen rekonstruiert werden, wie sie aus der Computertomographie bekannt sind, oder auch die dem Zahnarzt vertrauten Panoramaaufnahmen mit entsprechenden sagittalen und transversalen Schnitten (Abb. 4).

Im Gegensatz zu den auch für Ganzkörperaufnahmen konzipierten Computertomographen, werden die digitalen Volumentomographen der neuesten Generationen aufgrund des relativ kleinen Darstellungsvolumens im Design klassischer Panoramaröntgengeräte angeboten. Sie unterscheiden sich zum einen in der Technologie des Detektors und in der Möglichkeit neben der dreidimensionalen Aufnahme auch zweidimensionale Aufnahmen anzufertigen.

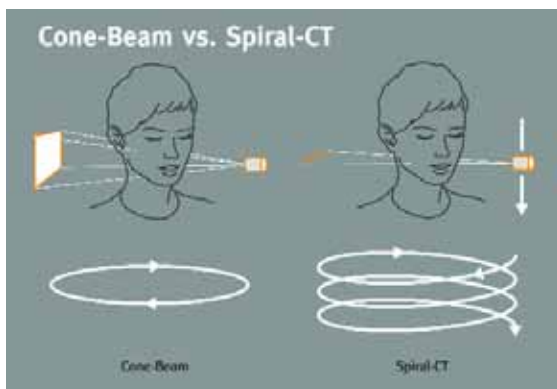


Abb. 2: Vergleich der Funktionsweise der Cone-Beam bzw. DVT-Technologie (links) mit kegelförmigem Strahlengang und zeilenförmiger Abbildung beim Spiral-CT (rechts)

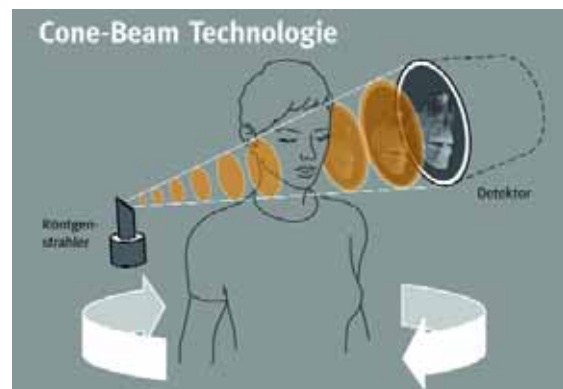


Abb. 3: Funktionsweise der Cone-Beam-Technologie mit radiär umlaufendem Röntgenstrahler und gegenläufig positioniertem Detektor

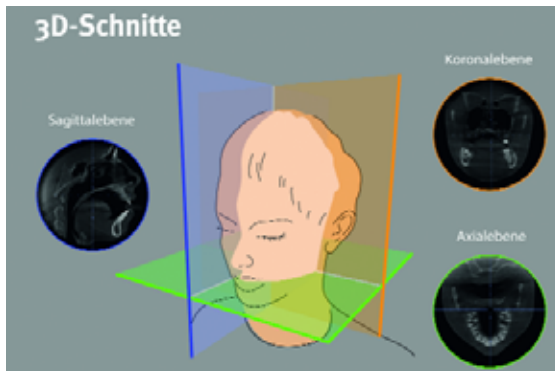


Abb. 4: Bezeichnung der Ebenen bei der dreidimensionalen radiologischen Diagnostik

Technologie der DVT

Bei den Geräten mit Bildverstärkertechnologie wird durch eine entsprechende Fokussierung und Umwandlung der Röntgenstrahlen die Bildinformation von einer großen Aufnahmematrix auf einen relativ kleinen CCD-Sensor fokussiert. Dies ermöglicht die Darstellung eines relativ großen Volumens, so dass die für die zahnärztliche Befundung notwendigen anatomischen Strukturen von der Kinnschuppe bis zu den Condylen oder von der Glabella bis zur Sella als kieferorthopädisch relevante Strukturen abgebildet werden können. Die Technologie ist seit vielen Jahren im Bereich der chirurgisch ausgerichteten Medizin etabliert und als robuste und erprobte Technologie mit geringer Ausfallquote bekannt.

