

Aus der  
Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie  
des Kopf- und Hautzentrums  
Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf  
Direktor: Prof. Dr. Dr. R. Schmelzle

Virtuelle Simulation von Wurzelspitzenresektionen  
in einem dreidimensionalen Computermodell mit  
Kraftrückkopplungssystem

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg vorgelegt von

Dr. med. Norman von Sternberg

aus Breslau

Hamburg, 2006

Angenommen von der Medizinischen Fakultät  
der Universität Hamburg am: 28.02.2007

Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen  
Fakultät der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende: Prof. Dr. Dr. M. Heiland

Prüfungsausschuss: 2. Gutachter/in: Prof. Dr. P. Steiner

Prüfungsausschuss: 3. Gutachter/in: PD Dr. C. Peimann

Meinem Sohn Maximilian gewidmet

# Inhalt

<b>Inhalt</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1 Arbeitshypothese</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Material und Methoden</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 Aufnahmetechnik</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2 3D-Visualisierung mit dem VOXEL-MAN</b> .....	<b>11</b>
2.2.1 Erzeugung eines Grauwertvolumens.....	13
2.2.2 Segmentation.....	15
2.2.3 Modellierung mit „Tree-Edit“.....	19
2.2.4 Strukturierung der Objekte.....	20
2.2.5 Oberflächendarstellung.....	21
2.2.6 Hardware des Simulators.....	23
2.2.7 Haptisches Rendering.....	25
2.2.8 Berechnung der Kräfte während der Volumen-modifikation.....	26
<b>3 Ergebnisse</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1 3D-Schädelmodell</b> .....	<b>28</b>
3.1.1 Segmentierte Objekte.....	28
<b>3.2 Wurzelspitzenresektion</b> .....	<b>30</b>
3.2.1 Zahn 23.....	31
3.2.2 Zahn 25.....	33
3.2.3 Zahn 35.....	34
3.2.4 Zahn 36.....	36
<b>3.3 Osteotomie</b> .....	<b>38</b>
3.3.1 Zahn 24.....	38
3.3.2 Zahn 37.....	39
<b>3.4 Kieferhöhlenoperation</b> .....	<b>40</b>

<b>4</b>	<b><i>Diskussion</i></b> .....	<b>43</b>
4.1	Training chirurgischer Eingriffe.....	43
4.2	Wurzelspitzenresektion .....	44
4.3	Vorteile des neuen Modells .....	44
4.4	Limitationen .....	45
4.5	Erweiterungsmöglichkeit für andere Operationssituationen .....	46
4.6	Evaluation des Trainingseffekts .....	48
<b>5</b>	<b><i>Zusammenfassung</i></b> .....	<b>50</b>
<b>6</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b> .....	<b>51</b>
<b>7</b>	<b><i>Danksagung</i></b> .....	<b>59</b>
<b>8</b>	<b><i>Lebenslauf</i></b> .....	<b>60</b>
<b>9</b>	<b><i>Eidesstattliche Versicherung</i></b> .....	<b>61</b>

# 1 Einleitung

Wurzelspitzenresektionen sind seit über zweihundert Jahren bekannt [Hrusztics et al. 2003]. 1718 erschien in Nürnberg das erste deutschsprachige Lehr- und Handbuch der Chirurgie von Lorenz Heister und galt mehr als hundert Jahre als Standardlektüre für den Unterricht [Hoffmann 1958]. Darin findet sich eine Beschreibung der Operation von Zahnfisteln, aber noch ohne eine Empfehlung zur Abtragung der Wurzelspitze [Wolf 1929]. Laut Heister konnte die notwendige „Kariesbehandlung“ des Knochens durch das „Schneiden und Brennen“ bewirkt werden. 1884 riet John Nutting Farrar auf Grund neunjähriger Erfahrung mit der Behandlung chronischer Wurzelprozesse zur Amputation verschieden großer Teile von Molarenwurzeln mit anschließender Wurzelfüllung. Über ähnliche Versuche chirurgischer Wurzelbehandlungen wurde in den folgenden Jahren aus aller Welt berichtet. Im Jahre 1896 inaugurierte Carl Partsch, ein Chirurg aus Breslau, die chirurgische Behandlung der chronisch apikalen Parodontitis durch Wurzelspitzenresektion. In den Jahren 1895 bis 1899 wurde die Wurzelspitzenresektion durch ihn systematisch erarbeitet [Hoffmann-Axthelm 1995; Partsch 1899]. Zweifel der Fachwelt am Nutzen der Wurzelspitzenresektion verschwanden erst durch Fortschritte im Verständnis der Natur von Wurzelkanalinfektionen und periapikalen Erkrankungen [Chandler, Koshy 2002; Carrotte 2005]. Die Entwicklung eines Normbestecks durch Rehrmann 1951 erhöhte die Erfolgsaussichten der herkömmlichen Wurzelkanalbehandlung und erlaubte den Erhalt von vermeintlich hoffnungslos geschädigten Zähnen [Wesson, Gale 2003; Filippi et al. 2006].

Wurzelspitzenresektionen (WSR) bzw. Wurzelspitzenamputationen gehören heute zu den am häufigsten durchgeführten Eingriffen im Bereich der dentoalveolären Chirurgie [Nowack 2003]. Nach fehlgeschlagener Wurzelkanalbehandlung (Endodontie) stellt die Wurzelspitzenresektion, als Alternative zur Extraktion, eine Option zum Erhalt des Zahnes dar [Gagliani et

al. 2005]. Etablierte Indikationen sind dabei radikuläre Zysten, apikale Parodontitiden, insbesondere nach erfolgloser konservativer Behandlung [Hell, Bier 2000; Nentwig 2003], anatomische Besonderheiten, die eine konservative Wurzelkanalbehandlung unmöglich machen, *Viae falsae* und Wurzelfrakturen im apikalen Drittel, Instrumentenfrakturen [Nentwig 2004], Verlagerungen größerer Mengen nicht resorbierbaren Materials in Kieferhöhle und Mandibularkanal [Grotz et al. 1998] sowie freiliegende Wurzeln bei Kieferhöhlenoperationen und Entfernungen großer Zysten, wenn keine konservative Wurzelkanalbehandlung durchgeführt werden soll.

Die Wurzelspitzenresektion wird meist in Lokalanästhesie vorgenommen. Nach Präparation eines Mukoperiostlappens erfolgt die Osteotomie mit Darstellung der Wurzelspitze durch eine Kugelfräse. Neben dem Entzündungsgewebe werden in der Regel auch die untersten 3 mm der infizierten Wurzelspitze entfernt [Schwenzer, Ehrenfeldt 2000]. Die operative Kürzung des apikalen Drittels der Zahnwurzel mit ihren Ramifikationen sowie die Exkochleation des Granulationsgewebes sollen eine noch bestehende chronische periapikale Ostitis eliminieren [Ferreira et al. 2004; von Arx 2005] und der bakteriedichte Kanalabschluss am Resektionsquerschnitt eine Reinfektion des Knochens verhindern [van der Meer, Stegenga 2004]. Im Bereich des Wurzelstumpfes soll ein biologisch tragbarer, beschwerdefreier und funktionstüchtiger Zustand erreicht werden. Als ideales Heilungsergebnis werden die knöcherne Regeneration, die Zementapposition und die Ausbildung einer parodontalspaltähnlichen Struktur am Resektionsquerschnitt angesehen [Reichardt et al. 2002].

Im Rahmen der studentischen Ausbildung werden die theoretischen Grundlagen der WSR vermittelt und geprüft. Die praktische Ausbildung umfasst das Üben am Phantom, die operative Assistenz und die Durchführung unter Anleitung. Häufig bestehen Bedenken, die Behandlungsschritte am Patienten durchführen zu lassen, da es selbst unter Anleitung erfahrener Chirurgen häufiger zu Komplikationen kommt [Koea 2005]. Dies kann dem Gesundheitswesen erhebliche Kosten verursachen [Arshat et al. 1985]. Ein realistisches Training ohne Risiko für den Patienten wäre für den Chirurgen nur

an "Präparaten" von Leichen möglich. Obwohl die Dissektion menschlicher Präparate bis heute zweifellos der Goldstandard in der chirurgischen Ausbildung ist [Bockholt et al. 1999], gibt es jedoch aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von menschlichen "Präparaten" kein solches Kursangebot im Rahmen des Zahnmedizinstudiums.

Da jedoch besonders beim Erwerb praktischer Fähigkeiten die Repetition von großer Bedeutung ist, erscheint die Einführung einer zusätzlichen Modalität zur Vermittlung der praktischen Fähigkeiten sinnvoll. Die Entwicklung von Operationssimulatoren könnte in Zukunft dazu beitragen, die Ausbildung zu verbessern und das Behandlungsrisiko für die Patienten zu senken.

Leistungsfähige Algorithmen zur dreidimensionalen Visualisierung ermöglichen die Darstellung großer Datenmengen in einer für den Betrachter optimierten Weise [Coatrieux, Barillot 1990]. Im Gegensatz zu früheren zweidimensionalen Modellen, die beispielsweise zur Simulation okklusaler Karies beschrieben wurden [Johnson et al. 2000], können inzwischen aufgrund der gesteigerten Rechenleistung und Speicherkapazität von Computersystemen 3D-Ansichten von räumlichen Körpern in kurzer Zeit aus 2D-Schichten berechnet werden [Hill et al. 1994]. Von Techniken der virtuellen Realität erwartet man eine bessere Planung und präoperative Simulation der chirurgischen Vorgehensweise [Gibson et al. 1998; Girod et al. 1995; Schramm et al. 2000].

Es wurden verschiedene Programme zur virtuellen Simulation chirurgischer Eingriffe, wie auch der virtuelle Endoskopie entwickelt [Ecke et al. 1998; Foley, Smith 1996; Freysinger et al. 1997; Hassfeld, Muehling 1998]. Die virtuelle Koloskopie ist eine geeignete Methode zum Screening auf Kolonpolypen [Sternberg-Gospos 2002].

Chirurgische Eingriffe können an dreidimensionalen virtuellen Modellen auch in Echtzeit simuliert und trainiert werden [Xia et al. 2000],[Glombitza et al. 1999],[Gunkel et al. 2000; Lange et al. 2000]. Dabei geht es in dieser Arbeit im Gegensatz zu den meisten heutigen Simulationssystemen nicht um die Deformation von Weichteilgeweben [Xia et al. 2000b], sondern um die



realistische Nachahmung von Bohr- und Fräsvorgängen an festen Strukturen. Essentieller Bestandteil vieler Operationen in den Fachgebieten Neurochirurgie, Orthopädie und Mund- Kiefer- und Gesichtschirurgie ist das selektive Abtragen von Knochen unter Schonung des umliegenden Gewebes [Pfleger et al 2002]. Die Schonung der intraossär verlaufenden Gefäß- und Nervenbündel [Sakkal et al 1994], des Sinus maxillaris [Freedman, Horowitz 1999] und der Wurzeln der Nachbarzähne ist bei der Durchführung von Wurzelspitzenresektionen von entscheidender Bedeutung [Tsesis et al. 2005; Chong, Ford 2005], da sonst der Nachteil durch Kollateralschäden den Vorteil des Zahnerhalts überwiegen kann.

## **1.1 Arbeitshypothese**

Das Unix-basierte Programm VOXEL-MAN ermöglicht die Erstellung visuell und haptisch "begreifbarer" Modelle [Höhne et al. 1995]. Es wurden bereits umfangreiche virtuelle anatomische Modelle realisiert [Schubert et al. 1997] [Abbildung 1]. Im Bereich der Mittelohrchirurgie ist bereits ein System für virtuelle Eingriffe am Felsenbein eingeführt worden [Leuwer et al. 2001; Ptersik et al. 2002]. Der Chirurg betrachtet das virtuelle 3D-Modell stereoskopisch durch eine Shutter-Brille. Mit einem Kraftrückkopplungsgerät soll er die Oberfläche des Modells abtasten und mit simulierten chirurgischen Instrumenten die Oberfläche durch Bohren und Fräsen abtragen, so dass das anatomische Modell auch im Inneren inspiziert werden kann.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Anpassung dieses Voxel-Man-Simulators an den Operationssitus oralchirurgischer Eingriffe, um die stereoskopische Simulation von Wurzelspitzenresektionen zu ermöglichen.

