

Dreidimensionale Bildgebung in der Zahnmedizin

Aktuelle Techniken und Trends

Ein Beitrag von Dr. Lutz Ritter, Dr. Jörg Neugebauer, Dr. Dr. Robert A. Mischkowski, Dr. Timo Dreiseidler und Prof. Dr. Dr. Joachim E. Zöllner

Die dreidimensionale Bildgebung mittels Digitaler Volumentomografie erweitert die Möglichkeiten der zahnärztliche Radiologie besonders bei der Diagnostik und Planung von komplexen und schwierigen Indikationen. In den letzten Monaten wurde eine Vielzahl von Geräten vorgestellt, die sich in vorhandenen Technologie und dem Arbeitsablauf unterscheiden. Die Möglichkeiten der Diagnostik und das Aufwands-Risiko-Verhältnis werden an Hand der wesentlichen Parametern wie Volumengröße und Dosisbelastung diskutiert.

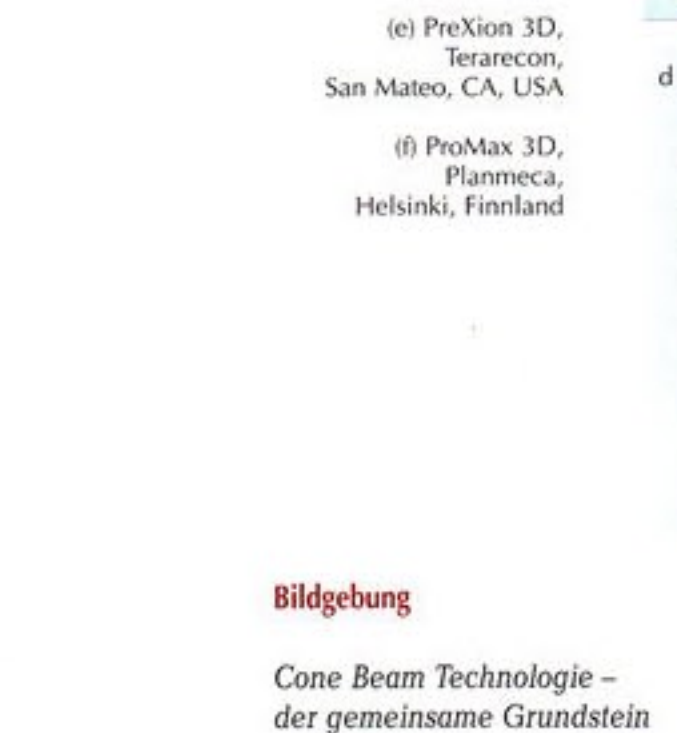
Dreidimensionale Technologie ist auf dem Vormarsch in fast allen Bereichen der Zahnmedizin. Gerade in der Implantologie spielt neben der dreidimensionalen Bildgebung, auch die dreidimensionale Implantatplanung sowie deren Umsetzung eine zunehmend wichtigere Rolle [2]. Heute lassen sich aber nicht nur Implantate analog zu zuvor erstellten virtuellen Operationsplänen navigiert inserieren, sondern sind darüber hinaus auch an dreidimensionale Technologien zu prothetischen Versorgung gekoppelt [15]. Die Implantologie kann als Schrittmacher für dreidimensionale Technologien verstanden werden, jedoch sind aktuell in fast allen Fachdisziplinen wie Kieferorthopädie, Prothetik und Zahnerhaltung und natürlich Chirurgie dreidimensionale Techniken für die verschiedensten Anwendungsbereiche von Interesse.

oder überweisenden Kollegen eine entscheidende Rolle. Dieser Artikel soll die aktuell im Markt befindlichen Systeme, oder Systemkomponenten klassifizieren, ihre Leistungsmerkmale vorstellen, diese aber auch in einen klinischen und anwendungsbezogenen Kontext rücken. Weiterhin wird die Zukunftsängstlichkeit der Systeme im Hinblick auf die dreidimensionale Anwendbarkeit hin überprüft.

Material und Methoden

Da es zwei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze der Röntgengerätehersteller gibt, die dreidimensionale Bildgebung in der radiologische Diagnostik zu integrieren. sollen hier zunächst die Geräteklassen aufgrund ihrer verschiedenen Eigenschaften unterschieden werden. Teil dieser Betrachtung sind auch die systembedingten Konsequenzen für aktuelle aber auch zukünftige Anwendungsfelder.

Weiterhin werden die unterschiedlichen Softwarekonzepte vorgestellt, die sich entweder auf die Diagnose beschränkte oder auch bereits eine Implantatplanung integriert haben.



Bildgebung

Cone Beam Technologie – der Beam Technologie Grundstein

Gemein ist allen momentan angebotenen 3D Röntgengeräten, die für den betrieblichen Praxis zugelassen sind, die Grundlegende Technologie zu Erzeugung von dreidimensionalen Bildern [9]. Diese Technologie basiert auf der dem sogenannten ConeBeam Verfahren einer Technologie, die sich insbesondere dadurch auszeichnet, einen fächerförmigen Röntgenstrahl (Beam) zur Erzeugung von Bildraten zu verwenden. Konsequenz aus der Konusförmigen Strahlengometrie ist, dass nun ein flächiger Detektor verwendet werden kann, der beim Auslösen der Röntgenquelle ein zweidimensionales Summationsbild des Objektes aufzeichnet. Röntgenquelle und Detektor bewegen sich auf einer Kreisbahn um das abzubildende Objekt herum und die vom flächigen Detektor aufgezeichneten zweidimensionalen Bilder werden gespeichert.