Ein innovativer Ansatz arbeitet mit der so genannten Flatpanel-Technologie, wobei die auf die Aufnahmematrix einfallenden Röntgenstrahlen nicht fokussiert werden und damit die Größe und Auflösung des Aufnahmechips auch die Größe des Aufnahmevolumens bestimmt. Da für die Ansteuerung des einzelnen Pixels auf dem Aufnahmechip eine ausreichende Energie erforderlich ist, benötigen diese Geräte für eine ausreichende Informationswiedergabe aufgrund des Fehlens der Verstärkertechnologie eine höhere radiologische Strahlung. Dies wird in der Regel dadurch kompensiert, dass lediglich kleinere Volumina abgebildet werden (Abb. 5). Dies ergibt Einschränkungen zum Beispiel bei der vergleichenden Seitendiagnostik zwischen pathologischen und nicht veränderten Befunden, aber auch bei der Nutzung der radiologischen Daten in implantologischen Planungsprogrammen. Flatpanel-Geräte mit ihrer großen oder einstellbaren Volumendarstellung haben bei der Nutzung des gesamten Volumens aufgrund der beschränkten Pixelanzahl eine geringere Auflösung. Die maximale Auflösung kann daher dann nur in den kleineren Volumina erzeugt werden.

Bei der Anwendung von Kombinationsgeräten ist darauf abzuheben, ob die baulichen Eigenschaften zum Beispiel für die Ansteuerung einer typischen paraboloiden Panoramakurve im Gerät vorhanden sind, so dass bei Veränderung des Detektors oder der Strahlenquelle auch eine Panoramakurve entsprechend der Anatomie des Kiefers erzeugt werden kann. Einige der Kombinationsgeräte erfordern für die Erstellung von konventionellen Panorama- oder Fernröntgenseitenaufnahmen den Wechsel des Detektors. Der Detektor stellt besonders bei der Flatpanel-Technologie das Herzstück des Gerätes dar, da die darin enthaltenen Siliziumkristalle hoher Reinheit nur unter hohem Kostenaufwand hergestellt werden können. Bei täglicher Anwendung und bei häufigem Wechsel des Detektors kann von einem gewissen Risiko der Schädigung des Detektors ausgegangen werden.

Ein neuer Ansatz wird unter dem Schlagwort Narrow Beam Volumetric Tomography vorgestellt. Hierbei wird von einem klassischen OPG-Gerät eine Serie von transversalen Schichtaufnahmen erzeugt. Diese werden dann verwendet, um Schichten für eine dreidimensionale Darstellung zu rekonstruieren. Die zusätzliche Investition ist gering, jedoch muss berücksichtigt werden, dass diese Art der Detailrekonstruktion aufgrund der nicht umlaufend dargestellten Bildaufnahme und Summation der transversalen Schichtaufnahmen keine detailgetreue Rekonstruktion des untersuchten Areals zulässt, wie dies bei einer klassischen CT-Aufnahme oder auch bei einer DVT-Aufnahme möglich ist. Die Bilder zeigen entsprechende Verwaschungen und Sprünge.

