

**HERSTELLERINFORMATION** // Natürliche Zähne so lange wie möglich zu erhalten, ist eine der Hauptdisziplinen in der Zahnheilkunde. Es stehen der modernen Zahnheilkunde heute vielfältige Technologien zur Verfügung, um die Zähne endodontisch zu diagnostizieren. Neben der 2D-Radiologie und Mikroskopie ist die DVT-Technologie das wichtigste Diagnosewerkzeug. Das Green X (Abb. 1) ist mit 49 µm bei FOV 4x4 cm das Gerät mit der weltweit höchsten Auflösung und der daraus resultierenden Detailschärfe. Die byzzEz3D-i Software mit dem erweiterbaren Endo-Modul rekonstruiert aus den hochauflösenden Schichtaufnahmen ideale 3D-Bilder (Abb. 2 und 3). Im folgenden Artikel werden das Röntgenbildgebungssystem und die Software mit ihren Modulen vorgestellt.

## VORTEILE EINER 3D-PLANUNGSSOFTWARE MIT ENDO- & ORTHO-SEGMENTIERUNGSMODUL

Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. Frank Hornung / Biberach an der Riß, ZTM Meik Hornung / Geroda, Prof. Dr. Gerhard Polzar (KKU) / Büdingen

Das Green X ist das modernste digitale 4-in-1-Röntgenbildgebungssystem, das sowohl 2D-Modalitäten wie Panorama- und kephalometrische Aufnahmen in ultrahochoflösender Bildqualität ermöglicht als auch flexible 3D-DVT-Aufnahmen von Patienten, Modellen und Abformlöffeln. Eine der vielen Besonderheiten des neuen Green X von orangedental ist die erweiterte Insight PAN 2.0 Funktion (Multi-layer in 41 Schichten), speziell in Sektionen, Free FOV sowie der ultrahochoflösende 49 µm Scanmodus für alle endodon-

tischen Fragestellungen. In Kombination mit dem Endo- und Ortho-Segmentierungsmodul der byzzEz3D-i Software wird die Software zu einem leistungsstarken Diagnose- und Analysewerkzeug mit einer für die Patientenaufklärung völlig neuartigen Darstellungsform. Die Überlagerung der Oberflächenmodelle (STL-Daten) aus externen Scansystemen ist durch die exzellente Oberflächendarstellung der 3D-Röntgenaufnahmen problemlos und komfortabel. Die Endo- und Ortho-Segmentierungsfunktion liefert zusätzlich

detaillierte Informationen über alle dentoalveolären Strukturen. Somit bietet das Green X alle Möglichkeiten, den digitalen Workflow im Praxisalltag umzusetzen.

### Durchblick in allen Ebenen

Die 3D-Endo-Aufnahmen können als Hologramm in allen drei Dimensionen vermessen werden. Sowohl die Bi- und Trifurkation, Kanalanzahl, -verlauf, -länge und -durchmesser sowie die Krümmungsradien können einfach farblich gekennzeichnet werden. Damit ist das 3D-Endo-Modul nicht nur ein ideales Instrument zur Vorbereitung für die Wurzelkanalaufbereitung und Wurzelspitzenresektion, sondern auch ein hervorragendes Hilfsmittel zur 3D-Visualisierung, Behandlungsplanung und Patientenberatung. Endodontologie ist neben der Implantologie und Paradontologie eine der wichtigsten rechtfertigenden Indikationen in der Zahnheilkunde.



**Abb. 1:** Das digitale Röntgenbildgebungssystem Green X 3D Ceph (orangedental/Vatech).

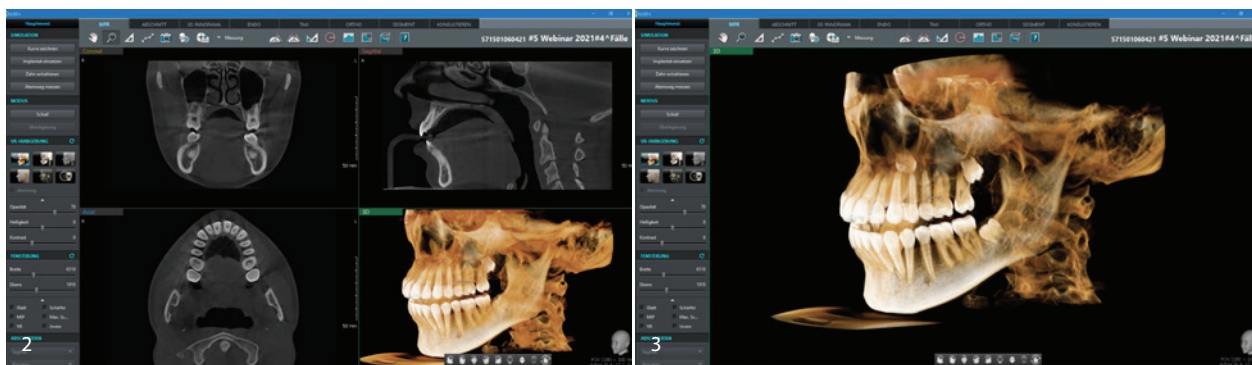


Abb. 2: Green X 3D 18x10, byzzEz3D-i Software Ansicht. Abb. 3: Green X 3D 18x10, byzzEz3D-i Software 3D-Ansicht.