Eine mathematische Transformation erlaubt es nun durch die Verrechnung der einzelnen aus den verschiedenen Winkel erzeugten zweidimensionalen Bilder ein dreidimensionales Volumen zu errechnen. Durch die einfache physikalische Tatsache der flächigen Aufnahme der Röntgenbilder werden die immensen Vorteile der Technologie begründet: Ein

Objekt kann durch einen einzigen Umlauf dreidimensional erfasst werden. Im Vergleich zur Computertomographie kann hierdurch Zeit und Dosis gespart werden [11].

Dual Use versus Full 3D

Trotz gemeinsamer Grundfunktionalität der für die zahnärztliche Praxis verfügbaren dreidimensionalen Röntgensysteme, existieren insgesamt drei unterschiedliche Geräteklassen. Zum einen die Geräte die für 2D Aufnahmen wie Orthopantomogramm (OPG) oder laterales Ceph entwickelt wurden, aber für eine dreidimensionale Diagnostik für kleinere Teilbereiche ausbaubar sind. Dem gegenüber stehen Geräte die speziell für die dreidimensionale Diagnostik und Anwendung entwickelt wurden. Diese unterscheiden sich wiederum durch ihre Volumengröße, die entweder für einen Teilausschnitt oder die gesamte Anatomie des Gesichtsschädels mit breitem Anwendungsspektrum konzipiert wurden. Erstere verfügen über ein Aufnahmevolumen von zirka 6 x 6 x 6 bis zirka 8 x 8 x 8 cm, universell einsetzbare Geräte beginnen ab einer Volumengröße von zirka 15 x 15 x 15 cm.

Entgegen der Technologie des OPG ist bei den momentan auf dem Markt verfügbaren Geräten hier allerdings der Verzicht auf Volumengröße aus strahlenhygienischer Sicht nicht als Vorteil zu werten. Im

Gegenteil: betrachtet man die aktuellen Dosismessungen ergibt sich für ein größeres Volumen eine deutlich günstigere Risiko Nutzen Verhältnis. So kann zum Beispiel eine Aufnahme von einem 15 x 15 x 15 cm Volumen mit einer effektiven Dosis von 29 µSv (GALILEOS, Sirona) durchgeführt werden, für ein Volumen von 8 x 8 x 8 cm muss hingegen je nach Bauart mit einer Dosis von 155 bis 210 µSv (Promax 3D, Planmeca) nach ICRP 1990 bedacht werden [6].

Volumengröße und Vielseitigkeit

Neben der zu applizierenden Dosis spielt die Anwendbarkeit und Aussagekraft des generierten Volumens eine Rolle. So ist für kleinere Volumina grundsätzlich eine vorangehende Übersichtsaufnahme, üblicherweise in Form eines OPG durchzuführen. Anschließend wird für einen interessierenden Teilbereich eine 3D Aufnahme generiert. Dieses Vorgehen kann bei ungerichteter Diagnostik sinnvoll sein, für präoperativen Bildgebung eines klinisch identifizierten Befundes scheint allerdings die direkte dreidimensionale Diagnostik sinnvoller. Zunächst werden Kosten und Dosis für das vorangehende OPG eingespart und das Volumen des Gesichtsschädels ist dreidimensional verfügbar.

schiedliche Technologien: der Bildverstärker und der Flat Panel Detektor. Beim Bildverstärker werden die Röntgenquanten am Eingangsbildschirm zunächst in Elektronen konvertiert, die auf etwa 30.000 Volt beschleunigt und dann auf einen weiteren Schirm abgebildet werden. Dieser Schirm konvertiert die Elektronen in Lichtquanten. Der gesamte Verstärkungsaktor liegt bei etwa 10.000. Die Lichtquanten werden nun durch eine Optik auf die nachgeschaltete CCD Kamera abgebildet.

Das Verfahren ist seit über 20 Jahren bekannt, und hinsichtlich Haltbarkeit, mechanischer Stabilität, Zuverlässigkeit und Strahleneffizienz technisch ausgereift. Häufigstes Anwendungsfeld war bisher die Anwendung im Operationssaal als sogenannter C-Boogen, der auch als Ursprung der Digitalen Volumentomografie angenommen werden kann. Somit wurde die Bildverstärkertechnologie für den intraoperativen Einsatz optimiert, das heißt Strahleneffizienz und Robustheit sind von höchster Qualität. Nachteilig am Bildverstärker ist der erhöhte Platzbedarf.

Der Flatpanel Detektor hingegen überzeugt durch seine kompakte Bauweise – hier werden die Röntgenstrahlen entweder durch eine Konverterschicht aus Scintillatormaterial (meist CsI) in Photonen konvertiert oder bei den direkt konvertierenden Systemen meist durch eine Schicht aus amorphem Selen direkt in Elektronen die dann über eine Schicht aus Photodiolen an eine Auslesematrix weitergeleitet werden. Die Aufnahmequalität ist somit besonders bei großen Flatpanels von der Güte der Photodiolen abhängig, die mit ihren Schwüngen verlegbar der Technologie der LCD-Bildschirme ist. Allerdings kann durch diese großflächige Aufnahmetechnologie im Unterschied zum Bildverstärker auch keine Verstärkung des Signals erfolgen – was sich negativ auf die Dosisleistung auswirkt. So sind für ein 9° Scan mit einem Bildverstärker 29 µSv, für eine Aufnahme gleicher Größe mit einem Flatpanel 69 µSv effektiver Strahlendosis nach ICRP 1990 nötig [7]. Weitere Unterschiede bestehen im Entwicklungsgrad der Technologie, die auch Größe und Bauart der Flatpanel Detektoren benötigen diese eine Aufwärtrend bis zu einer Stunde bevor sie verwendet werden können.