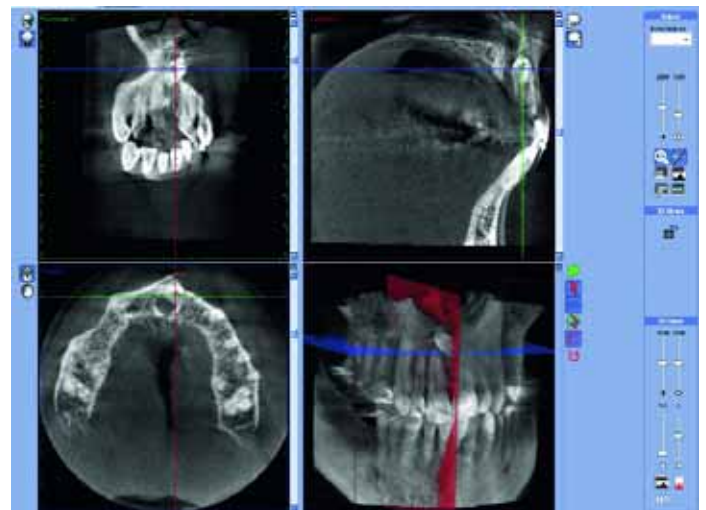


Abb. 5: Darstellung eines Mesiodens (bei fehlender Darstellung der Kiefergelenke und der Unterkieferbasis) bei Anwendung der Flatpanel-Technologie



Abb. 6: Speichelstein im Ausführungsgang der Glandula submandibularis und Darstellung in der 3D-Rekonstruktion

Diagnosesoftware

Für die klinische Anwendbarkeit der verschiedenen Aufnahmetechnologien ist es daher wichtig, dass eine Befundung entsprechend den klassischen zahnärztlichen radiologischen Aufnahmen wie etwa FRS und OPG möglich ist [7]. Hierbei unterscheiden sich die Geräte und die zum Gerät angebotene Software, da nicht alle Hersteller bei ihrer Produktentwicklung die entsprechenden zahnärztlichen Fragestellungen berücksichtigt haben. Je nach Konzeption des Gerätes ist auch die Strahlenbelastung zu berücksichtigen. Hier ist nicht nur die effektive Dosis pro Aufnahme, sondern auch pro untersuchte Region zu bedenken. Besonders bei komplexer Befundung können mehrere Aufnahmen zu einer nicht mehr vertretbaren Strahlenbelastung des Patienten führen (Abb. 6).

Chirurgische klinische Fragestellungen

Die Domäne der digitalen Volumentomographie sind chirurgische Interventionen in unmittelbarer Nähe zu verletzlichen anatomischen Strukturen, wie etwa bei der Osteotomie von retinierten Weisheitszähnen.

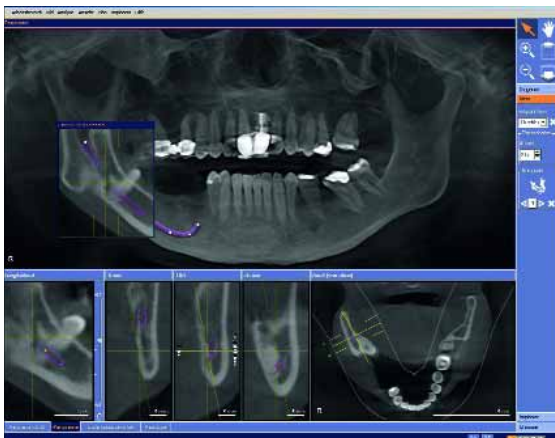


Abb. 7a: Planung der Osteotomie des Zahnes 48 mit Transplantation von Knochen zur Augmentation regio 044-046

Bei engem Bezug der Wurzelspitzen zum Nervkanal steigt das Risiko einer intraoperativen Schädigung des Nervus alveolaris inferior signifikant an, besonders ab einem Alter der Patienten von 25 Jahren [3]. Hier kann durch ein präoperatives DVT die genaue dreidimensionale Bestimmung der Lage des Zahnes zum Nerv erfolgen, was ein zielgerichtetes, schonendes operatives Vorgehen und eine kurze Operationszeit bedingt [10] (Abb. 7a und b).

Bei retinierten Zähnen kann durch eine DVT beurteilt werden, ob das Platzangebot im Zahnbogen für eine kieferorthopädische Einstellung des Zahnes ausreicht, oder ob zusätzliche chirurgische Maßnahmen wie etwa die Freilegung, die Mobilisation oder gar die Entfernung des Zahnes notwendig sind. Die detailgetreue dreidimensionale Diagnostik ermöglicht einen Therapieplan, der ohne weitere Therapieumstellungen oder Abweichungen verfolgt werden kann. Bei pathologischen Vorgängen mit Raumforderung im Kieferknochen kann deren Ausdehnung und Form bestimmt werden. Wenn auch die Dignität letztlich nur durch eine Probeentnahme gesichert werden kann, ergibt die radiologische Aufnahme, in Zusammenhang mit den klinischen Befunden, schon deutliche Hinweise auf die Art der Läsion (Abb. 8).