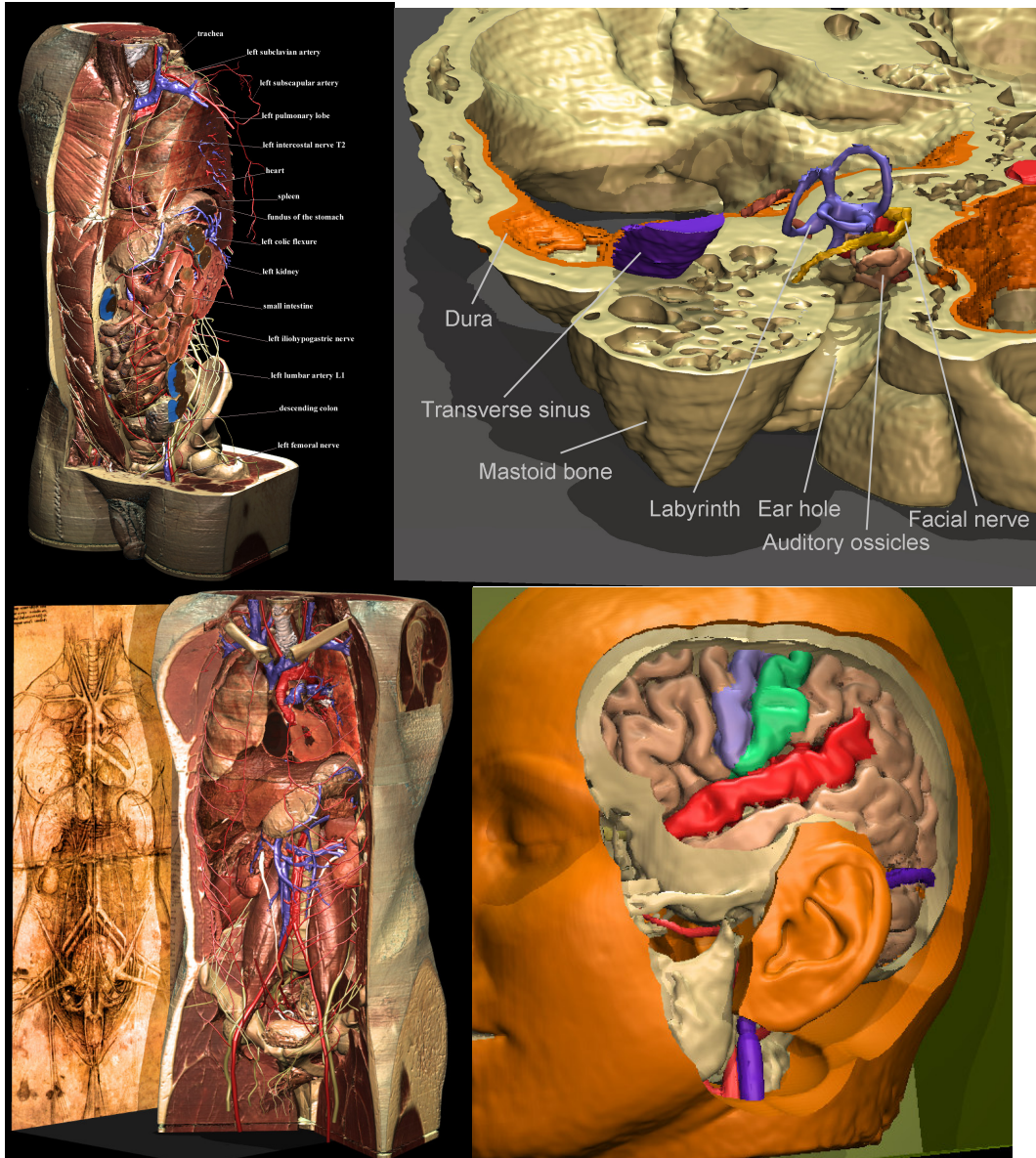


Abbildung 1 Mit dem „VOXEL-MAN“ erstellte virtuelle Anatomie-Modelle

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Aufnahmetechnik**

Der zugrunde liegende Computertomographiedatensatz eines mazerierten vollbezahnten menschlichen Schädels wurde mit einem Vierzeilen-Multidetektor-CT (Volume Zoom, Siemens Medizintechnik, Erlangen) akquiriert. Um einen möglichst hochaufgelösten Datensatz zu erhalten, wurde der verwendete Schädel mit folgendem CT-Protokoll gescannt: Schichtdicke 1 mm, Kollimation 2x0,5 mm, Tischvorschub 1 mm, 120 kV, 75 mAs, Rotationszeit 1 s. Die Daten wurden mit einem Kernel von H60s, einer Schichtdicke von 1 mm und einem Inkrement von 1 mm rekonstruiert.

Die computertomographisch erfassten Daten wurden auf einem Datenträger gesichert und dienten als Grundlage zur Weiterbearbeitung im Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin (IMDM) des Universitätsklinikums in Hamburg – Eppendorf (UKE). Als Dateiformat zum Speichern fand der „Dicom-Standard“ (Digital Imaging and Communications in Medicine, entwickelt von der National Electrical Manufacturess Association, USA<sup>1</sup>) Anwendung, um die auf CD gespeicherten Daten langfristig und mit jederzeitigem und schnellem Zugriff zu verwalten.

### **2.2 3D-Visualisierung mit dem VOXEL-MAN**

Unter dem Namen "VOXEL-MAN" wird eine ganze Familie von Programmen und Produkten zusammengefasst<sup>2</sup>. Die Programme werden vom Springer-Verlag Heidelberg/New York vertrieben und ermöglichen die Darstellung medizinischer Volumendatensätze, die mit tomographischen bildgebenden

---

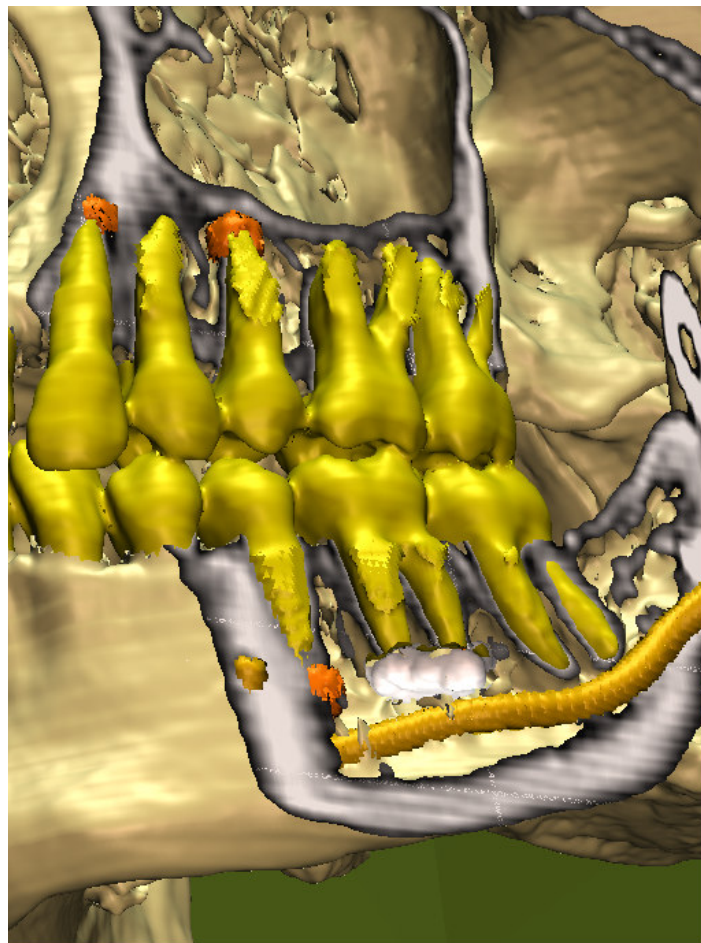
<sup>1</sup> [http://www.dicom.de/frame/main\\_about.html](http://www.dicom.de/frame/main_about.html)

<sup>2</sup> [http://www.uke.uni-hamburg.de/zentren/experimentelle\\_medizin/informatik/forschung/vm/index.de.html](http://www.uke.uni-hamburg.de/zentren/experimentelle_medizin/informatik/forschung/vm/index.de.html)

Verfahren, insbesondere der CT und MRT, erstellt wurden. Das Voxel-MAN-Visualisierungssystem ermöglicht die interaktive Untersuchung detaillierter Modelle des Körpers. In dieser Arbeit wurde eine 3D-Darstellung eines Schädels aus dem oben beschriebenen CT-Datensatz erstellt.

Verschiedene Visualisierungstechniken, wie die Oberflächendarstellung und die Darstellung interner Strukturen auf Schnittebenen können auf einer einzelnen Ansicht kombiniert werden [Abbildung 2].

Die einzelnen Schritte dieser Visualisierung werden nachfolgend erläutert [Abbildung 3].



*Abbildung 2: Kombination einer Oberflächendarstellung mit der Darstellung innerer Strukturen auf einer CT-Schicht*

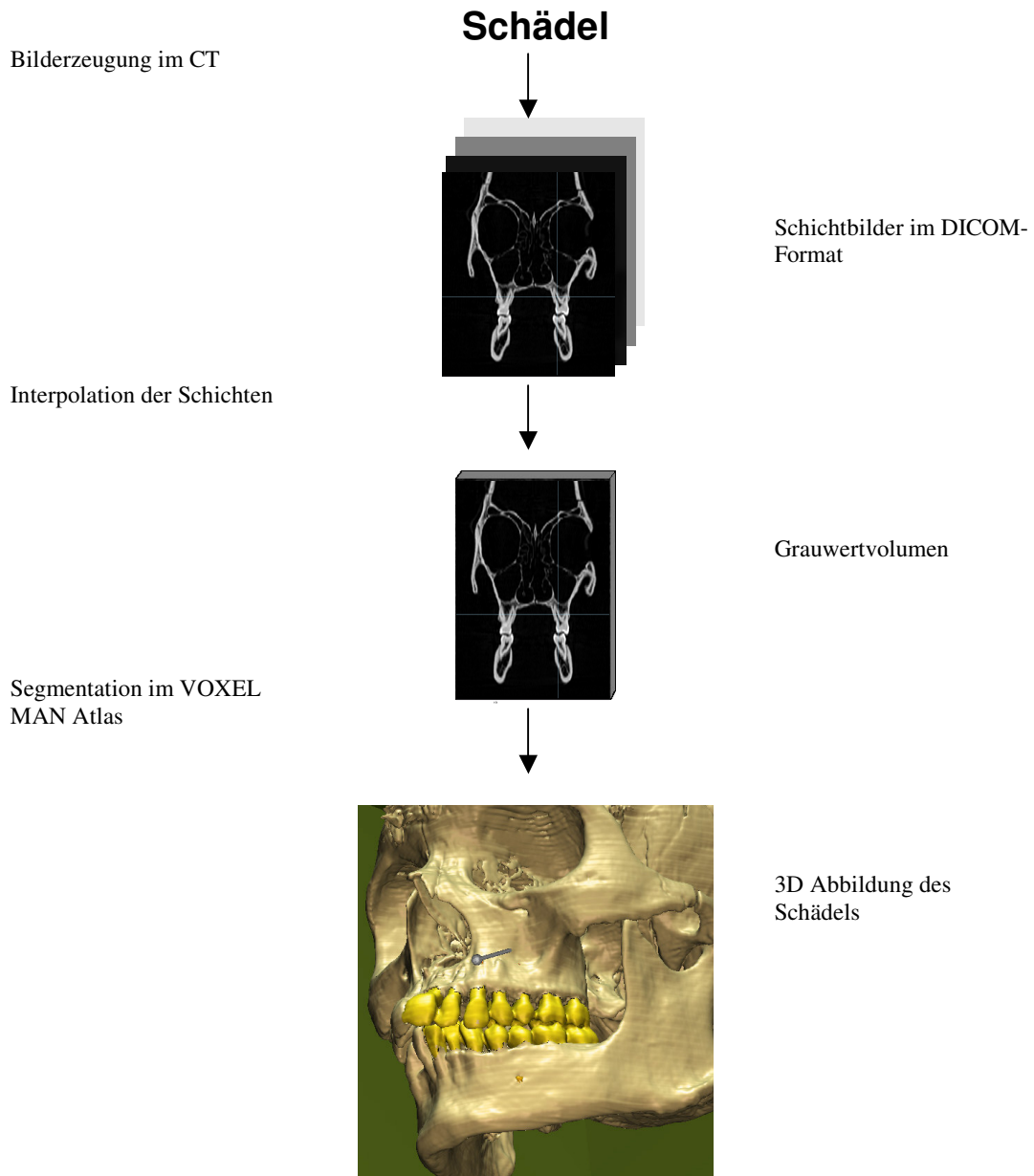
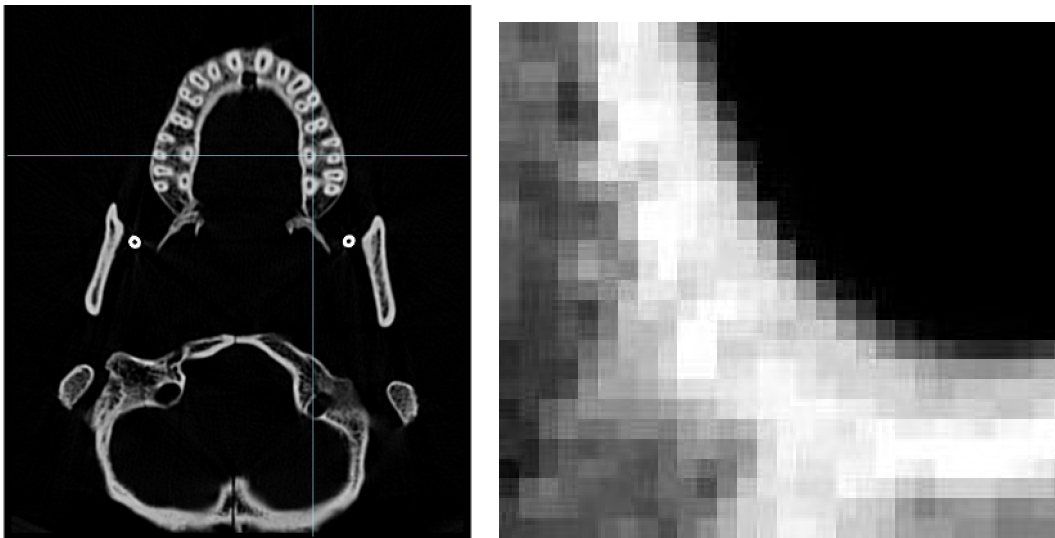


Abbildung 3: 3D-Visualisierung eines CT-Datensatzes

### 2.2.1 Erzeugung eines Grauwertvolumens

Zunächst wurden die „DICOM“-Schichtbilder eines menschlichen Schädels mit dem Programm „ImageJ“ von Wayne Rasband (Research Services Branch, National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA) in Volumendaten

umgewandelt. Dafür nutzte die Software die Pixelstruktur der CT-Bilder. „Pixel“ (zu deutsch Bildpunkt) ist ein Kunstwort aus der Abkürzung der englischen Worte Picture und Element und bezeichnet die kleinste Einheit einer digitalen Rastergrafik. Das bedeutet, im technischen Sinne können zweidimensionale Bilder als eine Summe elementarer Rechtecke aufgefasst werden. Folglich besteht ein Bild, je nach Größe dieser Pixel aus unterschiedlich vielen Flächenelementen [Abbildung 4].



*Abbildung 4 CT-Schichtbild aus dem H60s Datensatz (links) und Ausschnittsvergrößerung (10x), um den Pixelaufbau zu verdeutlichen (rechts)*

Mit der Funktion „Import Dicom Sequence“ nahm „ImageJ“ den CT-Datensatz auf und sortierte die Bilder, um eine Betrachtung des Volumens zu ermöglichen. Eine solche Sequenz von Bildern, dargestellt in einem Fenster, bezeichnet man als Stapel (engl. stack). Dieser ist mit einem Daumenkino vergleichbar. Enthaltene Bilder lassen sich in ihrer Reihenfolge betrachten und können durch das Bewegen von Schicht zu Schicht trotz ihrer Zweidimensionalität einen räumlichen Eindruck erwecken. Leere Hintergrundbereiche im „Stack“, die keine Schädelknochen enthielten, wurden mit der Funktion „Image-crop“ vom Volumen entfernt, um eine Datenreduktion zu erreichen. „ImageJ“ ermöglichte es, aus den Pixeln in der Sequenz von Schnittbildern kubische

Volumenelemente (engl. Voxel) zu erzeugen, die in ihrer Gesamtheit einen dreidimensionalen Körper bildeten.

Der Begriff „Voxel“ setzt sich aus den englischen Wörtern volumetric und pixel zusammen und bezeichnet das dreidimensionale Äquivalent eines Pixels. Die Kantenlänge (engl. Pixel Spacing) der erzeugten Voxel betrug 1 mm. Dieser Wert entsprach dem Abstand zwischen zwei benachbarten CT-Schichten (engl. Slice Location). Jedes einzelne Voxel enthielt einen Grauwert aus den Röntgenbildern. Analog zur CT entsprach die Helligkeit dieses Grauwerts der röntgenologischen Dichte der Struktur. Die Summe aller Voxel bildete ein Grauwertvolumen. Das erzeugte Volumen wurde im .raw-Dateiformat gespeichert und in VOXEL-MAN importiert.