Diagnose

Durch die gewonnene dritte Dimension steht dem Behandler bei allen Geräten nun zusätzliche Information zur Verfügung. Diese liegt zunächst in Form von Rohdaten vor und muss nun entsprechend nutzbar gemacht werden. Diese Transformation von

Bei kleineren Volumina ergibt sich zudem häufig das Problem der unvollständigen Abbildung eines Befundes, sodass wiederholte Aufnahmen fällig werden, oft erschwert durch eine unpraktische Positionierung [5]. Zudem stellen sich die Befunde auch häufig räumlich ausgedehnter dar, wie zum Beispiel paarig angelegte verlagerte Molaren, die dann eine weitere Aufnahme der Gegenseite erzwingen. Aus diagnostischer Sicht gilt auch für die dreidimensionale Bildgebung der Seitenvergleich als Hilfsmittel zur Identifizierung pathologischer Prozesse, der bei kleineren Volumina oft nicht möglich ist.

Einige Anwendungen wie die traumatologische, kieferorthopädische, umfassende implantologische Diagnostik und Planung verbieten sich für kleine Volumina völlig. Angesichts des hohen Investitionskosten solcher Geräte sollte allerdings die Vielseitigkeit der Erweiterung des Behandlungsspektrums durch zusätzliche auf besondere Teilgebiete spezialisierte Kollegen bedacht werden.

Detektor und Dosis

Neben der Volumengröße ist der größte technologische Unterschied der aktuell auf dem Markt erhältlichen Systeme in der Detektortechnologie zu finden. Hier zeigen sich zwei in der Bauart unter-

schiedliche Technologien: der Bildverstärker und der Flat Panel Detektor. Beim Bildverstärker werden die Röntgenquanten am Eingangsbildschirm zunächst in Elektronen konvertiert, die auf etwa 30.000 Volt beschleunigt und dann auf einen weiteren Schirm abgebildet werden. Dieser Schirm konvertiert die Elektronen in Lichtquanten. Der gesamte Verstärkungsaktor liegt bei etwa 10.000. Die Lichtquanten werden nun durch eine Optik auf die nachgeschaltete CCD Kamera abgebildet.

Das Verfahren ist seit über 20 Jahren bekannt, und hinsichtlich Haltbarkeit, mechanischer Stabilität, Zuverlässigkeit und Strahleneffizienz technisch ausgereift. Häufigstes Anwendungsfeld war bisher die Anwendung im Operationssaal als sogenannter C-Boogen, der auch als Ursprung der Digitalen Volumentomografie angenommen werden kann. Somit wurde die Bildverstärkertechnologie für den intraoperativen Einsatz optimiert, das heißt Strahleneffizienz und Robustheit sind von höchster Qualität. Nachteilig am Bildverstärker ist der erhöhte Platzbedarf.

Der Flatpanel Detektor hingegen überzeugt durch seine kompakte Bauweise – hier werden die Röntgenstrahlen entweder durch eine Konverterschicht aus Scintillatormaterial (meist CsI) in Photonen konvertiert oder bei den direkt konvertierenden Systemen meist durch eine Schicht aus amorphem Selen direkt in Elektronen die dann über eine Schicht aus Photodiolen an eine Auslesematrix weitergeleitet werden. Die Aufnahmequalität ist somit besonders bei großen Flatpanels von der Güte der Photodiolen abhängig, die mit ihren Schwüngen verlegbar der Technologie der LCD-Bildschirme ist. Allerdings kann durch diese großflächige Aufnahmetechnologie im Unterschied zum Bildverstärker auch keine Verstärkung des Signals erfolgen – was sich negativ auf die Dosisleistung auswirkt. So sind für ein 9° Scan mit einem Bildverstärker 29 µSv, für eine Aufnahme gleicher Größe mit einem Flatpanel 69 µSv effektiver Strahlendosis nach ICRP 1990 nötig [7]. Weitere Unterschiede bestehen im Entwicklungsgrad der Technologie, die auch Größe und Bauart der Flatpanel Detektoren benötigen diese eine Aufwärtrend bis zu einer Stunde bevor sie verwendet werden können.

Diagnose

Durch die gewonnene dritte Dimension steht dem Behandler bei allen Geräten nun zusätzliche Information zur Verfügung. Diese liegt zunächst in Form von Rohdaten vor und muss nun entsprechend nutzbar gemacht werden. Diese Transformation von

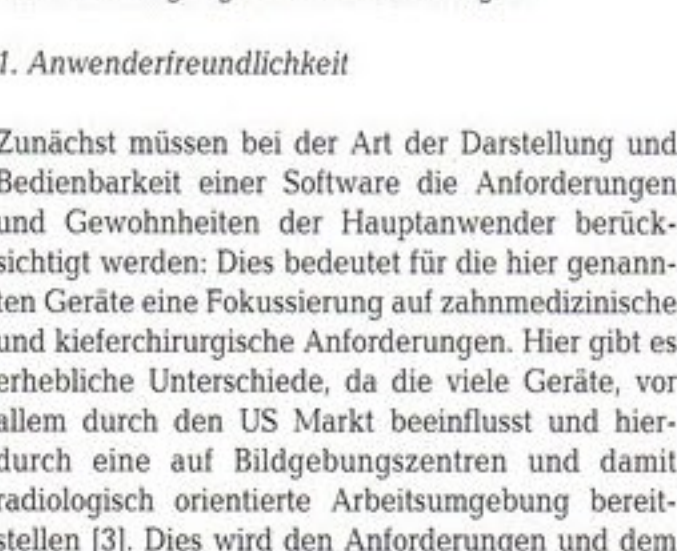


Abb. 2 Radiologische Schichten am Beispiel der ICA Software (Imaging Sciences International, USA). Die Bedienung ist über die angezeigten bunten Linien realisiert. Allerdings lässt sich die Schichtwahl nicht in den einzelnen Bildern einstellen, sondern muss über die angezeigte Position in einem komplementären Bild eingestellt werden. So befindet sich der Blick des Benutzers nicht dort wo er mit der Software interagiert.