Endo-Segmentierung, Zahnauswahl, Kanalmarker und -länge sowie Krümmungswinkel in Farbe mit Verlaufskontrolle (Abb. 4–8): Das Green X unterstützt alle diagnostischen Fragestellungen und gibt Sicherheit in der Kommunikation mit Patienten sowie zur Therapieplanung, Instrumentenwahl und Realisierung der Behandlungsziele. Eines der wichtigsten Werkzeuge zur transparenten Darstellung der Zahnstrukturen ist das Endo- und Ortho-Segmentierungsmodul. Mit diesem Werkzeug kann man Zähne von umgebenden Strukturen lösen (segmentieren) und Knochensubstanz virtuell ausblenden, um eine klare Sicht auf die Zahnstrukturen zu erhalten. Diese Vorge-

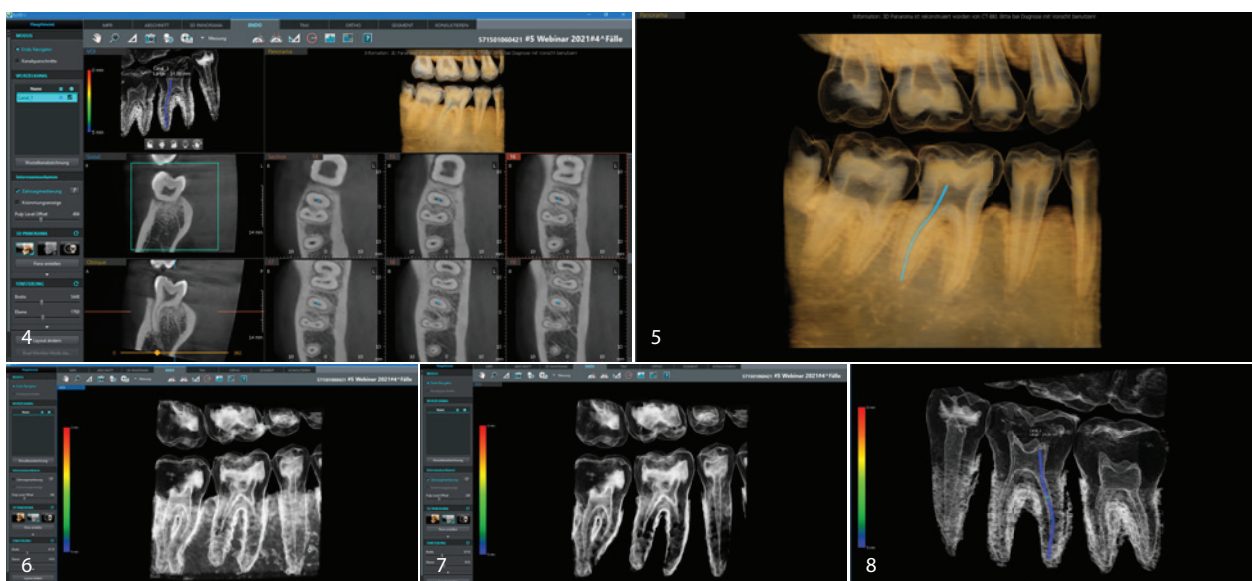
hensweise ist sowohl für die endodontische Befundung und Kanalanalyse von wesentlichem Vorteil als auch für die Chirurgie, Implantologie und Kieferorthopädie. Die virtuelle Extraktion von Zähnen wird ermöglicht, und diese können inklusive der Wurzelinformationen gemeinsam mit den überlagerten Oberflächenmodellen als STL-Daten zur weiteren Verarbeitung in digitalen dentalen Workflow-Protokollen übergeben werden. CAD-Softwares, wie z.B. byzzCAD (orangedental) oder exoCAD (exocad GmbH), sowie Planungssoftwares von kieferorthopädischen Therapiehilfsmitteln, z.B. OnyxCeph™ (Dentaurum), Invisalign oder 3Shape Ortho Analyzer (3Shape A/S), können

somit alle zahnbezogenen anatomischen Strukturen des Patienten zur Herstellung von Bohrschablonen, Schienen oder Aligernern nutzen.