## **2.2.2 Segmentation**

Für den WSR-Simulator mussten entsprechende Strukturen, wie Schädel und Zähne aus dem Grauwertvolumen isoliert werden. Im "VOXEL-MAN"-Atlas ist ein Segmentations-Werkzeug integriert [Höhne, Hanson 1992], das diese Operation ermöglicht.

### **2.2.2.1 Automatische Segmentation**

In einem Histogramm war die Verteilung der 4093 möglichen Grauwerte in dem aus dem CT-Datensatz erstellten Grauwertvolumen abgebildet [Abbildung 5]. Je röntgendichter eine abgebildete Struktur war, desto heller wurden die korrespondierenden Voxel.

Zunächst wurde im Histogramm des Grauwertvolumens ein Schwellwert bestimmt, der sich am Übergang zwischen helleren und der dunkleren Struktur befand. Der Schwellwert konnte auf der Skala des Histogramms als ein Wert zwischen -1024 und 3071 abgelesen werden. Alle Voxel im Volumen, die einen höheren (helleren) Grauwert hatten als der Schwellwert, wurden nachfolgend markiert und mit dem Attribut der helleren Struktur versehen. Die Oberfläche der markierten Voxel repräsentierte nun die Oberfläche des helleren Objekts. Die Oberfläche des Objekts wurde in der 3D-Ansicht betrachtet [2.2.5]. Es wurden solange verschiedene Schwellwerte ausprobiert bis eine optimale

Oberflächendarstellung erreicht werden konnte.

Segmentierte Strukturen wurden dem System definiert, mit einem Attribut wie zum Beispiel "Objekt\_1" belegt, farblich abgesetzt und gespeichert.

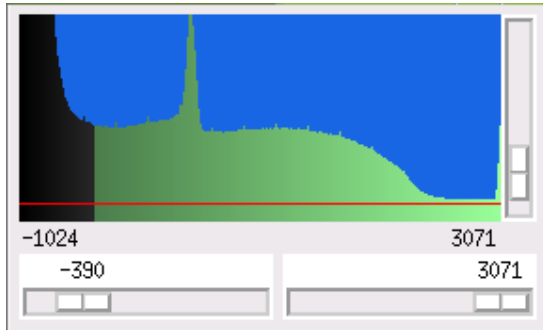


Abbildung 5 Histogramm des Schwellenwertes Grauwertvolumen.

*Ordinate: Spektrum der Grauwerte der Voxel im Volumen bei Verwendung bestimmter Filter*

*Abszisse: 4095 mögliche Schwarz/Weißtöne geordnet nach Helligkeit von Schwarz (-1024) nach Weiß(+3071)*

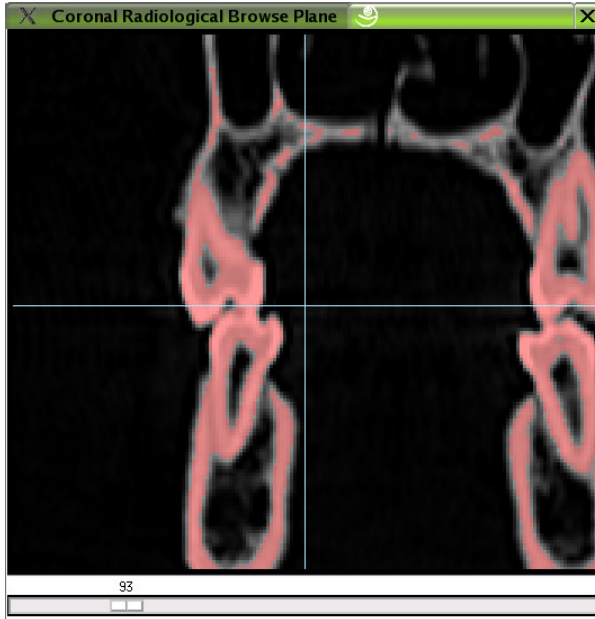
### 2.2.2.2 Manuelle Segmentation

Für Strukturen wie Zähne war eine automatische Segmentation mittels Histogramm jedoch nicht möglich, da kein Schwellenwert existierte, um die Zähne eindeutig vom Schädelknochen zu trennen. Der Grund hierfür lag im ungleichen Verhältnis zwischen der Parodontalspaltbreite (um 0,2mm) und Voxelgröße (1 mm). Die Voxel waren zu groß, um am Übergang vom Schädel zum Zahn eine klare Grenze in den Grauwerten zu erhalten. Infolgedessen war die Segmentation der Zähne von Hand erforderlich.

Bei der manuellen Segmentation können innerhalb eines vorher automatisch mit Schwellwert segmentierten Objekts einzelne Strukturen isoliert werden.

Zunächst wird das vorher schwellwert-segmentierte Objekt in den Speicher „Mask“ eingelesen. Die Mask kann im "VOXEL-MAN" in den einzelnen Schichten [Abbildung 6] oder als Oberfläche in der 3D-Ansicht rosa dargestellt werden [Abbildung 18].





*Abbildung 6 Schwellwert-segmentiertes Objekt in der Mask*

Das zu segmentierende Objekt wird nun von der Umgebung abgegrenzt, indem die außerhalb des Objekts liegenden Voxel mit „Painting inverse“ aus der Maske entfernt werden [Abbildung 7]. Dieser Vorgang muss in jeder Schicht des Grauwertvolumens, in der das Objekt enthalten ist, wiederholt werden, bis das Objekt von der Umgebung komplett isoliert ist. Über eine Analyse der zusammenhängenden Komponenten konnte das Objekt von dem Rest der Mask isoliert dargestellt werden [Abbildung 8].

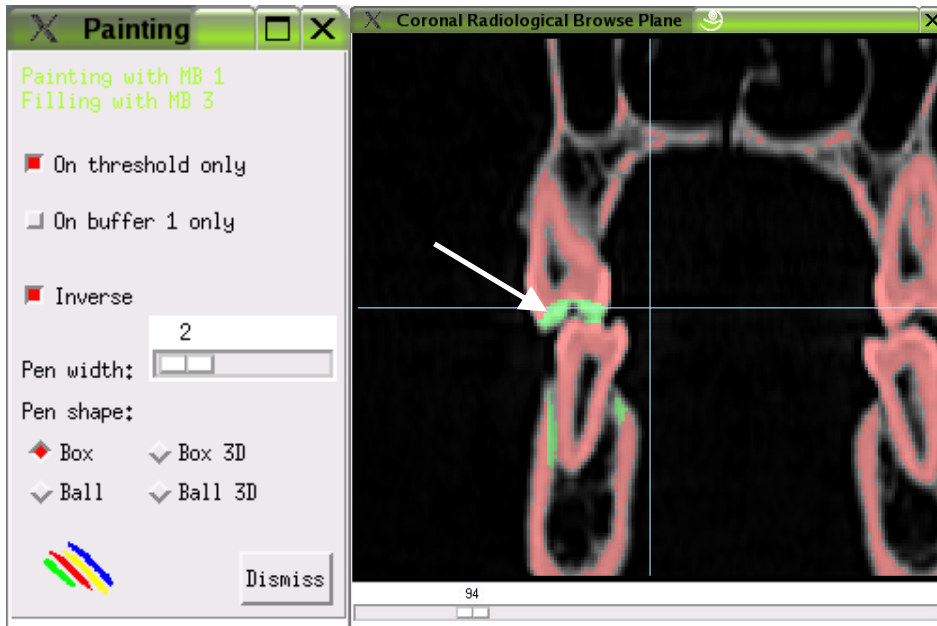


Abbildung 7 Werkzeug „Painting inverse“ (links), Objekt in der Mask isoliert (rechts)

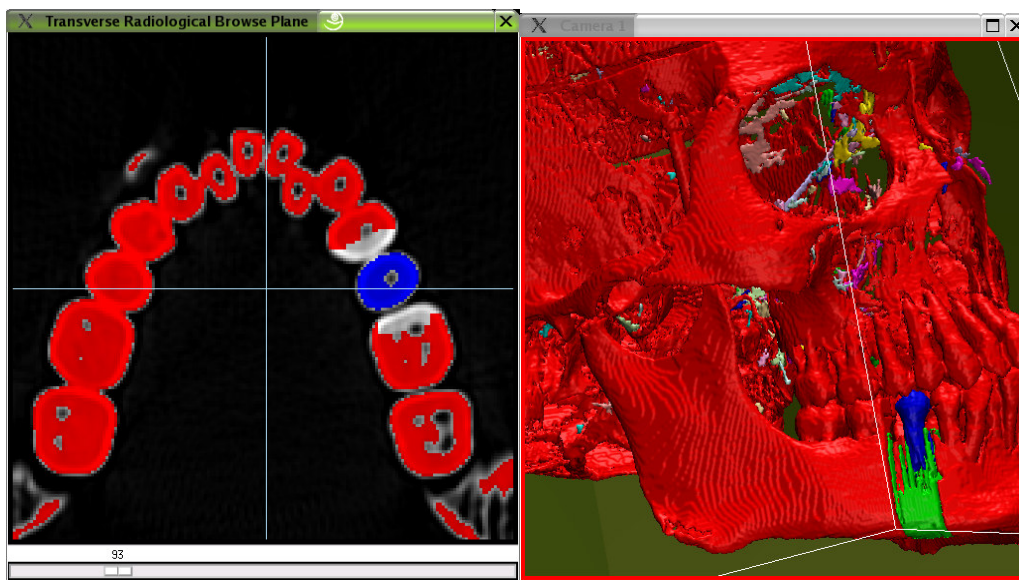


Abbildung 8 Components Analysis: Schichtbild (links), 3D-Ansicht (rechts)

Nachfolgend muss das Objekt in allen drei Raumebenen nachbearbeitet werden um eine Oberflächenglättung zu erzielen [Abbildung 9].

Vollständig segmentierte Strukturen wurden dem System definiert, mit einem Attribut wie zum Beispiel "Objekt\_1" belegt, farblich abgesetzt und gespeichert

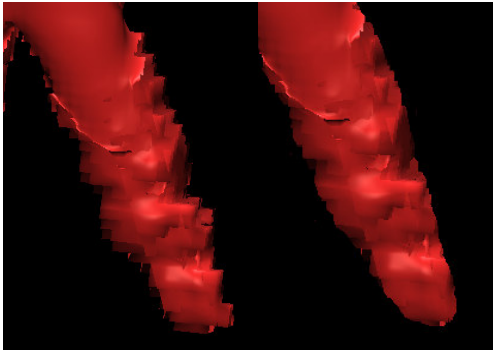


Abbildung 9 isolierte Darstellung eines Objektes nach der Markierung der korrespondierenden Voxel (links) und das Ergebnis der "Nachbearbeitung" der Objektoberfläche (rechts)

### 2.2.3 Modellierung mit „Tree-Edit“

„Tree-Edit“ ist ein Werkzeug, mit dem man Röhren in den 3-Dimensionalen Raum legen kann, die das Programm anhand von festgelegten Stützpunkten berechnet. Als Stützpunkte dienten Kugeln, die im 2-dimensionale Schichtbild positioniert werden können [Abbildung 10]. Die Kugeln wurden dann von Tree-Edit zu einer Röhre verbunden und im 3-D Bild angezeigt, wobei sich immer ein kreisförmiger Querschnitt ergibt [Abbildung 11].

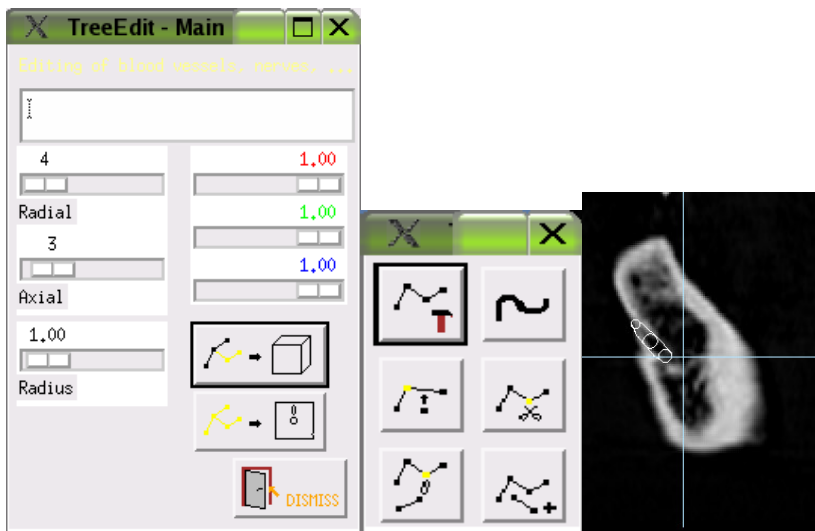


Abbildung 10 Tree Edit-Menu (links) Ausschnitt aus einem CT- Schichtbild mit Querschnitt durch den linken Unterkiefer und einem Tree Edit-Stützpunkt im Kanal des N. alveolaris inferior (rechts)

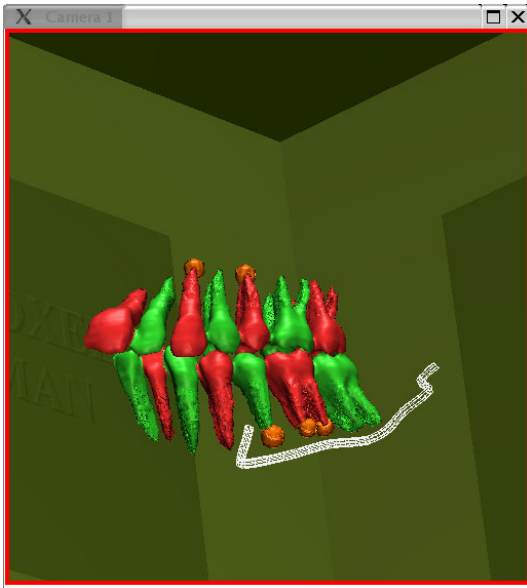


Abbildung 11 Verlauf eines mit Tree Edit programmierten Nervs im Unterkiefer

Das so konstruierte Gerüst wurde z.B. mit dem Attribut „Röhre1“ belegt und gespeichert.

Um dieses Gerüst auf die Volumenebene zu übertragen, analysierte VOXEL-MAN alle im Verlauf der Röhre liegenden Voxel und stellte diese separat dar. Anschließend konnte das abgebildete Volumen als Objekt definiert und gespeichert werden.