Abb. 3a Softwareansicht des Planmeca 3D Viewers (Romexis / Planmeca, Finnland). Durch die Volumengröße von 8 x 8 x 8 cm und die fehlende Panoramaerkennung wird die Übersicht und Orientierung gemindert. Weiterhin befinden sich keinerlei Orientierungshilfen in den Schichten, sodass nicht zweifelsfrei festzustellen ist, ob es sich bei der Darstellung um die linke oder rechte Seite handelt – einer der häufigsten Fehlurteile bei Fehlbeurteilungen.

dreidimensionaler Rohinformation in diagnostisch sinnvolle Information ist Aufgabe der Diagnosesoftware, der bei Geräten zur dreidimensionalen Bildgebung eine wichtigere Rolle zukommt, als dies bisher für zweidimensionale Diagnostik der Fall war [12, 14]. Um diese Aufgabe effizient und sicher erfüllen zu können schickte es sich an, folgende Grundüberlegungen zu berücksichtigen:

1. Anwenderfreundlichkeit

Zunächst müssen bei der Art der Darstellung und Bedienbarkeit einer Software die Anforderungen und Gewohnheiten der Hauptanwender berücksichtigt werden: Dies bedeutet für die hier genannten Geräte eine Fokussierung auf zahnmedizinische und kieferchirurgische Anforderungen. Hier gibt es erhebliche Unterschiede, da die viele Geräte, vor allem durch den US Markt beeinflusst und hierdurch eine auf Bildgebungszentren und damit radiologisch orientierte Arbeitsumgebung bereitstellen [3]. Dies wird den Anforderungen und dem Arbeitsablauf in der zahnmedizinischen Praxis allerdings wenig gerecht [Abb. 2] [8].

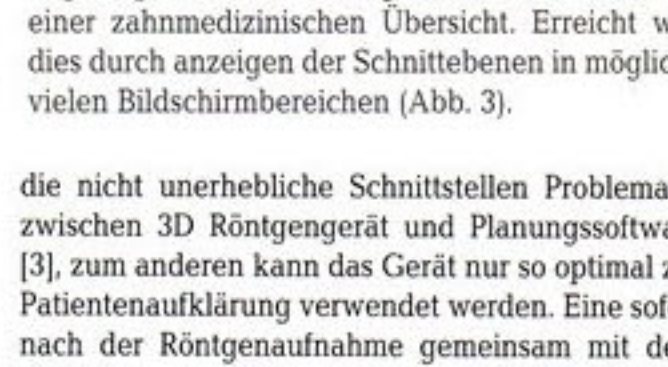


Abb. 3b Vollwertig diagnostizierbare GALILEOS Systems (Sirona, Deutschland) mit einer Auflösung an Zahn 22. Im Frontzahnbereich lässt die Software eine im Vergleich zur konventionellen Panoramaaufnahme bessere Bildqualität entstehen.

2. Orientierung

Die Darstellung der dreidimensionalen Informationen auf zweidimensionalen Bildschirmen bedeutet für jeden Anwender eine Herausforderung. Die entstehende Komplexität kann allerdings durch eine intuitive orientierende Darstellungsform im 3D Volumen abgefangen werden. Dies geschieht durch eine übersichtliche Anordnung der nötigen Bild-

schirmbereiche, sowie eine korrespondierende Visualisierung. So sollte dem Anwender jederzeit klar sein, welche Schritte momentan im Volumen angezeigt werden, vorzugsweise kombiniert mit einer zahnmedizinischen Übersicht. Erreicht wird dies durch anzeigen der Schnittebenen in möglichst vielen Bildschirmbereichen (Abb. 3).

die nicht unerhebliche Schnittstellen Problematik zwischen 3D Röntgengerät und Planungssoftware [3], zum anderen kann das Gerät nur so optimal zur Patientenaufklärung verwendet werden. Eine sofort nach der Röntgenaufnahme gemeinsam mit dem Patienten erstellte computer-unterstützte 3D Implantatplanung mit der Möglichkeit einer CAD/CAM Bohrschablonentechnologie kann bei der Therapieplanung das zusätzliche Optionen aufzeigen und so den das mögliche Spektrum auch unsichere Patienten überzeugen. Voraussetzung ist allerdings, dass die nötige Planungsfunktionalität in real-time also sofort zur Verfügung steht, da sich langwierige und nicht automatisierbare Konvertierungen im Sinne von Segmentierungen nicht in den Praxisablauf integrieren lassen.

Zusätzlich ist für einige Anwender die Kommunikation und der Austausch von Bilddaten mit einem Überwieser von Bedeutung. Ziel dieser Kommunikation ist entweder die radiologischen Bilddaten vollständig oder beidseitig zu übermitteln, oder sogar ganze Implantatplanungen zu kommunizieren. Hierbei sind verschiedene Wege möglich: Ein Ausdruck des entsprechenden Schnitt-, oder Summationsbildes ist bei allen Geräten verfügbar. Dieser hängt aber in Qualität und damit Aussagekraft sehr vom verwendeten Drucker ab. Meist sich die Zusammenarbeit lohnt eine digitale Lösung. Da es sich aufgrund von Datenschutz und geringer Bandbreite momentan noch nicht anbietet Patientendatenätze über das Internet zu transportieren, bleibt nur der Austausch eines Massenspeichermediums wie CD, DVD oder mobilen Speicher. Hierbei sind verschiedene Lösungen der Hersteller verfügbar. Üblich ist der einfache Viewer für das Betrachten der Schnittbilder in axialer, sagittaler und coronaler Schnittführung. Darüber hinaus bieten einiger Hersteller die gesamte Diagnosefunktionalität der Gerätesoftware gegen einen geringen Aufpreis an.