### Historie und Einführung in die Grundlagen der Segmentierungsalgorithmen

Die digitale Zahnmedizin hat sich im letzten Jahrzehnt rasant entwickelt. Der Schlüssel zur digitalen Zahnheilkunde ist die Erfassung und Segmentierung vollständiger 3D-Zahnmodelle. Sie werden benötigt, um z.B. die Zielaufstellung und Bewegungen einzelner Zähne für die kie-

Abb. 4: Endo-Diagnostik im Endo-Modul. Abb. 5: Endo-Diagnostik in 3D-Panorama-Ansicht. Abb. 6: Endo-Diagnostik in VR-Ansicht mit Knochen-segment. Abb. 7: Endo-Diagnostik in VR-Ansicht ohne Knochen-segment. Abb. 8: Endo-Diagnostik mit 3D-Kanallängenmessung.



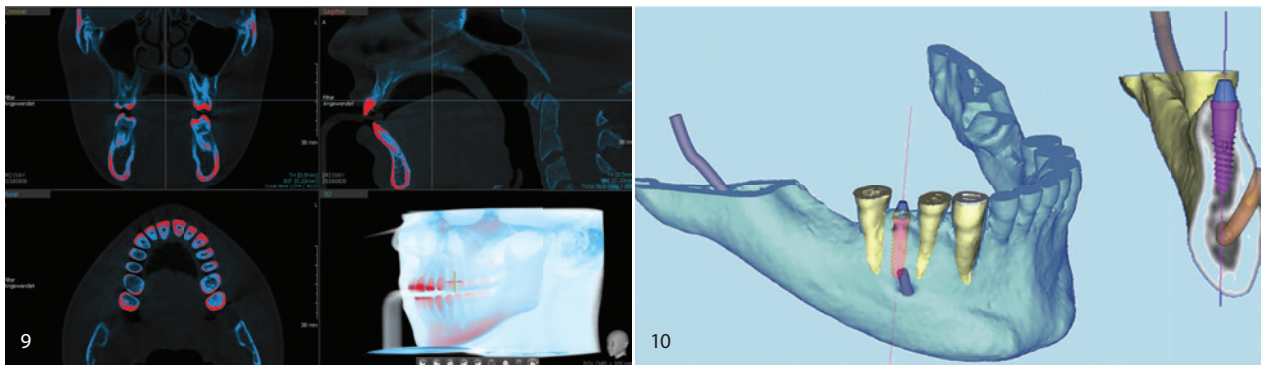


Abb. 9: byzzEz3D-i in VR-Ansicht mit Dichtesegmentierung. Abb. 10: DGI-Poster von Prof. Dr. Gerhard Polzar (KKU) aus dem Jahr 2008.

ferorthopädische Diagnose und Behandlungsplanung festzulegen. Die Erfassung von kompletten 3D-Zahnmodellen ist jedoch eine anspruchsvolle Aufgabe. Derzeit gibt es zwei gängige Technologien zur Erfassung von 3D-Zahnmodellen: Intraorales oder Desktop-Scannen und Cone-Beam-Computertomografie (CBCT). Intraorales oder Desktop-Scannen ist eine bequeme Methode, um die Oberflächengeometrie von Zahnkronen zu erhalten. Aber es kann keine Informationen über Zahnwurzeln liefern, die in vielen Fällen für eine genaue Diagnose und Behandlung benötigt werden. Im Gegensatz dazu liefert das CBCT umfassendere volumetrische 3D-Informationen aller oralen Gewebe, einschließlich der Zähne. Aufgrund seiner hohen räumlichen Auflösung ist es für die 3D-Bildrekonstruktion geeignet und wird häufig in der Oralchirurgie und digitalen Zahnmedizin, wie z.B. in der Kieferorthopädie, eingesetzt. Dieser Artikel

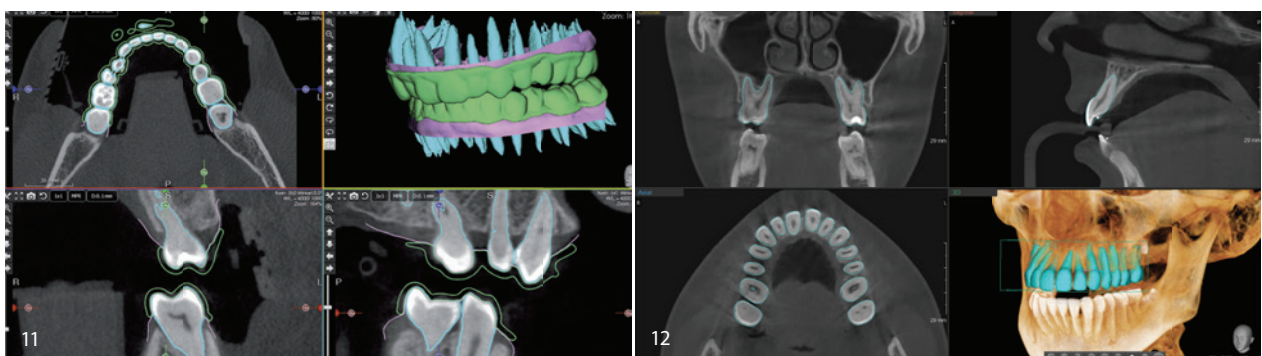
konzentriert sich auf die Segmentierung und Identifizierung von 3D-Zahninstanzen aus CBCT-Bilddaten – eine kritische Aufgabe der Anwendungen in der digitalen Kieferorthopädie, wie in Abbildung 9 anhand der Dichtesegmentierung gezeigt wird.