## 2.2.4 Strukturierung der Objekte

Zur besseren Übersicht wurde eine Datei geschrieben, die alle definierten Objekte im Simulator in eine hierarchische Struktur einordnete. Der Anwender sollte so die Möglichkeit erhalten, bei gezielter Fragestellung nur relevante Gegenstände darzustellen. Für diesen Zweck sind in das VOXEL-MAN System entsprechende Aufträge integriert. Bei Wahl der "Remove" Funktion können mit einfachem Mausklicken auf bestimmte Objekte, diese ausgeblendet werden, während ein "Add" Button jederzeit die Reintegration ermöglicht. Dabei wurden

ähnlich einem Verzeichnisbaum Hauptgruppen (z.B. Schädel, Zähne, Nerv) mit Untergruppen (z.B. Zähne des 2. Quadranten, etc) erschaffen.

### **2.2.5 Oberflächendarstellung**

Das VOXEL-MAN-Visualisierungssystem ermöglichte eine genaue Darstellung der Oberfläche des Schädels im Subvoxelbereich unter Ausnutzung des Partial-Volumen-Effekts von CT-Sequenzen [Tiede et al. 1998]. Diese Aufgabe wurde von einem im „VOXEL-MAN-Atlas“ integrierten Modul, dem sogenannten „Visualisierer“, übernommen. Es handelte sich um einen „Renderer“, der jede Kameraeinstellung vom segmentierten Objekt in eine dreidimensionale Ansicht umsetzen konnte.

Für die Bestimmung der sichtbaren Oberflächen des segmentierten Schädels wurde von einem virtuellem Betrachterstandort aus das Strahlverfolgungsverfahren (engl. Ray-Tracing oder Ray-Casting) [Foley et al. 1990] eingesetzt. Bei dieser Methode wurde für jeden Bildpunkt (engl. Pixel) des resultierenden zweidimensionalen Bildes ein Abtaststrahl entsprechend der Abbildungsgeometrie erzeugt. Für jeden Strahl mussten dann die Schnittpunkte mit der Schädeloberfläche ermittelt werden. In den Voxeln, die genau auf der Schädeloberfläche liegen, ist der Grauwert ein Mischwert aus dem Grauwert des Knochens und der Umgebung (Partial-Volumen-Effekt). Das VOXEL-MAN-Visualisierungssystem nutzte den Partial-Volumen-Effekt zur trilinearen Interpolation des Grauwerts an der jeweiligen Abtastposition im Subvoxelbereich. Dies führt zu glatten und detaillierten Oberflächen, sowohl in der visuellen, als auch in der haptischen Darstellung. Durch die Berechnung der Oberflächen im Subvoxelbereich können diese mit einer höheren Auflösung dargestellt werden, als die der Original-CT-Daten.

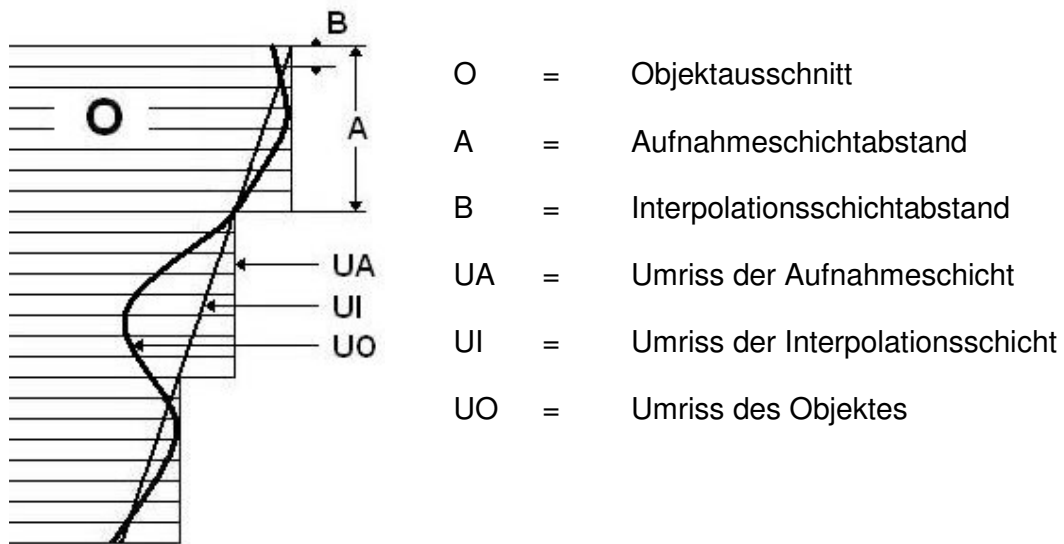


Abbildung 12 (modifiziert nach [Jalas 1992]) Die Dicke der Aufnahmeschicht gibt den Objektumriss nur ungenügend wieder. Durch Benutzung der interpolierten Schichten wird dies besser

Um die modifizierten Strukturen in dem voxelbasierten Modell ebenfalls mit großer Genauigkeit zu repräsentieren, wurde ein Algorithmus implementiert, der die durch die Werkzeuge herausgeschnittenen Bereiche in einem zusätzlichen Volumen subvoxelgenau ablegt.

Da auch die Oberflächennormale an der Schnittstelle mit Hilfe des Grauwertgradienten im Subvoxelbereich ermittelt werden konnte, ließ sich die Schädeloberfläche mit dem Phong'schen Beleuchtungsmodell in photorealistischer Qualität darstellen.



Abbildung 13: stereoskopische Darstellung mit Shutterbrillen

### 2.2.6 Hardware des Simulators

Zur Wiedergabe der Simulationssoftware muss das Computersystem mehreren parallel laufenden Anwendungen, wie der Kollisionserkennung und der simultanen Modellberechnung, gerecht werden können. Dafür eignen sich in erster Linie Doppelprozessorsysteme oder alternativ moderne Personalcomputer auf Basis der „HyperThreading-Technologie“ (HT). Deshalb dient ein Compaq SP750 mit zwei Pentium III-Prozessoren (Xeon 866 MHz) und 2 GB Hauptspeicher als Hardware für die virtuelle Wurzelspitzenresektion. In Kombination mit einem Krafrückkopplungsgerät wird bei 26 Kollisionspunkten auf dem Werkzeug eine haptische Updaterate von 6 kHz erreicht. Auch das visuelle Update der modifizierten Region geschieht mit einer mittleren Frequenz von 8 Hz. Somit ist eine interaktive Benutzung sichergestellt. Durch eine stereoskopische Darstellung mit Shutterbrillen ("E-D Wireless" von eDimensional, USA) [Abbildung 13, Abbildung 14] wird die räumliche Wahrnehmung weiter verbessert. Diese patentierten stereoskopischen 3D-Brillen sind derzeit die einzige Möglichkeit, um plastische dreidimensionale

Grafik auch auf einem zweidimensionalen Monitor mit unverfälschten Farben darzustellen. Möglich wird dies durch den schnellen Wechsel zweier leicht unterschiedlicher Ansichten und der wechselseitigen Abdeckung eines der beiden Augen.



*Abbildung 14: Shutterbrille zur stereoskopischen Betrachtung dreidimensionaler Modelle.  
Quelle der Abbildung ist die Herstellerseite "E-D Wireless" von eDimensional, USA:  
<https://edimensional.com/>.*

Der Aufbau des Simulators zur virtuellen Wurzelspitzenresektion ist für einen realitätsnahen Eindruck der Operation optimiert. Im Gesichtsfeld des Probanden befindet sich ein Spiegel. Dieser reflektiert das in sich gespiegelte und auf dem Kopf stehende Bild eines Monitors. Der virtuelle Schädel kommt dadurch wie in einer realen Behandlungssituation horizontal vor dem Probanden zu liegen. Der Monitor wird von einer Rahmenkonstruktion in Position gehalten und ist mit einem Computersystem verbunden, das die Simulationssoftware wiedergibt. Hinter dem Spiegel führt die Testperson den Arm des Krafrückkopplungsgerätes zur Interaktion mit dem Modell. Dabei visualisiert der Proband neben dem dreidimensionalen Modell auch das virtuelle Werkzeug, ohne das Krafrückkopplungssystem (hinter dem Spiegel) zu sehen [Abbildung 15].





*Abbildung 15: Aufbau des Simulators zur virtuellen Wurzelspitzenresektion. Der Spiegel im Gesichtsfeld des Probanden reflektiert das Bild eines Monitors. Dieser ist mit einem Computersystem verbunden, das die VOXEL-MAN Simulationssoftware wiedergibt. Durch eine Rahmenkonstruktion werden alle Komponenten räumlich so positioniert, dass der Proband das Krafrückkopplungsgerät hinter dem Spiegel nicht sieht. Alle Bewegungen des Krafrückkopplungsgerätes werden auf die Lage eines virtuellen Werkzeugs übertragen. Dies ermöglicht dem Probanden die gezielte Interaktion mit dem virtuellen Modell*

### **2.2.7 Haptisches Rendering**

Für die Kollisionserkennung mit den Werkzeugen arbeitet VOXEL-MAN mit Subvoxel-Genauigkeit. Bei dem Verfahren werden mehrere Oberflächenpunkte eines Werkzeuges auf Kollision geprüft. Wenn es zur Kollision kommt, wird für jeden Kollisionspunkt ein Vektor bestimmt, der zu einer kollisionsfreien Stelle führt [Abbildung 16]. Der Mittelwert aller gefundenen Kollisionsvektoren führt zu einer kollisionsfreien Position für das gesamte Werkzeug. Die letzte

kollisionsfreie Position für das Werkzeug wird dabei jeweils als sogenannter Proxy gespeichert, um für solche Positionen eine Rückstellkraft berechnen zu können, an denen sich das Werkzeug tiefer innerhalb einer Struktur befindet. An solchen Stellen können dann für die meisten Oberflächenpunkte keine kollisionsfreien Stellen mehr gefunden werden. Dies tritt insbesondere bei der Benutzung sehr kleiner Werkzeuge häufig auf. Der Proxy erlaubt es, durch Suche zwischen Werkzeug und Proxy zu einer Position zu kommen, wo die Kollisionskraft durch den oben beschriebenen Algorithmus wieder berechnet werden kann.

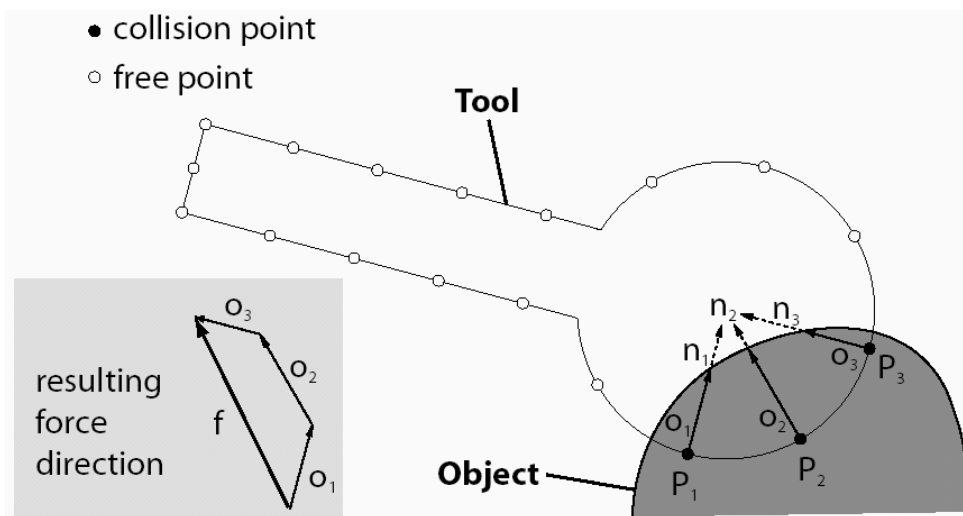


Abbildung 16: Die drei Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  kollidieren mit dem Szenenobjekt. Entlang der Vektoren  $n_i$  wird die Oberfläche des Szenenobjektes gesucht. Die Addition der gefundenen Vektoren  $o_i$  ergibt den Vektor  $f$ , der in Richtung der kollisionsfreien Position zeigt.

## 2.2.8 Berechnung der Kräfte während der Volumenmodifikation

Die Handbewegung des Benutzers mit dem Krafrückkopplungsgerät wird auf das Voxelvolumen transformiert [Abbildung 17].

Um während des Fräsvorganges eine realistische Kraft zu berechnen, werden mehrere Parameter berücksichtigt:

- Je größer die Bohrgeschwindigkeit, desto größer die Bohrkraft
- Je mehr Material entfernt wird, desto größer die Bohrkraft

- Die Richtung der Bohrkraft ist abhängig von der Position des entfernten Materials und der Bewegungsrichtung des Werkzeuges

Zusätzlich wird durch das Aufmodulieren von Schwingungen auf die Bohrkraft, das Gefühl des echten Bohrens imitiert. Im Austausch zwischen Informatiker und Chirurg wurden die Parameter für die Kraftberechnung solange optimiert, bis ein realistischer Eindruck während der Simulation erreicht ist.