5. Informationsdichte

Die etablierte zweidimensionale Röntgendiagnostik bietet gegenüber der dreidimensionalen einen erheblichen Vorteil: Sie verdeutlicht dreidimensionale Anatomie auf eine 2D Röntgenprojektion und bietet somit eine optimale Übersicht. Dieser Effekt kann virtuell durch entsprechende Algorithmen simuliert werden. Hierbei ist die vorsichtige Auswahl der Darstellungsformen entscheidend. Es können hierbei sowohl semi-, bis transparente Volumendarstellungen errechnet werden, auch OPGs und Cephalogramme können simuliert werden. Die Qualitätsunterschiede der Hersteller sind hierbei beachtlich (Abb. 4).

3. Visualisierung

Neben der Schnittbildvisualisierung bestehen allerdings die Möglichkeiten die dreidimensionale Bildinformation wiederzugeben. Für die Schnittbildinformation sind die üblichen Einstellmöglichkeiten von Kontrast und Helligkeit minimale Voraussetzungen, die auch von allen Herstellern erfüllt werden. Weiterhin ist die Interaktivität in der Schnittbildinformation von entscheidender Bedeutung für die digitale Volumentomographie: Durch die sehr geringen Schichtabstände und Dicken, ist der Informationsgehalt pro Schicht entsprechend gering, sodass zur Diagnose aus kleinster anatomischer Strukturen in der Regel mehr als nur eine Schicht benötigt wird. Hier hilft nur das interaktive scrollen der Schichten durch das Volumen um einen entsprechenden diagnostisch verwertbaren Eindruck durch eine dynamische Befundung zu gewinnen.

Zusätzlich ist für einige Anwender die Kommunikation und der Austausch von Bilddaten mit einem Überwieser von Bedeutung. Ziel dieser Kommunikation ist entweder die radiologischen Bilddaten vollständig oder beidseitig zu übermitteln, oder sogar ganze Implantatplanungen zu kommunizieren. Hierbei sind verschiedene Wege möglich: Ein Ausdruck des entsprechenden Schnitt-, oder Summationsbildes ist bei allen Geräten verfügbar. Dieser hängt aber in Qualität und damit Aussagekraft sehr vom verwendeten Drucker ab. Meist sich die Zusammenarbeit lohnt eine digitale Lösung. Da es sich aufgrund von Datenschutz und geringer Bandbreite momentan noch nicht anbietet Patientendatenätze über das Internet zu transportieren, bleibt nur der Austausch eines Massenspeichermediums wie CD, DVD oder mobilen Speicher. Hierbei sind verschiedene Lösungen der Hersteller verfügbar. Üblich ist der einfache Viewer für das Betrachten der Schnittbilder in axialer, sagittaler und coronaler Schnittführung. Darüber hinaus bieten einiger Hersteller die gesamte Diagnosefunktionalität der Gerätesoftware gegen einen geringen Aufpreis an.

4. Arbeitsablauf

Neben der Anwenderfreundlichkeit der einzelnen Komponenten ist es erforderlich sich auch im Ablauf der Diagnose und Anwendung der dreidimensionalen Diagnostik und gegebenenfalls auch der Implantatplanung an den Bedürfnissen des Praktikers zu orientieren. Hierbei ist es sinnvoll sich von der Hersteller mit einer aus dem 3D Volumen rekonstruierten Panoramaaufnahme klar im Vorteil, da diese eine hervorragende Ausgangsbasis für die radiologische Diagnostik bietet und zusätzlich durch die systemimmanente Integration mit der dreidimensionalen Information diese problemlos korrelieren können.

Die etablierte zweidimensionale Röntgendiagnostik bietet gegenüber der dreidimensionalen einen erheblichen Vorteil: Sie verdeutlicht dreidimensionale Anatomie auf eine 2D Röntgenprojektion und bietet somit eine optimale Übersicht. Dieser Effekt kann virtuell durch entsprechende Algorithmen simuliert werden. Hierbei ist die vorsichtige Auswahl der Darstellungsformen entscheidend. Es können hierbei sowohl semi-, bis transparente Volumendarstellungen errechnet werden, auch OPGs und Cephalogramme können simuliert werden. Die Qualitätsunterschiede der Hersteller sind hierbei beachtlich (Abb. 4).

Für die Planung von chirurgischen Interventionen ist es daher wichtig, dass bereits mit der ersten Befundung eine metrische Analyse möglich ist, ohne dass die Daten in ein weiteres Programm exportiert und dort individuell segmentiert werden müssen. Es ergibt sich somit keine Notwendigkeit zur Zweitaufnahme nach einem OPG, keine Positionierungsschwierigkeiten und auch weniger Wiederholungsaufnahmen wie das bei Dual-Use Geräten der Fall ist. Auch strahlenhygienisch zeigen die Geräte mit großem Volumen hier eine bessere Bilanz, ein 15 x 15 x 15 cm Volumen kann ab 29 µSv generiert werden, für ein kleineres Volumen fallen mindestens 69 µSv an [7].

Die etablierte zweidimensionale Röntgendiagnostik bietet gegenüber der dreidimensionalen einen erheblichen Vorteil: Sie verdeutlicht dreidimensionale Anatomie auf eine 2D Röntgenprojektion und bietet somit eine optimale Übersicht. Dieser Effekt kann virtuell durch entsprechende Algorithmen simuliert werden. Hierbei ist die vorsichtige Auswahl der Darstellungsformen entscheidend. Es können hierbei sowohl semi-, bis transparente Volumendarstellungen errechnet werden, auch OPGs und Cephalogramme können simuliert werden. Die Qualitätsunterschiede der Hersteller sind hierbei beachtlich (Abb. 4).

Ein weiterer entscheidender Punkt für die implantologische tätige Praxis ist die Integration beziehungsweise Kompatibilität zu einer Implantatplanungssoftware. Bestenfalls ist diese bereits in die Diagnosesoftware integriert. Hierdurch entfällt zum einen

naugkeiten in der Darstellung entstehen, sodass diese für implantologische Planungen, die höchste Präzision erfordern, nur zur Übersicht, jedoch nicht zur Detailplanung verwendet werden sollten.