Bereits 2008 beschrieb Prof. Dr. Gerhard Polzar (KKU) in einem Poster zur Jahrestagung zur Deutschen Gesellschaft für Implantologie (DGI) die „CT-basierte Implantatplanung mit Simplant nach endständiger Distalisation eines unteren Prämolaren“ (Abb. 10). In weiteren Veröffentlichungen (z.B. G. Polzar, F. Hornung, J. Compr. Dentof. Orthod. + Orthop. [COO] Umf. Dentof. Orthod. u. Kieferorthop. [UOO], 2015) wurden die Vorteile der Methoden zur Zahnsegmentierung hinreichend erläutert. Ziel war es bereits 2015, eine kieferorthopädische Planung und Behandlung „ganz“ ohne die Zuhilfenahme von kieferorthopädischen Abdrücken

oder Gipsmodellen zu verwirklichen. Man wollte eine komplette dreidimensionale Übersicht über alle kieferorthopädisch relevanten Strukturen und Gewebe einschließlich der Anatomie der Zahnwurzeln, des Knochens und der Weichgewebe haben und diese dann direkt für eine kieferorthopädische Therapie nutzen (Abb. 11). Das müsste doch die Fehlerquote erheblich reduzieren und dazu führen, dass man den idealen therapeutischen Weg findet? So lautete damals die Frage. Kombiniert man diese Grundlagen mit der Möglichkeit der neuen Folientechniken wie Invisalign, Gleichwertige oder fertigt womöglich die kieferorthopädischen Aligner im Fräs- oder 3D-Druckverfahren direkt an, hätte man die zu 100 Prozent eine komplette digitale Therapie – das war die Vision bereits 2008, 2015 und ist sie bis heute.

Die Segmentierung von Zähnen aus CBCT-Bildern ist aus folgenden Gründen

Abb. 11: Manuelle Zahnsegmentierung mit Überlagerung der Gingivasegmentierung und CAD-Aligner im Initialstep nach Polzar/Hornung 2015. Abb. 12: Green X 18x10cm Datensatz im byzzEz3D-i mit überlagerter Zahnsegmentierung bei beiden oberen zentralen Schneidezähnen oder Molaren.





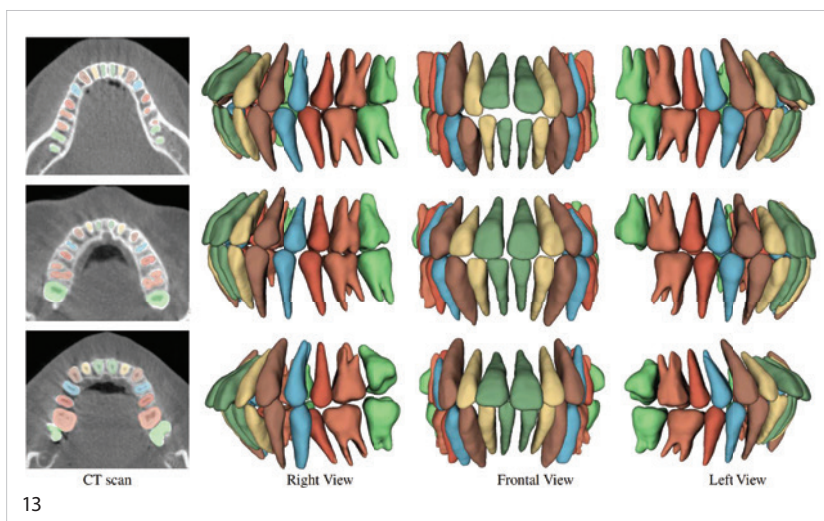


Abb. 13: CT-Scan in Rechts-, Frontal- und Linksansicht.

Zahnsegmentierung gezeigt haben, zumal bei CBCT-Geräten zwingend ein Protokoll zur Hounsfield-Kalibrierung notwendig wird. Dies kann bis heute nicht in jedem Fall für alle Geräte im Markt gewährleistet werden.