Durch die geringere Strahlendosis ist die Weichteildarstellung im DVT eingeschränkt. Jedoch eignet sich diese sehr gut zur Beurteilung der Kieferhöhlen. Dabei lassen sich chronische polypöse Veränderungen von der Hypertrophie der akut entzündeten Schleimhaut gut differenzieren (Abb. 9). In der präimplantologischen Diagnostik ermöglicht die Simulation des angestrebten prothetischen Ergebnisses durch eine mit Bariumsulfat dotierte Zahnaufstellung die genaue Abschätzung des augmentativen Aufwandes zur Rekonstruktion der atrophierten Kieferareale [9]. Durch die noninvasive Visualisierung kann im Rahmen des Planungsgesprächs mit dem Patienten die Notwendigkeit entsprechender chirurgischer Vorbe-



Abb. 7b: Komplikationslose Entfernung des retinierten Zahnes 48 mit Erhalt der distalen Wurzel

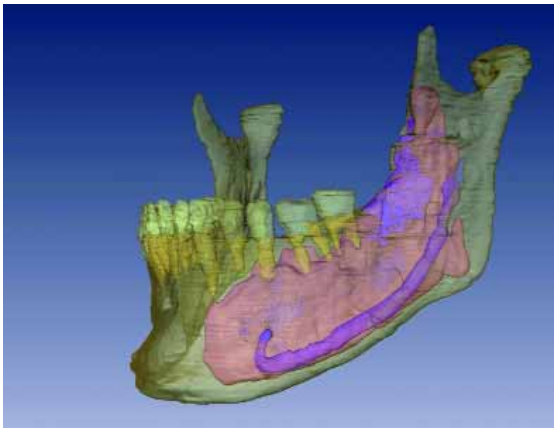


Abb. 8: Volumetrische Darstellung eines keratozystischen odontogenen Tumors im Unterkiefer

reitungen besprochen werden. Alternativ lässt sich die Kompensation des Kieferdefektes durch prothetische Maßnahmen diskutieren (Abb. 10a bis c). Zur Umsetzung der Implantatplanung bieten die Gerätehersteller entweder systemgebunden die Herstellung von Bohrschablonen an, oder es ist notwendig den Datensatz im DICOM-Format zu exportieren [2]. Dann muss in der Regel bei der Aufnahme eine Referenz im Mund des Patienten positioniert



Abb. 10a: Unzureichend regenerierte Extraktionsalveolen im rechten Oberkiefer mit spezieller Implantatplanungsansicht in zwei Ebenen, Panoramaansicht und 3D-Darstellung



Abb. 10b: Im CAD/CAM-Verfahren hergestellte Bohrschablone zur sicheren Implantatlagerpräparation bei ungünstiger Defektmorphologie



Abb. 9: Planung einer Sinusbodenelevation bei Vorliegen einer Pyocelle ausgehend von dem zuletzt extrahierten Zahn 25

werden, so dass bei DICOM-Export die Daten in der Fremdsoftware eingelesen werden können. Hier ist es wichtig, dass zum Ausschluss von Schnittstellenproblemen die Transferparameter korrekt eingestellt sind, da die meisten Planungsprogramme für die kontrastreichereren, aber mit größeren Schichtabständen arbeitenden CT-Aufnahmen konzipiert sind.