6. Vielseitigkeit

Das Zusammenspiel von Hard- und Software bietet die Grundlage für die Breite der Anwendbarkeit bei dreidimensionalen Röntgengeräten. Dabei spielen die Volumengröße und die zur Verfügung stehende Auflösung eine grundlegende Rolle [13]. Die Volumengröße sollte natürlich für die Diagnostik im maxillofazialen Komplex ausreichend gestaltet sein, was ab einem Volumen von zirka 3l gegeben ist. Auch bei der Auflösung empfiehlt sich die Orientierung an den anatomischen Gegebenheiten – da der Parodontalspalt, als kleinste anatomische Struktur zirka 0,1 mm groß ist, sollte die Auflösung ähnlich wie bei Zahnlücken, noch darunter liegen. Natürlich sind der Auflösung Grenzen gesetzt: Durch die im Vergleich zur zweidimensionalen Technik sehr langen Aufnahmezeiten (von 8 bis über 40 Sekunden), während denen der Patient seine Position nicht verändern darf ist, ist diese Größe weniger vom Röntgendetektor als von der Beziehung von der Aufnahmezeit und der Kooperation beziehungsweise Verfügung des Patienten abhängig.

Darüber hinaus etabliert sich das 3D Volume-Rendern als Darstellungsform dreidimensionaler Daten. Diese Technologie ist für Anwendungen in der Mund-, Kiefer-, und Gesichtschirurgie lange bekannt. Vorteile sind die Übersicht und damit die Erkennbarkeit von Relationen und Proportionen am Gesichtsschädel. Auch größere Frakturen können intuitiv visualisiert werden. Allerdings sind der dreidimensionalen Visualisierung diagnostisch Grenzen gesetzt: Die Transformation der Schnittbildinformation in Oberflächendarstellungen bedingt eine Kette von Rechenschritten, die mit der Identifizierung oder Segmentierung der relevanten Informationen in den Schnittbildern beginnt, und über verschiedenen Glättungsalgorithmen zu einer entweder dreiecks-, oder raycastbasierten Darstellung meist der knöchernen oder Weichteiloberfläche führt. Durch diese Rechenschritte können allerdings je nach verwendetem Algorithmus erheblich Unge-

Die Genauigkeit der dreidimensionalen Systeme liegt im Bereich von kleiner als einem Millimeter [5], was für die meisten diagnostischen Fragestellungen sowie die Implantatplanungen in der Regel ausreicht [1, 4]. Ein Einsatz für den Einzellfilm stellen 3D Geräte momentan noch nicht dar, auch aufgrund der höheren Artefaktanfälligkeit der Technologie. Vor allem Geräte mit einem großen Volumen ergeben durch ihr breites Anwendungsspektrum und übersichtliche Darstellung diagnostische Vorteile für oral-, und kieferchirurgische, aber auch orthopädische Anwendungen [8, 9]. Die komplexe Anatomie des Gesichtsschädels kann überlagerungsfrei dargestellt,

tal-Wandler verursacht. Bei niedriger Dosis überwiegt das Quantenrauschen, während es bei steigender Dosis gerindert wird, und der Einfluss des Eigenrauschens hervortritt. Das Bildrauschen setzt die Erkennbarkeit kleiner Bildstrukturen herab. Insgesamt nimmt das Rauschen bei digitalen Systemen um so mehr ab, je höher die verwendete Dosis ist.

Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Volumina haben Einfluss auf die Verwendbarkeit der Geräte für die verschiedenen Indikationen, die Diagnose, sowie die Risiko-Nutzen-Abwägung der Technologie: so sind zum Beispiel für den Vergleich mit der Gegenseite oder die Erfassung paarig angelegter Weisheitszähne bei kleineren Aufnahmevolumina mehrere Aufnahmen nötig, die aber bei den momentan auf dem Markt verfügbaren Geräten eine höhere Dosis pro Aufnahme bieten als größere Volumina.

Der Kontrast unterschreibt Dosis-, Helligkeits- oder Intensitätsunterschiede in einem Bild. Ohne Kontrast ist eine Struktur von ihrer Umgebung nicht zu unterscheiden. Neben den detektorphysikalischen Eigenschaften nehmen die Röntgenstrahlen Einfluss auf den Kontrast. Dieser Strahlenkontrast wird geprägt durch verschiedene physikalische Eigenschaften der Röntgenstrahlen, sowie der Dichte der darzustellenden Strukturen. Hierunter fallen Quantenrauschen, Strahlungsqualität, Objektabsorption und die Streustrahlung.

Hinsichtlich der lieferbaren Diagnosesoftware der angebotenen 3D Röntgengeräte unterscheiden sich diese in Funktionalität und Benutzerführung zum Teil erheblich. Angefangen von der Schnittbildinformation mit minimalem Funktionsumfang wie Scrollen, Kontrast, Helligkeit und Zoomstellung wie aus der Radiologie bekannt, bis zur integrierten Implantatplanungssoftware sind verschiedene Abstufungen vertreten [10].

Diskussion

Die dreidimensionale Röntgendiagnostik ist heute in Form verschiedener Geräteklassen für die zahnärztliche Praxis verfügbar. Der Ansatz des Dual-Use Gerätes hat zum Vorteil dass ein konventionelles Panorama erstellt werden kann, das nach wie vor seine klinische Berechtigung hat. Das verfügbare kleine 3D Volumen dieser Geräte hat allerdings einen eingeschränkten Indikationsbereich aufgrund der geringen Abbildungsmaße und des schlechten Risiko/Nutzen Verhältnis, da hier die bis zu siebenfache Dosis gegenüber großen Volumina anfällt. Weiterhin ergibt sich hier häufig die Notwendigkeit mehrfacher Aufnahmen zur vollständigen Erfassung des Befundes. Die Bildqualität der verschiedenen Geräte kann nur technisch und nicht objektiv verglichen werden. Wichtige Parameter sind dabei Kontrast, Schärfe und Rauschen. Hinsichtlich des Rauschens sollte ein vertretbarer Kompromiss zwischen Dosis und Bildeindruck gefunden werden.