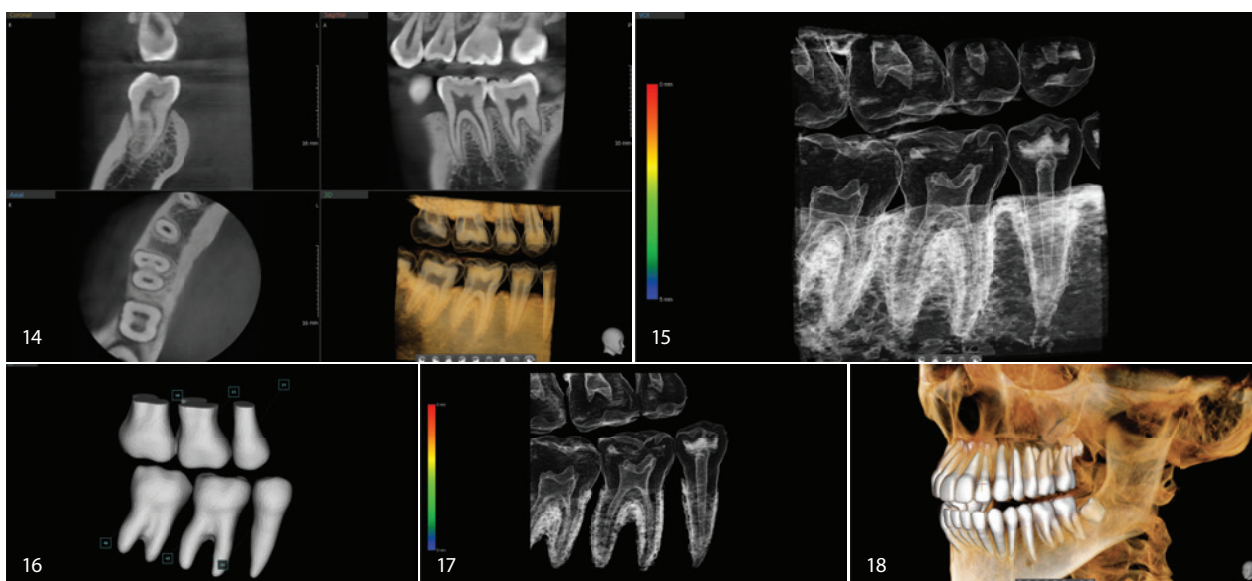
### Methoden der künstlichen Intelligenz und Verwendung vorhandener Wissensbasis

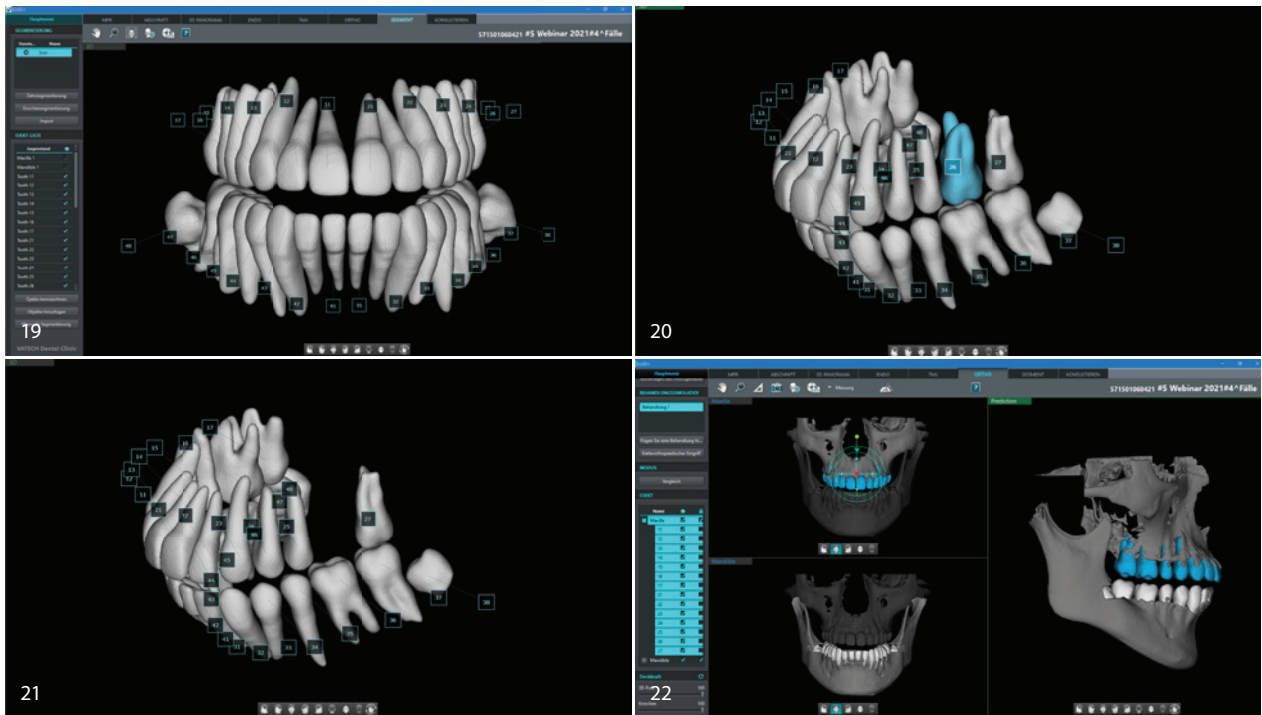
Um die oben genannten Probleme zu lösen, nutzen einige frühere Arbeiten zur Zahnsegmentierung entweder die Level-Set-Methode oder die schablonenbasierte Fitting-Methode. Die erstgenannten Methoden sind dadurch eingeschränkt, dass sie eine praktikable Initialisierung benötigen, die langwierige Benutzerkommentare erfordert, und sie liefern unbefriedigende Ergebnisse, wenn sich die Zähne im natürlichen Okklusionszustand befinden. Den letzteren Methoden fehlt die notwendige Robustheit in der Praxis, wenn es große Formvariationen bei verschiedenen Patienten gibt. In jüngster Zeit haben viele Deep-Learning-Methoden (künstliche Intelligenz) für die medizinische Bildanalyse – obwohl sie nicht auf die Zahnsegmentierung angewendet wur-