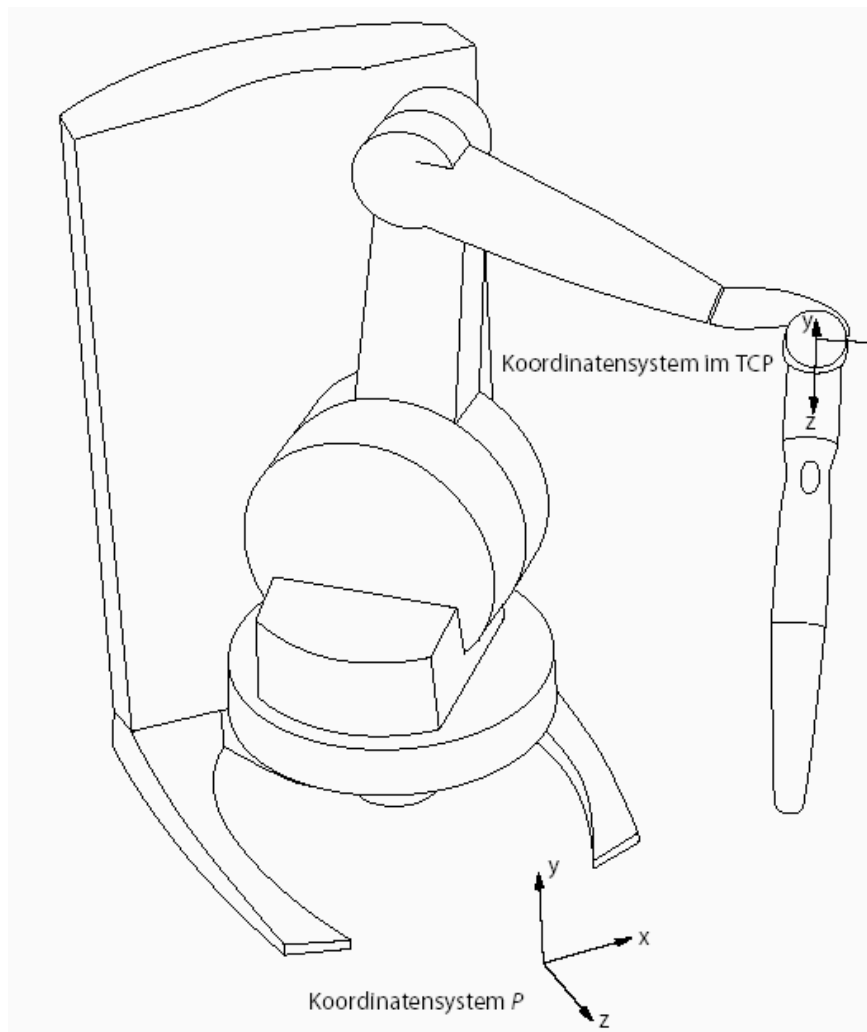


Abbildung 17: Das Koordinatensystem des verwendeten Krafrückkopplungsgerätes

## 3 Ergebnisse

### 3.1 3D-Schädelmodell

Als Grundlage für den WSR-Simulator konnte ein realistisch wirkendes 3D-Schädelmodell erstellt werden. Dieses enthielt neben dem Schädelknochen die Zähne einer Kieferhälfte (Zahn 21-27, Zahn31-37), den linken N. alveolaris inferior und künstlich modellierte Granulome als isoliert segmentierte Objekte [Heiland, Sternberg-G. et al. 2004, Heiland et al. 2004].

#### 3.1.1 Segmentierte Objekte

Der Schädel als ganzes konnte einschließlich der an ihm angebrachten Metallelemente mittels automatischer Segmentation von der Umgebung isoliert werden [Kapitel 2.2.2.1]. Als optimaler Schwellwert für die Oberflächendarstellung hat sich der Wert  $-390$  herausgestellt [Abbildung 18].

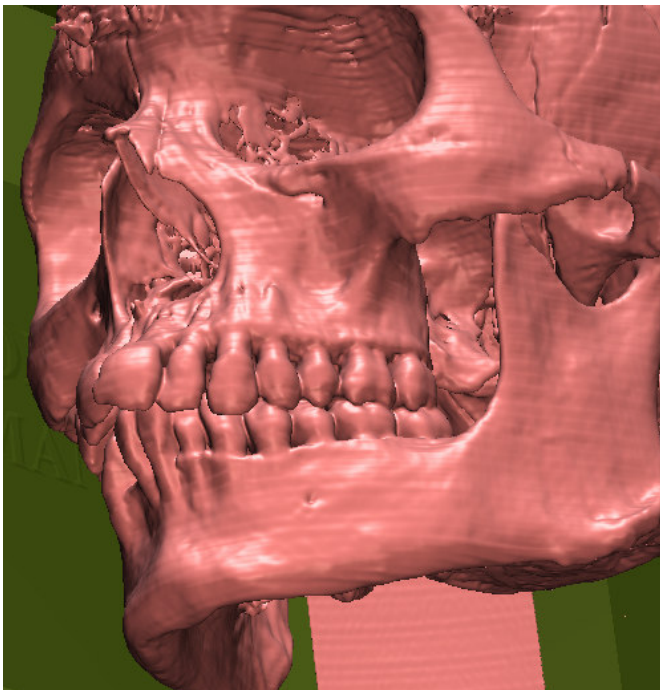
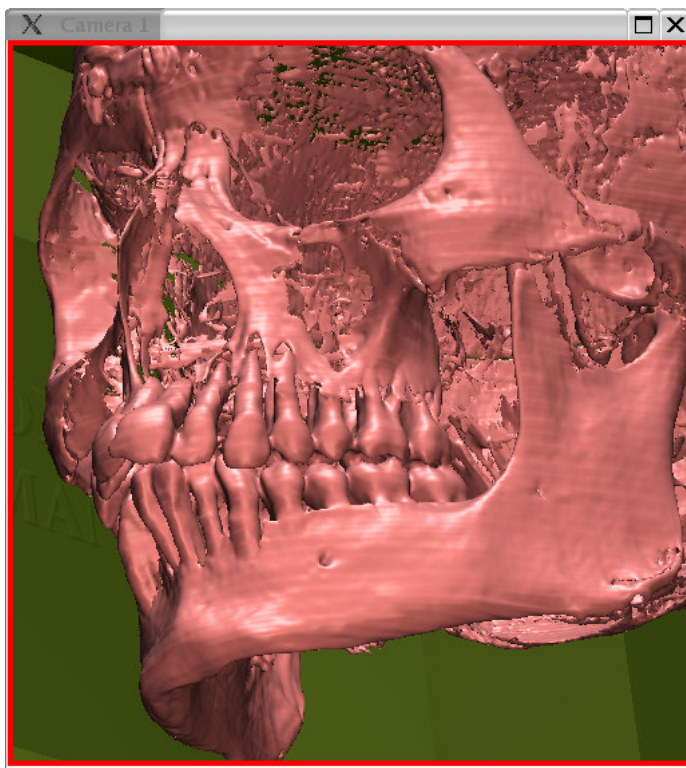


Abbildung 18 Oberflächendarstellung der aus dem CT-Datensatz segmentierten Schädelknochen

Wird ein niedrigerer Wert gewählt als  $-390$ , werden auch Voxel außerhalb des Knochens, die eigentlich schon zur Umgebung gehören als Schädel definiert. Dadurch wird die Oberfläche verschwommen und ist verstärkt von Artefakten überzogen. Wird ein höherer Wert definiert als der optimale Schwellwert von  $-390$ , werden Voxel die eigentlich noch zum Knochen oder zu den Zähnen gehören als leerer Raum definiert. Dadurch macht die Oberfläche einen erodierten Eindruck. Dünne Knochenstrukturen, z.B. der Alveolarknochen über Zähnen, werden nicht vollständig abgebildet. Die Oberflächen erscheinen rau und weisen Unterbrechungen auf [Abbildung 19].



*Abbildung 19 Schwellwert zu groß, Unterbrechungen in der Oberfläche*

Die Metallelemente konnten einfach über manuelle Segmentation [Kapitel 2.2.2.2] vom Schädel getrennt werden, da Sie nur wenige Berührungspunkte mit dem Schädel aufwiesen.

Der Versuch einer automatischen Segmentation der Zähne ist fehlgeschlagen. Die Segmentation mit Histogramm wie beim Schädel war bei den Zähnen nicht möglich, da kein Schwellwert ermittelt werden konnte, der die Zähne eindeutig vom

Schädelknochen trennt. Der Grund hierfür lag im ungleichen Verhältnis zwischen der Parodontalspaltbreite (ca. 0,2mm) und Voxelgröße (1 mm<sup>3</sup>). Die Voxel waren zu groß um am Übergang vom Schädel zum Zahn eine klare Grenze in den Grauwerten zu erhalten. Infolgedessen war die Segmentierung der Zähne von Hand erforderlich.

An den Zähnen 23, 25, 36 und 35 wurden im 3D-Datensatz apikale Granulome als „virtuelle Pathologien“ mittels manueller Segmentierung modelliert [Abbildung 20]. Bei den meisten Wurzelspitzenresektionen ist die zu resezierende Wurzelspitze von entzündetem Gewebe umgeben. Dieser Zustand konnte durch die virtuellen Granulome gut simuliert werden.



Abbildung 20: apikale Granulome an Zahn 23, 25, 36 und 35

Der Nervus alveolaris inferior war auf den CT-Bildern streckenweise nicht nachvollziehbar, so dass eine manuelle Segmentierung nicht möglich war. Mit dem Werkzeug „Tree Edit“ [Kapitel 2.2.3] war eine Darstellung möglich, da die nicht sichtbaren Bereiche durch das Programm interpoliert wurden [Abbildung 20].

### 3.2 Wurzelspitzenresektion

Am Beispiel von Wurzelspitzenresektionen konnte gezeigt werden, dass dieses virtuelle Computermodell zur Simulation dentoalveolärer Eingriffe sehr gut geeignet ist. An den Zähnen 23, 25, 35, 36 konnte die Wurzelspitzenresektion erfolgreich trainiert werden.

Mit dem verwendeten Handstück des Simulators war es möglich, das komplexe Schädelmodell visuell und haptisch zu "begreifen" und mit diesem Modell bohrend und fräsend zu interagieren. Dabei konnten die Objekte beliebig gedreht, und die Ansicht vergrößert werden. Die hohe Genauigkeit und Auflösung wurde durch die subvoxelgenaue Bestimmung der Strukturoberflächen erreicht. Da die Bohroperationen ebenfalls subvoxelgenau modelliert wurden, war sehr genaues Arbeiten auch mit sehr kleinen Werkzeugen möglich. Das haptische Gefühl war aufgrund der speziellen Kollisionserkennung, der Berücksichtigung wichtiger Parameter des Bohrvorgangs und des Aufmodulierens von Bohrgeräuschen auf das Werkzeug sehr überzeugend. Der räumliche Aufbau des Systems ermöglichte es, dort mit der Hand zu arbeiten, wo das virtuelle Bild gesehen wurde. Dabei war es möglich, dass das Bild von mehreren Personen gleichzeitig gesehen wurde, was beispielsweise Dozent/Student-Interaktionen ermöglichte.

### **3.2.1 Zahn 23**

Abbildung 21 zeigt den Ablauf einer virtuellen Wurzelspitzenresektion des Zahnes 23. Die Wurzelspitze wurde aufgesucht und das Granulom mit dem Kürzen der Wurzelspitzen entfernt.

Durch die postoperative Rekonstruktion beliebiger Schnittebenen ist eine mehrdimensionale Kontrolle der durchgeführten Bohrvorgänge möglich [Abbildung 22; Abbildung 23].

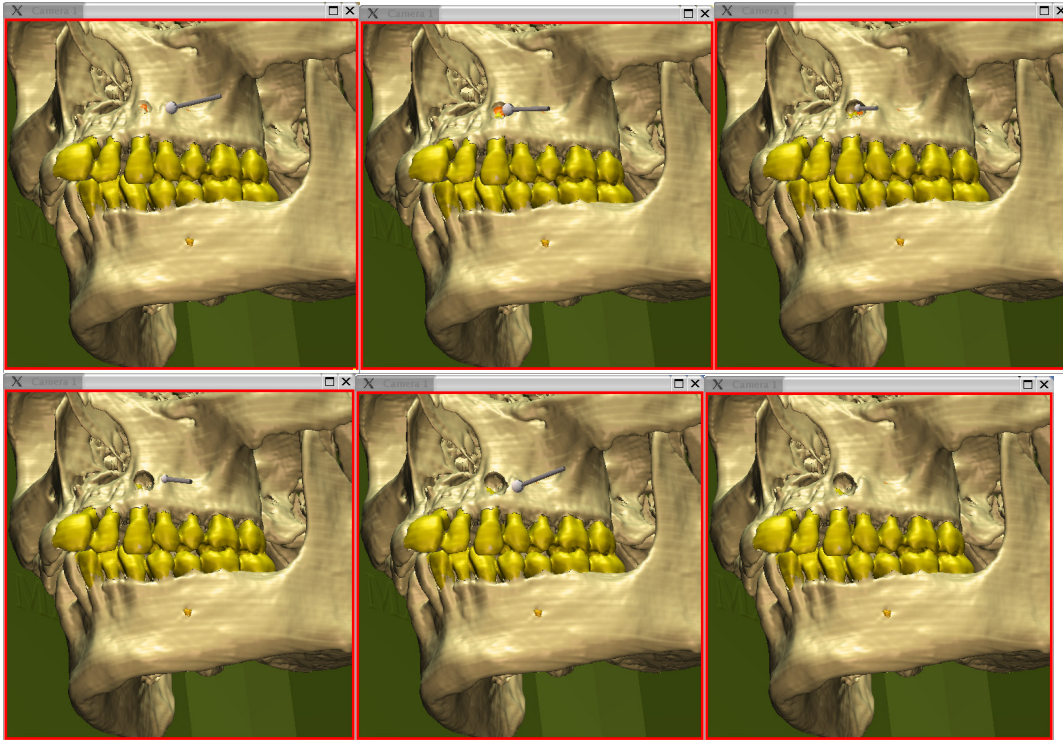


Abbildung 21: Ablauf der WSR an Zahn 23

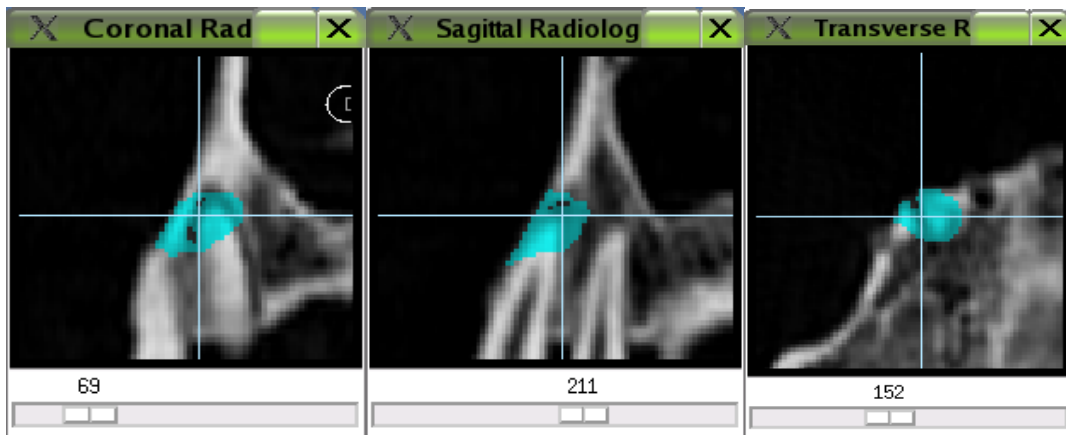


Abbildung 22: Resektionshöhle in Schichtbildern: coronal, sagital, axial, in blau ist der abgetragene Knochen markiert



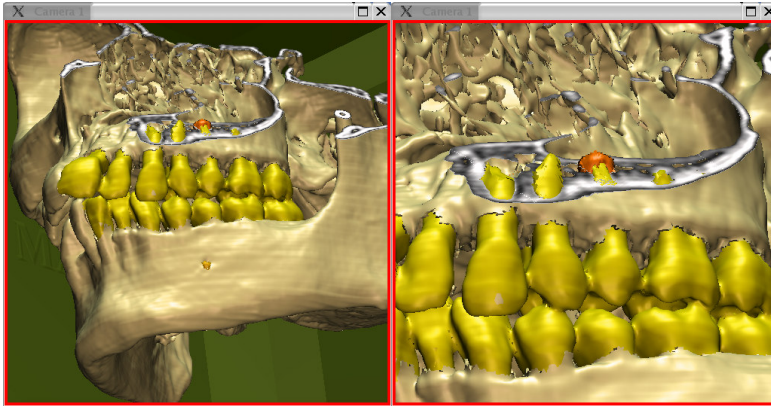


Abbildung 23: Kombination von Schichtbild und 3D-Bild

### 3.2.2 Zahn 25

In der Abbildung 24 ist die virtuelle Wurzelspitzenresektion an Zahn 25 dargestellt. Durch die anatomische Nähe zur Kieferhöhle ist hier die Gefahr groß, diese unnötig zu eröffnen.