Hierdurch wird klar, auf welche Parameter bei der Anwendung von ConeBeam Röntgengeräten geachtet werden muss:

- 1. Maximales theoretisches Auflösungsvermögen des Röntgendetektors in Kombination mit der dafür nötigen Aufnahmedauer.
- 2. Maximaler Bildkontrast
- 3. Rauschen – hier muss ein vertretbarer Kompromiss zwischen Diagnostizierbarkeit und Strahlenhygiene gefunden werden. Es erscheint dem Patienten gegenüber nicht vertretbar nur aufgrund eines subjektiv spärlicheren Bildeindrucks ein mehr an Dosis zu applizieren. Vielmehr scheint auch für die 3D Röntgentechnologie sinnvoll, was für alle anderen Röntgenverfahren gilt: So viel wie nötig – so wenig wie möglich.

Ergebnisse

Betrachtet man die derzeit am Markt verfügbaren Systeme zeigen sich zwei unterschiedliche Konzepte. Panoramageräte die über eine zusätzliche 3D Funktionalität verfügen (Dual-Use) auf der einen, und Geräte die speziell für die 3D Anwendung entwickelt wurden auf der anderen Seite.

Hinsichtlich der verfügbaren Volumengrößen kann zwischen den größeren Volumina, die die gesamten Gesichtsschädel abdecken, der kleineren Volumina die nur Teilbereich der Kiefer darstellen existieren unterschieden werden. Dual-Use Geräte existieren nur mit kleinen Volumina, können aber gegebenenfalls durch einen Cephaloleger ergänzt werden. Geräte die speziell für die 3D Bildgebung entwickelt wurden existieren als kleine und große Volumina.

Befunde können abgesichert und dokumentiert werden. Die Strahlenbelastung ist gegenüber der kontrastreicheren Computertomographie deutlich niedriger. Daher kann die Indikationsstellung zur 3D Diagnostik hier breiter erfolgen. Weiterhin können aus der vollständigen Erfassung der dento-maxillofazialen Anatomie verschiedene Sekundäransichten rekonstruiert werden. So kann zusätzlich Strahlenexposition verhindert und der vertraute 2D Bildeindruck optimal zur vielfältigen 3D Information korreliert werden. Hin-

sichtlich der lieferbaren Diagnosesoftware der angebotenen 3D Röntgengeräte unterscheiden sich diese in Funktionalität und Benutzerführung zum Teil erheblich. Angefangen von der Schnittbildinformation mit minimalem Funktionsumfang wie Scrollen, Kontrast, Helligkeit und Zoomstellung wie aus der Radiologie bekannt, bis zur integrierten Implantatplanungssoftware sind verschiedene Abstufungen vertreten [10].

Die Genauigkeit der dreidimensionalen Systeme liegt im Bereich von kleiner als einem Millimeter [5], was für die meisten diagnostischen Fragestellungen sowie die Implantatplanungen in der Regel ausreicht [1, 4]. Ein Einsatz für den Einzellfilm stellen 3D Geräte momentan noch nicht dar, auch aufgrund der höheren Artefaktanfälligkeit der Technologie. Vor allem Geräte mit einem großen Volumen ergeben durch ihr breites Anwendungsspektrum und übersichtliche Darstellung diagnostische Vorteile für oral-, und kieferchirurgische, aber auch orthopädische Anwendungen [8, 9]. Die komplexe Anatomie des Gesichtsschädels kann überlagerungsfrei dargestellt,

metrisch exakt vermessen und dokumentiert werden. Die Strahlenbelastung ist gegenüber der kontrastreicheren Computertomographie deutlich niedriger. Daher kann die Indikationsstellung zur 3D Diagnostik hier breiter erfolgen. Weiterhin können aus der vollständigen Erfassung der dento-maxillofazialen Anatomie verschiedene Sekundäransichten rekonstruiert werden. So kann zusätzlich Strahlenexposition verhindert und der vertraute 2D Bildeindruck optimal zur vielfältigen 3D Information korreliert werden. Hin-

sichtlich der Bildqualität der sekundär rekonstruierten Panoramas und Cephaldarstellungen, ist noch Entwicklungspotential vorhanden, sodass in absehbarer Zeit erste Systeme zeigen, dass die Aussagekraft der errechneten Darstellungen die der konventionellen Röntgenaufnahmen wohl übertreffen wird. Für die Diagnostik von Zähnen sind auch Geräte mit kleineren Volumina geeignet, wobei je nach Größe hier für jeden Quadranten oder je Seite eine Aufnahme angefertigt werden muss. Die verfügbare Bildqualität ist dabei überzeugend, jedoch aufgrund der Artefakte nicht zum Ersatz des Einzelzahnlücken geeignet. Gut beurteilbar sind unversorgte Wurzelkanalverläufe, Parodontaldefekte sowie im unversorgten Zahnsystem auch Karies.

Der Kontrast unterschreibt Dosis-, Helligkeits- oder Intensitätsunterschiede in einem Bild. Ohne Kontrast ist eine Struktur von ihrer Umgebung nicht zu unterscheiden. Neben den detektorphysikalischen Eigenschaften nehmen die Röntgenstrahlen Einfluss auf den Kontrast. Dieser Strahlenkontrast wird geprägt durch verschiedene physikalische Eigenschaften der Röntgenstrahlen, sowie der Dichte der darzustellenden Strukturen. Hierunter fallen Quantenrauschen, Strahlungsqualität, Objektabsorption und die Streustrahlung.