eine schwierige Aufgabe: Wenn das CBCT in der natürlichen Okklusion aufgenommen wird (d.h., die unteren und oberen Zähne berühren sich im normalen Biss), ist es schwierig, untere Zähne von den gegenüberliegenden oberen Zähnen entlang der Okklusalfäche zu trennen, da sich in dieser Region die Grauwerte nicht ändern. Ebenso ist es schwierig, einen Zahn von dem ihn umgebenden Alveolar-

knochen zu trennen, da die Dichte der Zähne der umgebenden Struktur sehr ähnlich ist. Benachbarte Zähne mit ähnlicher Form können außerdem die Identifizierung verschiedener Zahninstanzen erschweren (Abb. 12). Daher kann eine erfolgreiche Zahnsegmentierung kaum erreicht werden, wenn man sich nur auf die Intensitätsvariation von CBCT-Bildern verlässt, wie viele frühere Versuche zur

Abb. 14: Endo-Diagnose der Zähne 45 und 46, Ansicht koronal, horizontal und sagittal. Abb. 15: Endo-Diagnose der Zähne 45 und 46 in VR-VOI-Ansicht mit Knochensegmenten. Abb. 16: Endo-Diagnose der Zähne 45 und 46 mit Zahnsegmentierung. Abb. 17: Endo-Diagnose Zähne 45 und 46 in VR-VOI-Ansicht ohne Knochensegmente. Abb. 18: byzzEz3D-i KFO-Diagnose vom Zahnstatus im Ober- und Unterkiefer inkl. der Zahnsegmentierung im Oberkiefer.





**Abb. 19:** byzzEz3D-i – KFO-Diagnose vom Zahnstatus im Ober- und Unterkiefer mit nach künstlicher Intelligenz automatisierter Zahnsegmentierung. **Abb. 20:** byzzEz3D-i – KFO-Diagnose Oberkiefer mit virtuelle Zahnselektion von Zahn 26. **Abb. 21:** byzzEz3D-i – KFO-Diagnose Oberkiefer mit virtuelle Zahnextraktion Zahn 26. **Abb. 22:** byzzEz3D-i – byzzCAD segmentierte Zähne im Ober- und Unterkiefer sowie Knochensegmentierung.

den – eine vielversprechende Leistung gegenüber traditionellen Methoden in verschiedenen Aufgaben gezeigt.

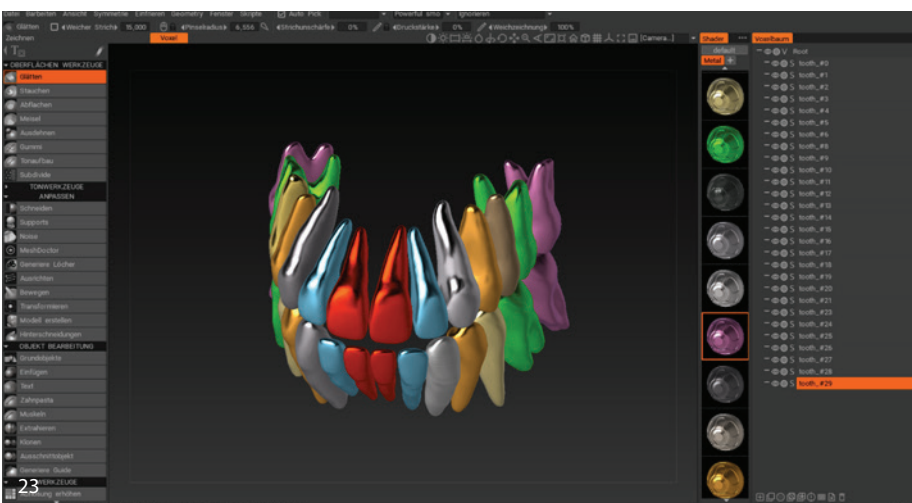
### Segmentierung von Zähnen aus CBCT-Bildern