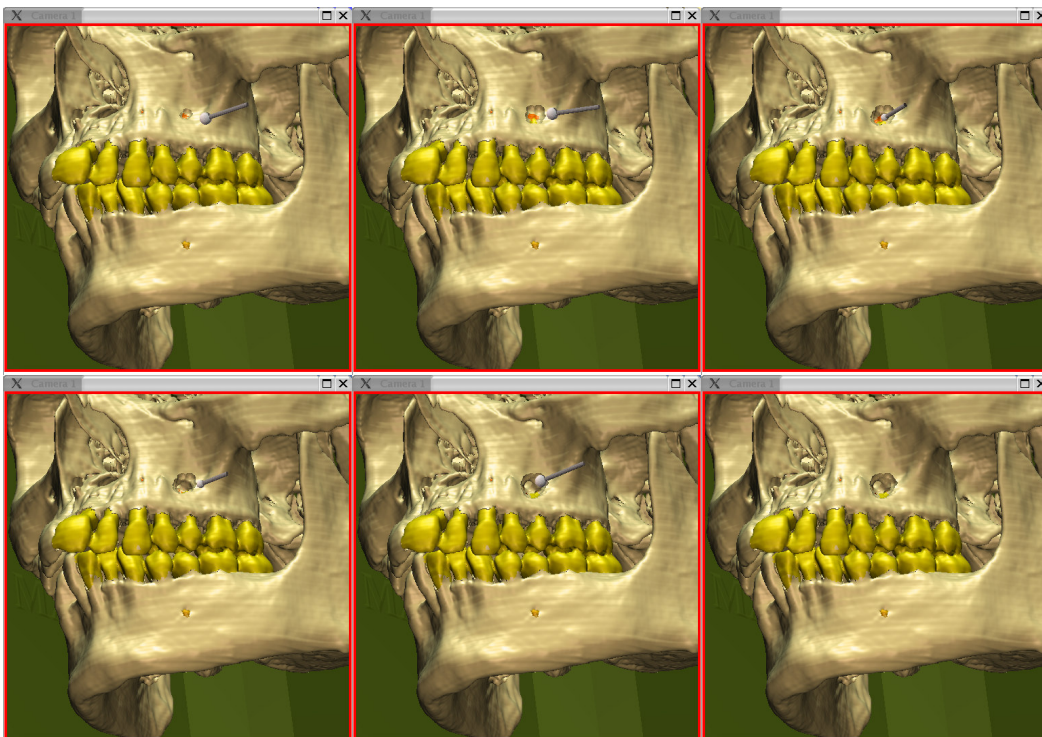


Abbildung 24: Ablauf der WSR an Zahn 25

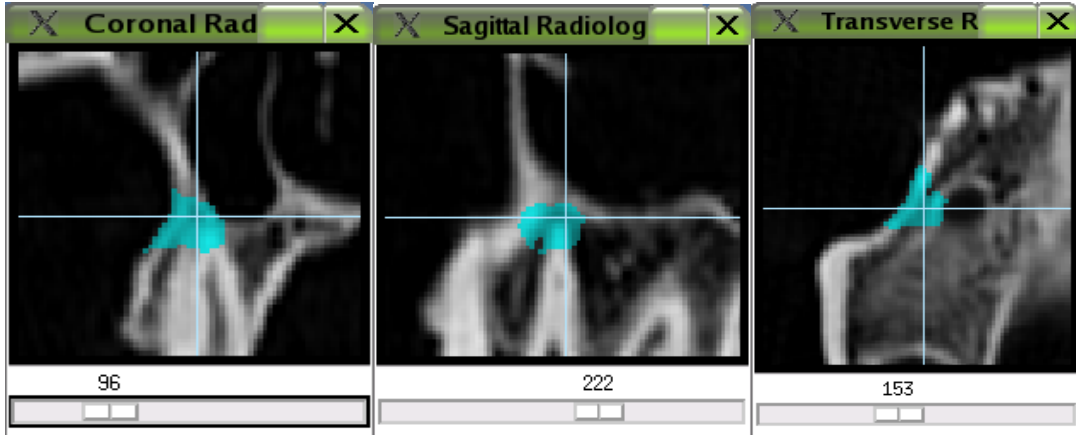


Abbildung 25: Resektionshöhle in Schichtbildern: coronal, sagital, axial

Die postoperative Rekonstruktion in coronarer, sagitaler und axialer Ebene [Abbildung 25] stellt den geringen Abstand der Knochenkavität zur Kieferhöhle deutlich dar. In der kombinierten Darstellung von Schichtbild und 3D-Bild lässt sich die räumliche Beziehung der Strukturen besonders gut nachvollziehen [Abbildung 26].

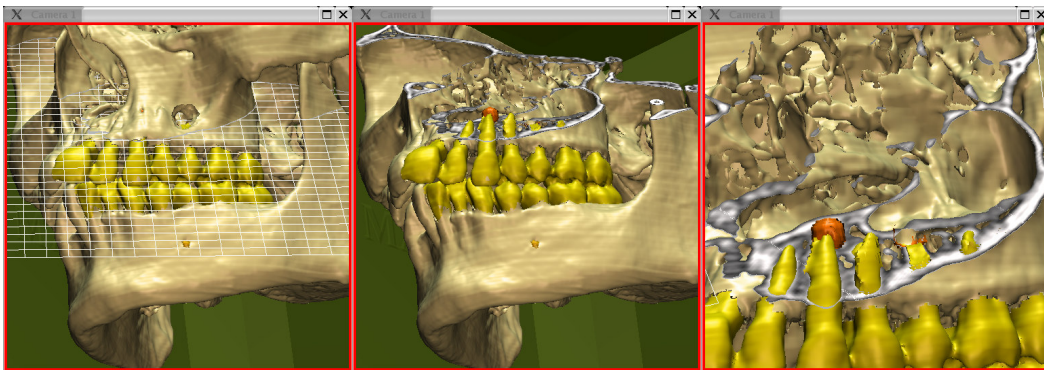


Abbildung 26: Kombination von Schichtbild und 3D-Bild

### 3.2.3 Zahn 35

Abbildung 27 zeigt den Ablauf einer virtuellen Wurzelspitzenresektion des Zahnes 35. Hier muss insbesondere die Nähe zum Nervus alveolaris inferior berücksichtigt werden, und eine sehr sorgfältige Präparation ist erforderlich, um den Nerven nicht zu verletzen.

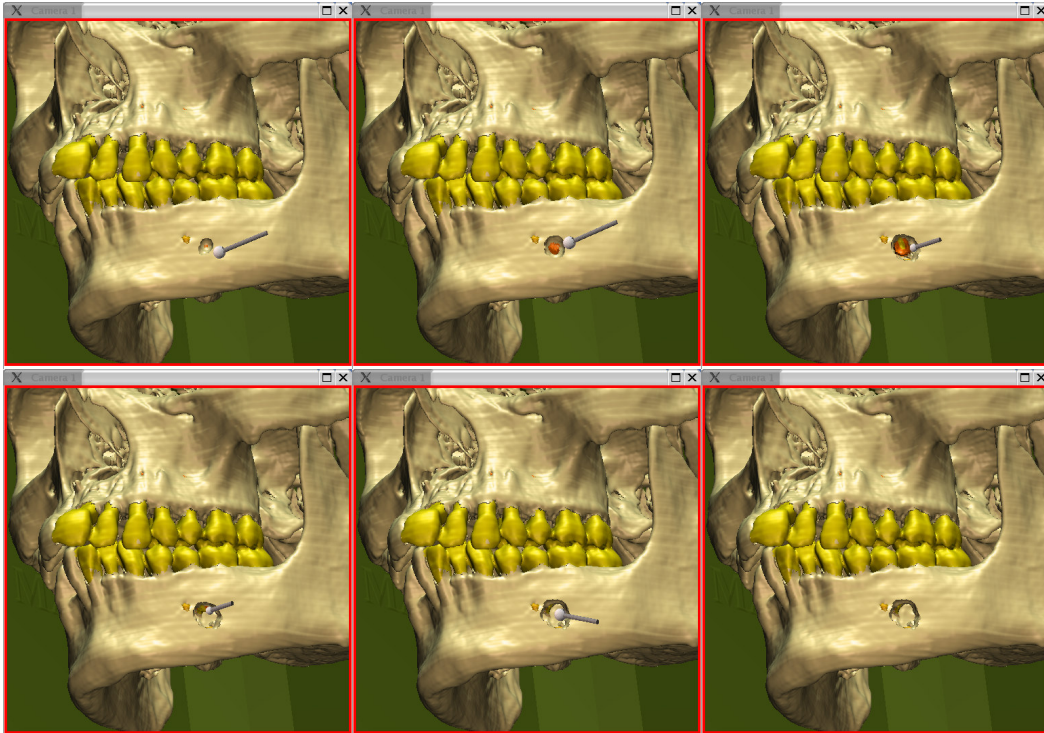


Abbildung 27: Ablauf der WSR an Zahn 35

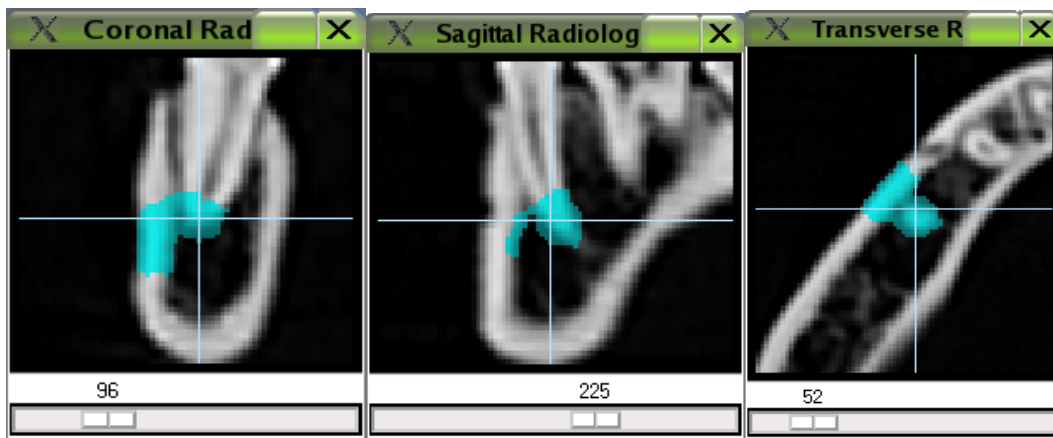


Abbildung 28: Resektionshöhle in Schichtbildern: coronal, sagital, axial

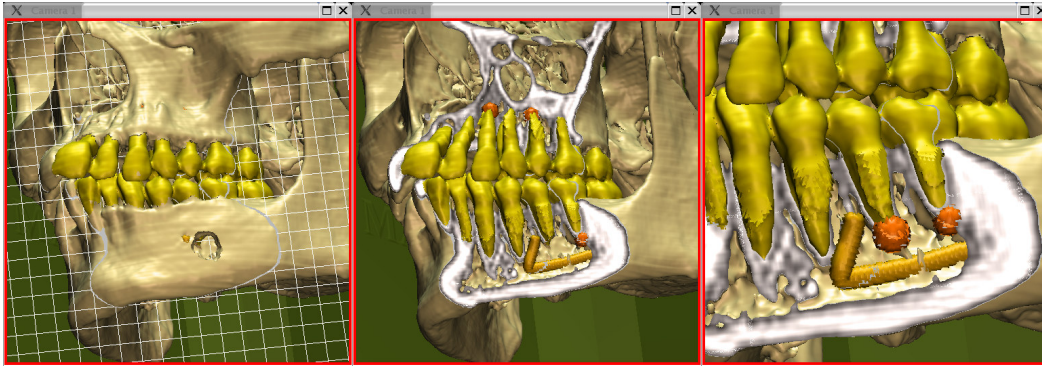


Abbildung 29: Kombination von Schichtbild und 3D-Bild

In der postoperativen Rekonstruktion kann der anatomische Bezug der Kavität zum Nerven genau dargestellt werden [Abbildung 28; Abbildung 29]. Insbesondere kann das Umschwenken des Nerven nach kranial und distal kurz vor dem Austritt aus dem Foramen mentale veranschaulicht werden.

### 3.2.4 Zahn 36

Am Zahn 36 wurde exemplarisch der Verlauf einer Wurzelspitzenresektion an einem zweiwurzeligem Unterkiefermolaren dargestellt [Abbildung 30]. Die mesiale und distale Wurzelspitze wurden aufgesucht und die Granulome mit Kürzen der Wurzelspitzen entfernt. Bei Unterkiefermolaren ist das Auffinden der Wurzelspitzen aufgrund der dicken Knochenschicht über den Wurzeln deutlich erschwert, was sich besonders gut auf der kombinierten Darstellung [Abbildung 32] nachvollziehen lässt. Hier ist aufgrund der schlechteren Orientierung in der Tiefe der Kavität auch die Gefahr groß, eine Nachbarwurzel zu verletzen. Auch der Nervus alveolaris inferior ist bei diesem Eingriff wieder gefährdet. Der Abstand zwischen Wurzelspitze und Nerv ist zwar größer als beim Zahn 35, aber der Vorteil wird wiederum durch die Tiefe der Kavität relativiert.