Weiterführende Fragestellungen

Geräte mit der Möglichkeit zur Darstellung eines großen Volumens erlauben eine Beurteilung des gesamten Gesichtsschädels. Somit können durch spezielle Rekonstruktionen auch laterale Gesichtsschädelaufnahmen für die klassische kieferorthopädische Befundung erzeugt werden. Die Indikation zu einer dreidimensionalen kieferorthopädischen Planung ist, im Gegensatz zum CT, durch die bei der DVT geringe Strahlenbelastung gegeben und wird sicherlich diesem Fachgebiet viele neue Optionen eröffnen. Die diagnostischen Maßnahmen auf dem Gebiet der konservativen Zahnheilkunde werden durch die DVT ebenfalls erweitert [4]. Besonders eine standardmäßig oder zusätzlich rekonstruierbare hohe Ortsauflösung ermöglicht zum Beispiel die Beurtei-



Abb. 10c: Gezielte Implantatinsertion (Templant, Medentis) mit simultaner Sinusbodenelevation und vestibulärer Augmentation



Abb. 11a: DVT-Aufnahme nach Persistenz von Beschwerden an Zahn 26 nach erfolgter Wurzelspitzenresektion



Abb. 11b: Detailrekonstruktion mit Auflösung 0,15 mm zur Beurteilung der endodontischen Behandlung

lung des horizontalen Knochenabbaus zirkulär an jedem Zahn. Aber auch die Beurteilung des Parodontalspaltes, von endodontischen Sachverhalten oder einer Approximalkaries an diagnostisch nicht zugänglichen Stellen ist möglich (Abb. 11a bis c).

Alternative Verfahren

Alternative diagnostische Verfahren ohne die Anwendung ionisierender Strahlung, wie zum Beispiel die Magnetresonanztomographie, werden in der Zahnheilkunde nur für die Kiefergelenksdiagnostik genutzt. Die Anwendung eines Magnetfeldes für die Beurteilung der feinen Weichgewebstrukturen im Bereich des Gesichtsschädel wird zurzeit noch durch die baulichen Limitationen zwischen Feldgröße und die Notwendigkeit der Positionierung des Magneten in unmittelbarer Nähe zur untersuchten Region begrenzt. Die Anwendung von Ultraschall hat sich zur Beurteilung von Weichteilbefunden besonders der Speicheldrüsen etabliert. Neue Forschungsergebnisse zeigen zum Beispiel im Rahmen der Implantat-



Abb. 11c: Der extrahierte Zahn 26 zeigt die im DVT diagnostizierte via falsa.

therapie auch die Möglichkeit zur Beurteilung der Knochenqualität durch Ultraschall auf [1].

Zusammenfassung

Erkennt man die Vorteile der digitalen Volumentomographie, lässt sich ihre Anwendung relativ leicht rechtfertigen. Durch eine Aufnahme mit einer Dosis von 29 μSv [5] (dies entspricht der Strahlenbelastung bei einem Flug von Frankfurt nach Singapur) wird der Patient nur einer geringen und im allgemeinen Leben akzeptierten Strahlenbelastung ausgesetzt. Diese steht in keiner Relation zum Risiko eines Zahnverlustes, des Ausbleibens einer Therapie eines pathologischen Befundes, oder bei einer implantologischen Intervention auch dem Risiko des Funktionsausfalls eines Nervens mit intensiven Folgebehandlungen mit Beeinträchtigung der Lebensqualität.

Die digitale Volumentomographie ist der zahnärztlichen Radiologie zugeordnet. Daher ist es sinnvoll, dass diese spezielle Aufnahmetechnik auch im Verantwortungsbereich des Zahnarztes angewendet wird. Da die Informationsdichte einer DVT das Vielfache einer normalen Röntgenaufnahme beträgt, ist eine Erfassung aller eventuell in der dargestellten Region vorhandenen pathologischen Prozesse möglich. Dies erfordert zwar einen höheren Aufwand bei der Befundung, ermöglicht aber das frühzeitige Erkennen von pathologischen Veränderungen und ist gerade im Sinne einer präventionsorientierten Zahnheilkunde von besonderer Bedeutung.

Korrespondenzadresse:
Interdisziplinäre Poliklinik für Orale Chirurgie und Implantologie,
Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und
Plastische Gesichtschirurgie der Universität zu Köln
Kerpener Str. 32, 50931 Köln, joerg.neugebauer@uk-koeln.de
Telefon: 0221 4784700, Fax: 0221 4786721