Eine genaue Zahnsegmentierung aus CBCT-Bildern ist ein grundlegender Schritt für die Rekonstruktion individuell-

ler 3D-Zahnmodelle, die Zahnärzte bei der kieferorthopädischen Diagnose und Behandlungsplanung unterstützen können. Viele traditionelle Algorithmen wurden für die Zahnsegmentierung vorgeschlagen, um die Bedeutung dieser Anwendung zu verdeutlichen. Unterstützt durch die Intensitätsverteilung in CBCT-Bildern, greifen bisherige Ansätze auf Region Growing und Level Sets Boosted Algorithmen zurück. Durch weitere

Berücksichtigung des Vorwissens über den Zahn werden statistische Formmodelle zur leistungsfähigsten und effizientesten Wahl. Allerdings leiden diese Methoden immer unter vielen Artefakten oder Fehlern, selbst bei ausgezeichneter manueller Initialisierung (Abb. 13). Die Ergebnissgalerie der Zahnsegmentierung und -identifikation: Verschiedene CT-Scans mit Segmentierungsergebnissen sind in der ersten Spalte und die rekonstruierten 3D-Zahnmodelle aus drei verschiedenen Ansichten in den folgenden drei Spalten gezeigt.

Alle diese bisherigen Arbeiten haben Wissenschaftler vor allem aus Asien motiviert, das Problem der Zahnsegmentierung aus CBCT mit einer datengetriebenen Methode zu lösen, welche die Form- und Datenprioritäten gleichzeitig erkennt und lernt. Konkret verwendet das byzzEz3D-i Segmentierungsmodul eine neuartige KI- und lernbasierte Methode



**Abb. 23:** byzzEz3D-i – byzzCAD – STL-Export von Ober- und Unterkiefer.

zur automatischen Segmentierung und Identifizierung von Zahninstanzen. Die Methode zielt darauf ab, alle Zähne von den umgebenden Bereichen zu segmentieren, voneinander zu trennen, jeden Zahn zu identifizieren, um ihm ein korrektes Label (Zahnnummer) zuzuweisen.

*byzzEz3D-i Software*

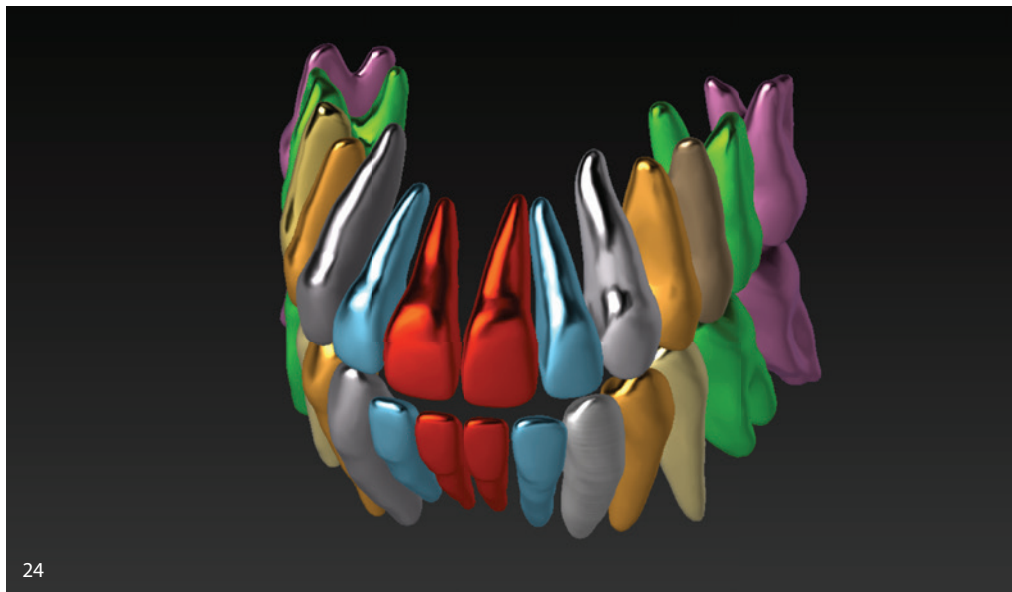
*Endo-Segmentierungsmodul*

Die byzzEz3D-i Software liefert mit dem Endo-Segmentierungsmodul ein ideales Werkzeug, um die endodontische Diagnose zu unterstützen. Durch das Ausblenden der Knochengmente besteht die Möglichkeit, die Darstellbarkeit der Zahnsubstanz maximal zu optimieren. Mit dem Werkzeug „Pulp-Level-Offset“ besteht noch eine weitere komfortable Möglichkeit, die Wurzelkanäle virtuell zu durchleuchten bzw. freizulegen (Abb. 14–17).