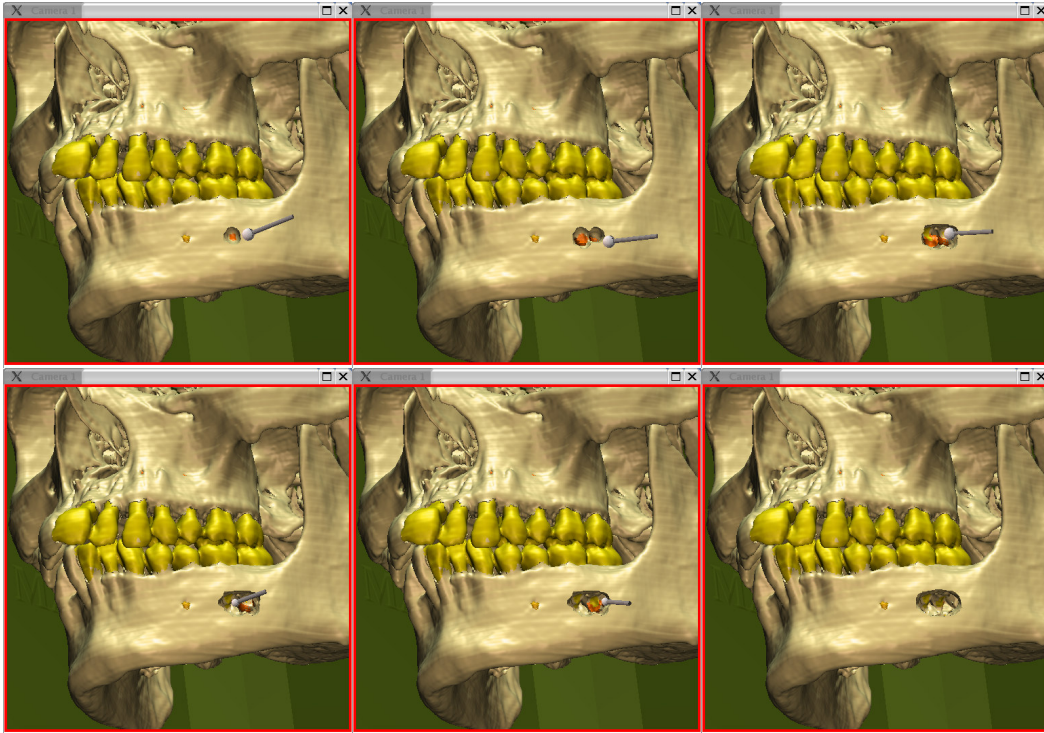


Abbildung 30: Ablauf der WSR an Zahn 35

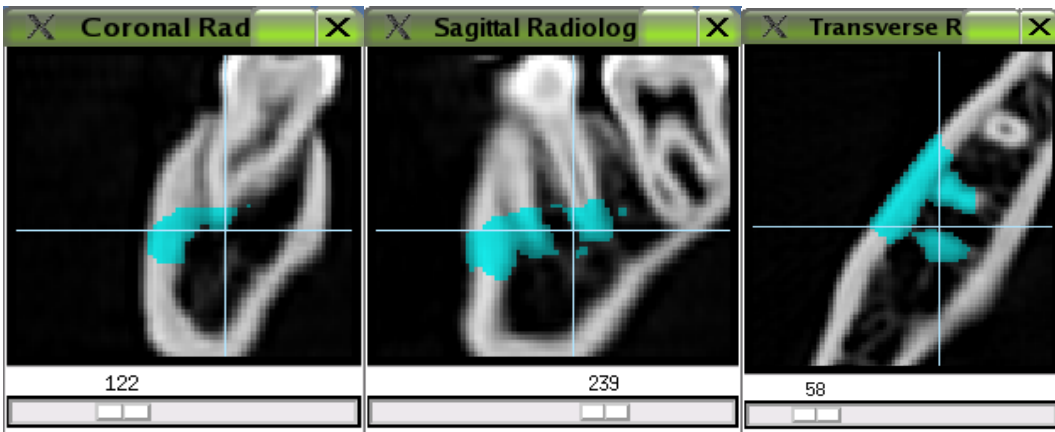


Abbildung 31: Resektionshöhle in Schichtbildern: coronal, sagital, axial

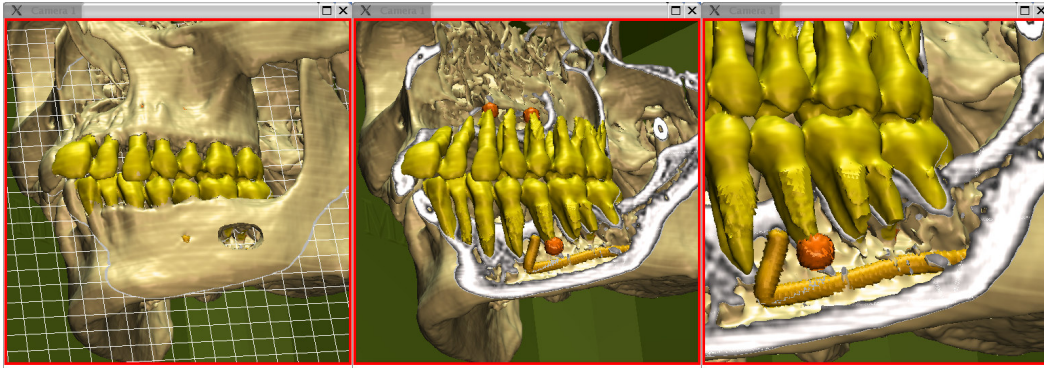


Abbildung 32: Kombination von Schichtbild und 3D-Bild

### 3.3 Osteotomie

Bei der Anwendung des Simulators hat sich herausgestellt, dass ohne weitere Modifikation auch eine Osteotomie an Zähnen trainiert werden kann.

#### 3.3.1 Zahn 24

Am ersten oberen Prämolaren wurde exemplarisch eine Osteotomie an einem einwurzeligem Zahn durchgeführt. Dabei wurde wie für eine Zahnentfernung üblich der obere und vestibuläre Anteil Der Zahnwurzel dargestellt. Distal und mesial wurde der Zahn für einen möglichen Hebelansatz dargestellt [Abbildung 33]. In der postoperativen Rekonstruktion beliebiger Schnittebenen lässt sich die Osteotomie gut beurteilen [Abbildung 34].

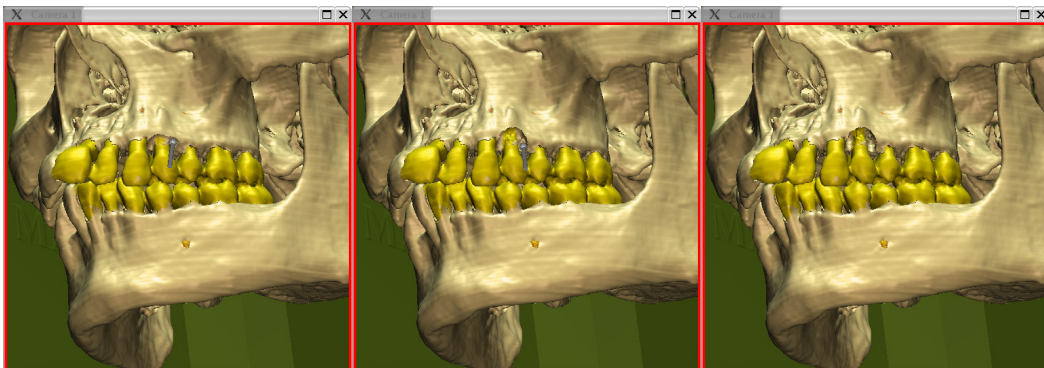


Abbildung 33: Osteotomie an Zahn 24

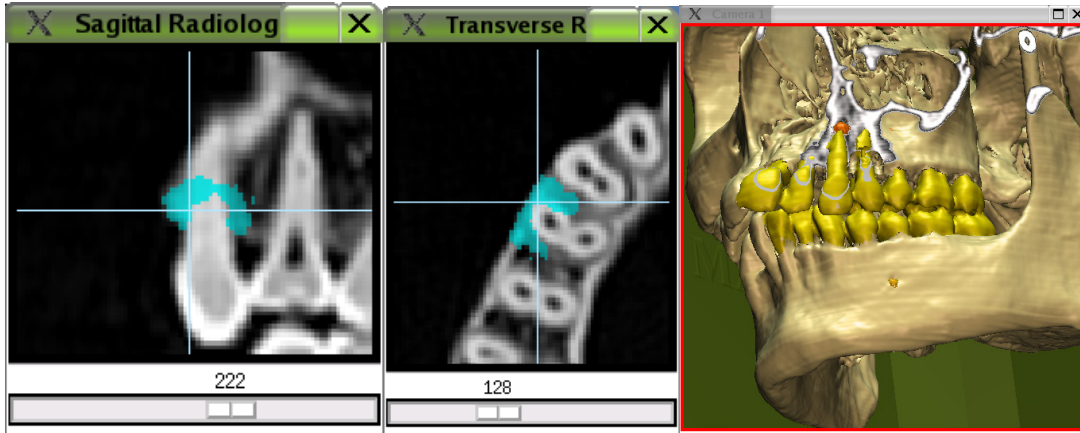


Abbildung 34: coronare und axiale Schnittenebene, Kombination 3D-Bild und Schichtebene

### 3.3.2 Zahn 37

Am Zahn 37 wurde exemplarisch eine Osteotomie an einem Molaren durchgeführt [Abbildung 35].

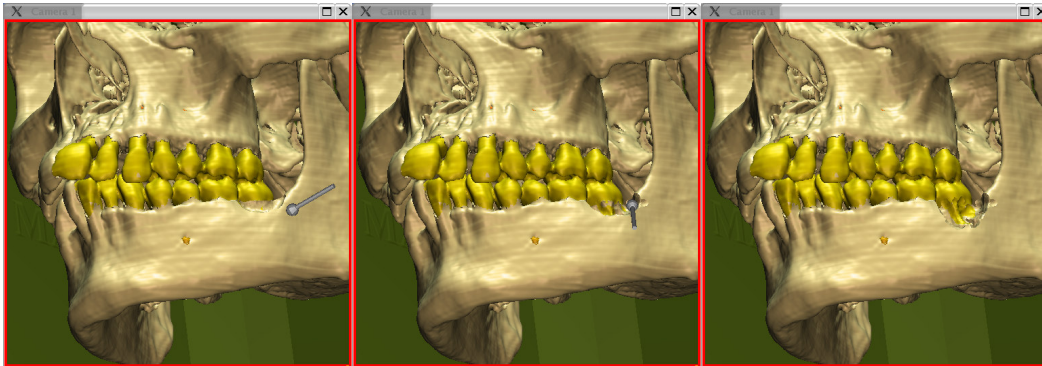


Abbildung 35: Osteotomie an Zahn 37

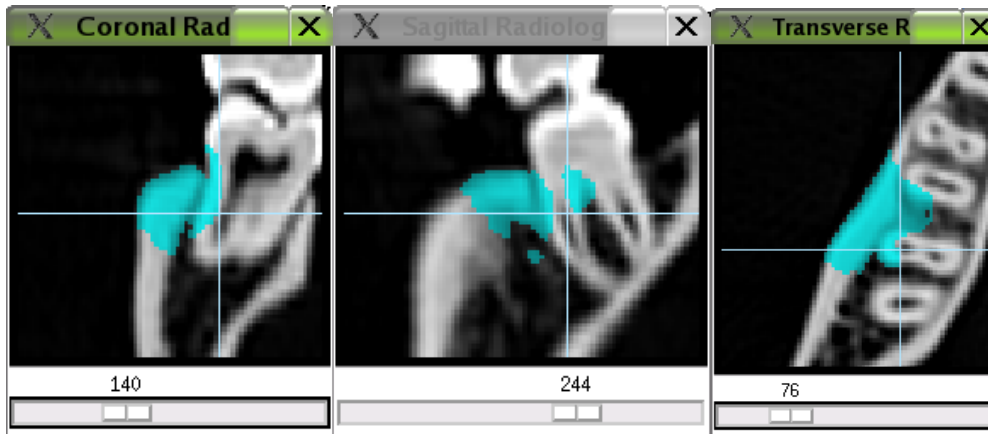


Abbildung 36 coronare, sagittale und axiale Schnittebene

### 3.4 Kieferhöhlenoperation

Auch eine Fensterung der Kieferhöhle lässt sich an dem ursprünglich für die Wurzelspitzenresektion entwickeltem Modell trainieren [Abbildung 37]. Besonders bei der Kieferhöhle ist die Kombination von 3D-Bild und Schichtbild besonders anschaulich [Abbildung 39].

Es hat sich damit herausgestellt, dass das Modell mehr Einsatzmöglichkeiten bietet, als ursprünglich erwartet.