Der Bildrauschen setzt sich bei den digitalen Systemen aus dem Quantenrauschen und dem Systemrauschen zusammen. Das Quantenrauschen entsteht durch die Fluktuation der Röntgenstrahlen, die zu kleinen Abweichungen der Dichte der Quanten führt. Rauschen im Detektor wird vor allem durch den Signalverstärker und den Analog-Digital-

Hierdurch wird klar, auf welche Parameter bei der Anwendung von ConeBeam Röntgengeräten geachtet werden muss:

- 1. Maximales theoretisches Auflösungsvermögen des Röntgendetektors in Kombination mit der dafür nötigen Aufnahmedauer.
- 2. Maximaler Bildkontrast
- 3. Rauschen – hier muss ein vertretbarer Kompromiss zwischen Diagnostizierbarkeit und Strahlenhygiene gefunden werden. Es erscheint dem Patienten gegenüber nicht vertretbar nur aufgrund eines subjektiv spärlicheren Bildeindrucks ein mehr an Dosis zu applizieren. Vielmehr scheint auch für die 3D Röntgentechnologie sinnvoll, was für alle anderen Röntgenverfahren gilt: So viel wie nötig – so wenig wie möglich.

Ergebnisse

Betrachtet man die derzeit am Markt verfügbaren Systeme zeigen sich zwei unterschiedliche Konzepte. Panoramageräte die über eine zusätzliche 3D Funktionalität verfügen (Dual-Use) auf der einen, und Geräte die speziell für die 3D Anwendung entwickelt wurden auf der anderen Seite.

Hinsichtlich der verfügbaren Volumengrößen kann zwischen den größeren Volumina, die die gesamten Gesichtsschädel abdecken, der kleineren Volumina die nur Teilbereich der Kiefer darstellen existieren unterschieden werden. Dual-Use Geräte existieren nur mit kleinen Volumina, können aber gegebenenfalls durch einen Cephaloleger ergänzt werden. Geräte die speziell für die 3D Bildgebung entwickelt wurden existieren als kleine und große Volumina.

Befunde können abgesichert und dokumentiert werden. Die Strahlenbelastung ist gegenüber der kontrastreicheren Computertomographie deutlich niedriger. Daher kann die Indikationsstellung zur 3D Diagnostik hier breiter erfolgen. Weiterhin können aus der vollständigen Erfassung der dento-maxillofazialen Anatomie verschiedene Sekundäransichten rekonstruiert werden. So kann zusätzlich Strahlenexposition verhindert und der vertraute 2D Bildeindruck optimal zur vielfältigen 3D Information korreliert werden. Hin-

sichtlich der Bildqualität der sekundär rekonstruierten Panoramas und Cephaldarstellungen, ist noch Entwicklungspotential vorhanden, sodass in absehbarer Zeit erste Systeme zeigen, dass die Aussagekraft der errechneten Darstellungen die der konventionellen Röntgenaufnahmen wohl übertreffen wird. Für die Diagnostik von Zähnen sind auch Geräte mit kleineren Volumina geeignet, wobei je nach Größe hier für jeden Quadranten oder je Seite eine Aufnahme angefertigt werden muss. Die verfügbare Bildqualität ist dabei überzeugend, jedoch aufgrund der Artefakte nicht zum Ersatz des Einzelzahnlücken geeignet. Gut beurteilbar sind unversorgte Wurzelkanalverläufe, Parodontaldefekte sowie im unversorgten Zahnsystem auch Karies.

Der Kontrast unterschreibt Dosis-, Helligkeits- oder Intensitätsunterschiede in einem Bild. Ohne Kontrast ist eine Struktur von ihrer Umgebung nicht zu unterscheiden. Neben den detektorphysikalischen Eigenschaften nehmen die Röntgenstrahlen Einfluss auf den Kontrast. Dieser Strahlenkontrast wird geprägt durch verschiedene physikalische Eigenschaften der Röntgenstrahlen, sowie der Dichte der darzustellenden Strukturen. Hierunter fallen Quantenrauschen, Strahlungsqualität, Objektabsorption und die Streustrahlung.

Der Bildrauschen setzt sich bei den digitalen Systemen aus dem Quantenrauschen und dem Systemrauschen zusammen. Das Quantenrauschen entsteht durch die Fluktuation der Röntgenstrahlen, die zu kleinen Abweichungen der Dichte der Quanten führt. Rauschen im Detektor wird vor allem durch den Signalverstärker und den Analog-Digital-

Abstract
Three-dimensional imaging by cone-beam volumetric imaging opens the possibilities for dental radiology. The diagnosis and planning of complex or difficult indications is improved. In the recent months a high number of new devices with various applied technology or workflow were presented. The possibilities for diagnosis and the effort-risk-relation were discussed by the relevant parameters like size of volume and applied dosis.



Vita
Dr. Lutz Ritter
1997 bis 2003: Studium der Humanmedizin an der Ludwig-Maximilians-Universität München und an der Universität zu Köln
seit 2003: Studium der Zahnmedizin an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
2000 bis 2007: wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Arbeitsgruppe Surgical Systems Laboratory unter Leitung von Dr. Keewe am Forschungszentrum caesar – zuständig für medizinische Anforderungen bei der Entwicklung der Software-Plattform
seit 2002: zuständig für das Requirement Engineering bei der Entwicklung des ersten GALILEOS-Prototypen
seit 2004: zuständig für die Betreuung der klinischen Studien zum Thema GALILEOS an der Universität zu Köln
Autor von über 30 nationalen und internationalen Publikationen

Kontaktadresse:
Dr. Jörg Neugebauer
Interdisziplinäre Poliklinik für Chirurgie und Implantologie
Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie der Universität zu Köln
Direktor: Univ.-Professor Dr. Dr. J. E. Zöllner
Kempner Str. 32, 50931 Köln
Tel +49 221 4784700