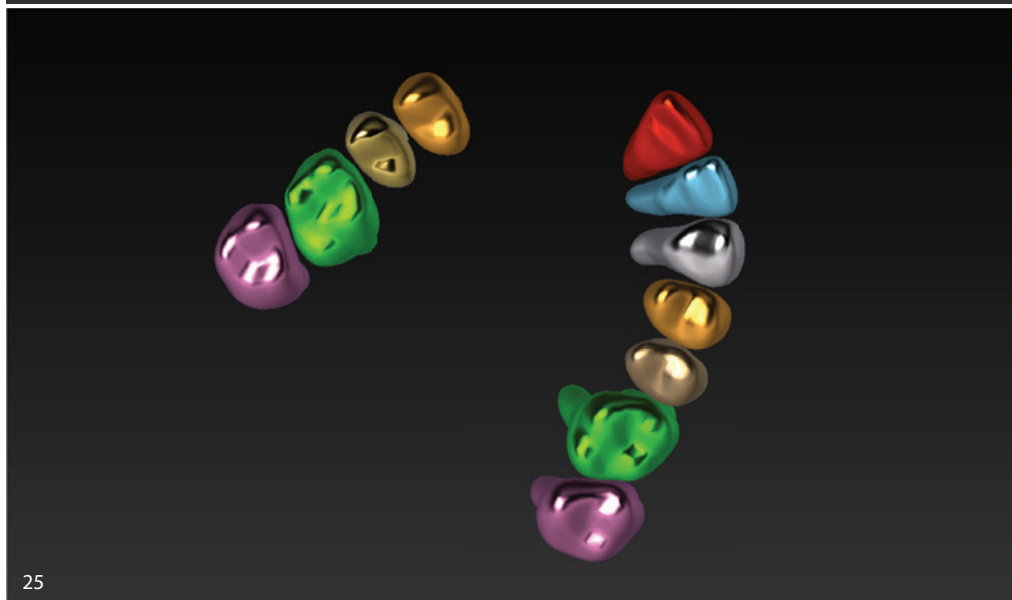
*byzzEz3D-i Software*

*Ortho-Segmentierungsmodul*

Dieses Modul unterstützt den Chirurgen, Zahnarzt und Kieferorthopäden bei der Segmentierung der Zahnsubstanzen und Knochengmente. Weiterhin lassen sich markierte Zähne virtuell extrahieren, bewegen und im STL-Format exportieren. Gleiches gilt für Knochengmente der Maxilla und der Mandibula. Mit dem Ortho-Chirurgiemodul lassen sich Segmentgruppen aus Knochenanteilen und Zähnen virtuell schneiden, verlagern und ebenfalls im STL-Format exportieren (Abb. 19–22). Die Daten lassen sich komfortabel in allen gängigen dentalen CAD-Softwaresystemen weiterverarbeiten (Abb. 22–24).



24



25

**Abb. 24:** byzzEz3D-i – byzzCAD segmentierte Zähne im Ober- und Unterkiefer. **Abb. 25:** byzzEz3D-i – byzzCAD segmentierte Zähne im Ober- und Unterkiefer mit virtueller Extraktion der Zähne 11, 12, 13.

**Fazit**

Die Segmentierung der dentoalveolären Strukturen dichte kalibrierter CBCT-Daten auf Basis von festgelegten Hounsfield-Werten alleine ist nicht zielführend. Künstliche Intelligenz, eine vorhandene Wissensbasis, moderne Methoden (Algorithmen) sowie die fast unbegrenzt vorhandene Rechenleistung erlauben heutzutage den Einsatz von Softwarelösungen im medizinischen und zahnmedizinischen Bereich, die neben diagnostischen Werkzeugen umfangreiche Hilfsmittel zur Vorbereitung und Realisierung des digitalen Workflows

erlauben. Die orangedental GmbH bietet mit den Röntgensystemen von Vatech, der „Inhouse“ entwickelten byzzSuite Software und der High-End-Software byzzEz3D-i zu Diagnose-, Analyse- und Planungszwecken (Abb. 25) alle komfortablen Möglichkeiten, um den digitalen Workflow ideal zu unterstützen.

Fotos: Abb. 1–12, 14–25: © orangedental GmbH & Co. KG; Abb. 13: © Automatic Tooth Instance Segmentation and Identification from Cone Beam CT Images, Z. Cui, C. Li, W. Wang, University of Hong Kong, 2019

DIPL.-ING. DIPL.-INFORM.  
FRANK HORNUNG  
orangedental GmbH & Co. KG  
Aspachstraße 11  
88400 Biberach an der Riß  
www.orangedental.de