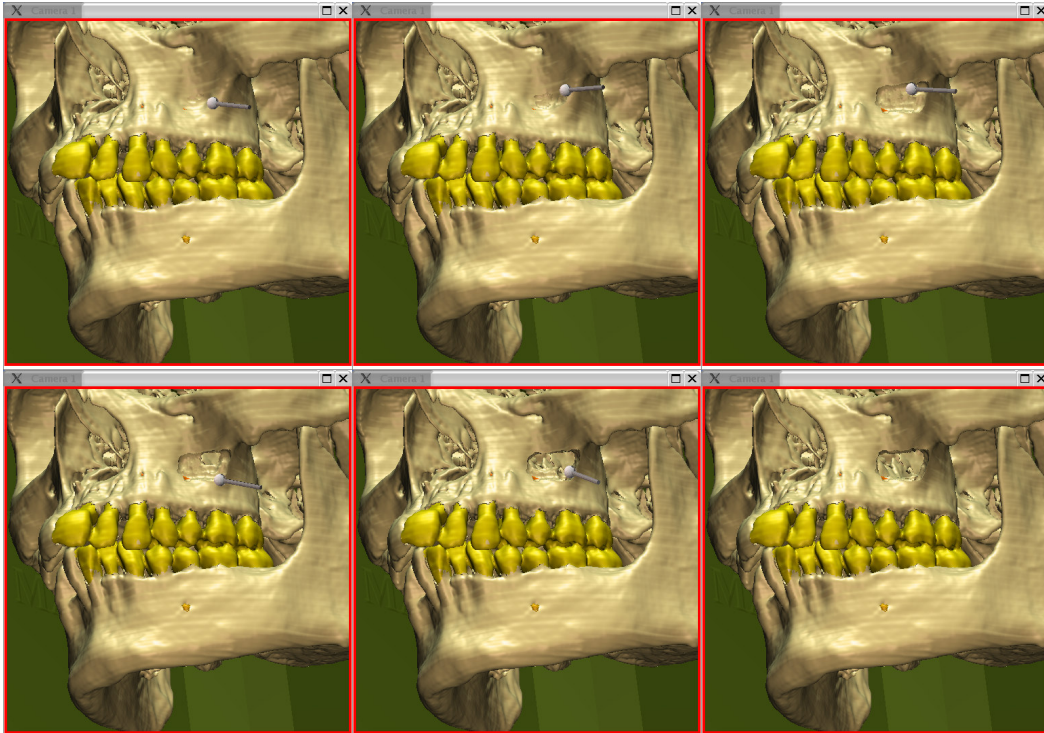


Abbildung 37: Fensterung der linken Kieferhöhle

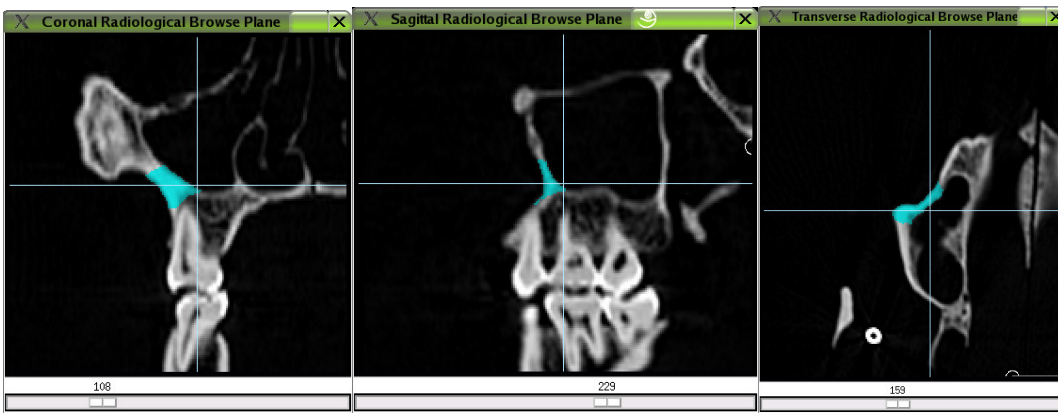


Abbildung 38: coronare, sagittale und axiale Schnittebene

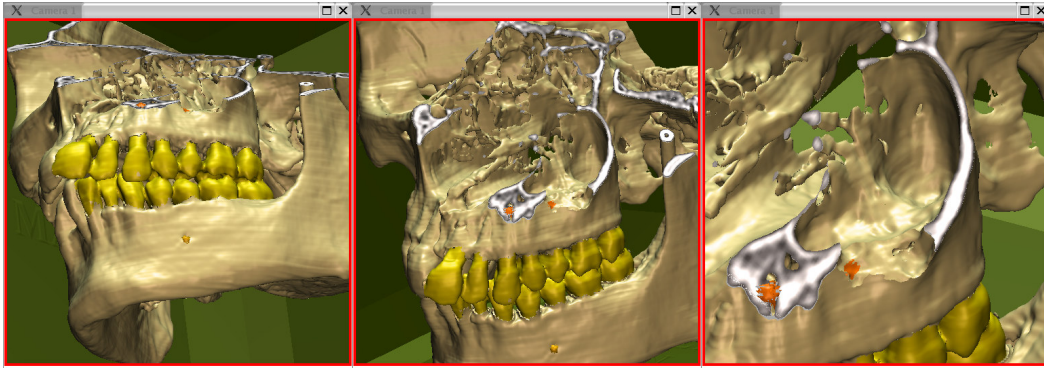


Abbildung 39: Kombination von Schichtbild und 3D-Bild

## 4 Diskussion

### 4.1 Training chirurgischer Eingriffe

Das hier vorgestellte System erlaubt eine sehr realistische bohrende und fräsende Interaktion mit beliebig komplexen anatomischen Modellen, was in der Zahn-, Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie am Beispiel der Wurzelspitzenresektion gezeigt werden konnte. Es hat sich herausgestellt, dass das Modell mehr Einsatzmöglichkeiten bietet, als ursprünglich erwartet. Auch eine Osteotomie zur Zahnentfernung und Fensterung der Kieferhöhle konnten trainiert werden, ohne das weitere Modifikation am Modell vorgenommen werden mussten. Insbesondere für die Vermittlung von anatomischen Gegebenheiten und topographischen Beziehungen kann es sehr gut eingesetzt werden. Hierbei kann die Kombination aus stereoskopischer visueller Darstellung und Interaktion operative Eingriffe aus der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie realistisch simulieren. Durch die Arbeit an diesem jederzeit und unbegrenzt verfügbarem "Präparat" kann der angehende Chirurg oder Student Landmarken und empfindliche Bereiche wie z.B. Nervenstränge durch eigene Präparation inspizieren. Unterschiedliche Zugangswege können beliebig trainiert werden. Der Simulator stellt daher eine ideale Ergänzung zu den heutzutage immer seltener durchgeführten Übungen an realen Präparaten dar. Grundsätzlich ist es möglich, durch das Einfügen virtueller Pathologien in vorhandene Bilddaten verschiedenartige operative Procedures zu simulieren.

Auch in anderen Fachbereichen werden Operationssimulatoren, die das Echtzeit-Training von chirurgischen Eingriffen ermöglichen, erfolgreich eingesetzt. So eignet sich das Softwaresystem „ROBO-SIM“ zur Simulation minimalinvasiver neurochirurgischer Eingriffe [Radetzky et al. 2000]. Ein weiteres Trainingssystem ist der „Virtual-Reality-Arthroskopie-Trainingssimulator“ (VRATS) [Muller et al. 2000], eine dreidimensionale Darstellung des Kniegelenkes. „The Blue DRAGON“ ist ein experimentelles

dreidimensionales Modell eines Schweins und eignet sich zur Simulation laparoskopischer Eingriffe [Rosen et al. 2006]. Zur Übung von derartigen Eingriffen am Menschen dient der „Minimally Invasive Surgical Trainer – Virtual Reality“ (MIST-VR) [Hackethal et al. 2006]. Ein sich in der Testphase befindliches System ist die „Virtual-Reality-Educational-Surgical-Tools“ (VREST). Es handelt sich hierbei um einen Simulator zur Übung der Operation einer Inguinalhernie nach Lichtenstein [Sanders et al. 2006].

## **4.2 Wurzelspitzenresektion**

Wir haben als erste Anwendung des Voxelman-Simulators für die Zahn-, Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie die Simulation der Wurzelspitzenresektion gewählt, da es sich um einen der am häufigsten in der zahnärztlichen Praxis durchgeführten Eingriffe handelt [Nowak 2003]. Nachdem bereits eine Simulation für die Felsenbeinchirurgie erfolgreich implementiert wurde [Leuwer et al. 2001], konnte mit den gleichen Instrumentensatz (Kugelfräsen) auch die Wurzelspitzenresektion realisiert werden.

Auf der mit dem CT-Datensatz eines knöchernen Schädels erstellten Simulation sollen angehende Chirurgen und Zahnmedizinstudenten die Wurzelspitzenresektion üben. Mit einem virtuellen Rosenbohrer verschafft sich der Chirurg im simuliertem Kieferknochen einen Zugang zur Wurzelspitze. Die Zahnwurzel wird dann gekürzt. Mit dem Modell kann so das Auffinden der Wurzelspitze geübt werden, ohne unnötig viel vom Kieferknochen entfernen zu müssen und ohne den Nachbarzahn zu verletzen. Der N. alveolaris inferior muss im Unterkiefer geschont werden. Der Abstand der Wurzelspitze eines Prämolaren und des Mandibularkanals beträgt im Mittel 1 mm [Mägdefessel-Schmutzer, Klinger 2002]. Seine Verletzung bei der Wurzelspitzenresektion hat den Gefühlsausfall der Unterlippe zur Folge [Grotz et al. 1998; Sakkal et al. 1994].

## **4.3 Vorteile des neuen Modells**

Da die Bohroperationen subvoxelgenau modelliert werden, ist sehr genaues Arbeiten auch mit sehr kleinen Werkzeugen möglich. Der Multiple-Point-

Kollisionserkennungsalgorithmus führt im Gegensatz zu einem Single-Point-Algorithmus zu einem wesentlich realistischeren haptischen Gefühl. Besonders für die realistische Simulation von Interaktionen mit Werkzeugen ist die Multi-Point-Methode unverzichtbar. Das Aufmodulieren von Bohrgeräuschen auf das Werkzeug führt zu einem sehr realistischem Eindruck. Durch eine stereoskopische Darstellung mit Rot/Grün- oder Shutterbrillen wird die räumliche Wahrnehmung weiter verbessert.

Für die meisten Operationssimulatoren ist die Entwicklung einer speziellen, meist teuren Software erforderlich [Massie, Salisbury 1994; Troulis et al. 2002].

Mit dem flexiblen „VOXELMAN“ Visualisierungssystem und dem haptischen Interface lassen sich mit überschaubarem Aufwand neue Simulationen erstellen. Neben der Wurzelspitzenresektion konnte bereits an diesem Modell weitere operative Eingriffe trainiert werden. Die Osteotomie mit der Kugelfräse wird bei der operativen Zahnentfernung durchgeführt und konnte mit dem vorliegenden Modell erfolgreich simuliert werden. Auch eine Kieferhöhlenfensterung konnte im Simulator virtuell trainiert werden. Dieser Eingriff ist z.B. bei einer Sinusliftoperation oder bei der Behandlung von pathologischen Prozessen in der Kieferhöhle erforderlich.

#### **4.4 Limitationen**

Die Auflösung der CT-Daten begrenzt die Detailgenauigkeit der Simulation. Feine Strukturen wie die Zahnwurzel lassen sich bei einer Auflösung von 1 mm<sup>3</sup> Voxelgröße nicht eindeutig vom Knochen abgrenzen, so dass trotz Interpolation die Zahnwurzeloberflächen unregelmäßig und unnatürlich aussehen. Auch der Verlauf des Nervus alveolaris inferior lässt sich streckenweise nicht nachvollziehen. Die Modellierung mit „Tree Edit“ wirkt etwas künstlich.

In dem erstellten Modell ist die Gewebehärte noch nicht ausreichend realisierbar. Das Kraftrückkopplungsgerät kann nicht so einen Widerstand erzeugen, wie Zahn- und Knochengewebe in der Realität. Härteunterschiede zwischen Zahn und Knochen, kompaktem und spongiösen Knochen wurden noch nicht berücksichtigt. In der Implantatchirurgie wurde ein Simulator

entwickelt, der im haptischen Interface den Härteunterschied zwischen kompaktem und spongiösen Knochengewebe virtuell darstellt [Sohmura et al. 2003].

In dieser Studie wurde ein vollbezahnter Schädel ohne Metallfüllung oder Metallkronen verwendet. Werden in Zukunft Patientendatensätze für weitere Simulationen benutzt, ist bei einem großen Teil der Datensätze mit Metallartefakten zu rechnen. Es wurden bereits Algorithmen entwickelt, mit denen Artefakte entfernt werden könnten [Nagao et al. 2003].

#### **4.5 Erweiterungsmöglichkeit für andere Operationssituationen**

Nach Implementierung eines ZMKG-Simulators Wurzelspitzenresektion, können weitere Übungsmodelle im Bereich der Zahn-, Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie entwickelt werden. Für die unterschiedlichen Operationssituationen könnten mehrere 3D-Modelle erstellt werden und mit dem ZMKG-Simulator Wurzelspitzenresektion zu einem umfangreicheren Simulationsprogramm zusammengefasst werden.

Denkbar ist ein Simulator für die operative Entfernung von Weisheitszähnen. Neben der Wurzelspitzenresektion gehört die Entfernung von Weisheitszähnen zu den häufigsten kieferchirurgischen Eingriffen. Gerade bei diesem Eingriff gibt es je nach Lage des Weisheitszahns, unterschiedliche operative Vorgehensweisen. Beschränkend ist jedoch die Mechanik des Simulators, da bei der Weisheitszahnentfernung große Kräfte ausgeübt werden.

Bereits in unserem Schädel-Datensatz lässt sich eine Fensterung der lateralen Kieferhöhlenwand trainieren. Allerdings ist bei einer Sinusliftoperation [Boyne, James 1980] das vorsichtige Abtragen der knöchernen Kieferhöhlenwand, ohne die darunter liegende Schleimhaut zu verletzen, von entscheidender Bedeutung. Das Training dieses Operationsschrittes ist zur Zeit nicht möglich, da die Membran simuliert werden müsste.

Es könnten weitere Modelle mit pathologischen Veränderungen erstellt werden, um den optimalen operativen Zugang zu trainieren.

Das haptische Interface wurde bereits verwendet, um Bohrvorgänge beim Setzen eines Dentalimplantates zu simulieren [Sohmura et al. 2003a]. Bei der virtuellen Aufbereitung des Implantatlagers können unterschiedliche Knochenhärten von kompaktem und spongiösem Knochen nachempfunden werden. Der Chirurg lernt das vorhandene Knochenangebot für ein ausreichend dimensioniertes Implantat zu nutzen, ohne den Kiefer zu perforieren oder empfindliche Strukturen zu verletzen.

Für eine Anwendung des „VOXELMAN“ Visualisierungssystems in der Implantologie erfordert zunächst die Implementierung weiterer virtuellen Werkzeuge, insbesondere eines geführten zylindrischen Bohrers. Aufgrund der großen Fortbildungsaktivitäten in diesem Bereich besteht an einem Operationssimulator für die Implantologie besonderes Interesse.

Während bei einfachen oralchirurgischen und implantologischen Eingriffen die Panoramaschichtaufnahme ausreichend ist [Tal, Moses 1991], erleichtern vor allem bei komplexeren Fällen und anspruchsvollen implantologischen Planungen Computertomographien die Operationsplanung [Tammisalo et al. 1992] [Andersson, Kurol 1987]. Die Entwicklung einfacher Planungssoftware ermöglichte den routinemäßigen Einsatz in der Implantologie [Casselman et al. 1991; King et al. 1992; Besimo et al. 1995]. CT-Daten des Patienten könnten zur Operationsplanung verwendet werden. Nach Einlesen der CT-Daten in den ZMKG-Simulator, könnte der Chirurg vor der Operation wichtige Landmarken und empfindlichen Strukturen inspizieren. Die stereoskopische Betrachtung und haptische Interaktion mit dem VR-Modell kann die Diagnose, Operationsplanung, Einschätzung des Operationsergebnisses und schließlich die Ausführung der Operation unterstützen. Der Chirurg kann die räumlichen Zusammenhänge "begreifen", ohne viele verschiedene CT-Schichtbilder vermessen zu müssen. Unterschiedliche operative Zugänge können ohne Risiko für den Patienten getestet werden.

Eine Einschränkung der Methode ist die Strahlenexposition des Patienten. Inzwischen sind aber CT-Protokolle mit reduzierter Strahlenbelastung ohne wesentlichen Qualitätseinbußen verfügbar [Hassfeld et al. 1998]. Die cone-

beam computer tomography (CBCT) ermöglicht mit dem NewTom 9000 (NIM s.r.l., Verona, Italy) [Mozzo et al. 1998; Möbes et al. 1999] die Erstellung von 3D-Datensätzen der Kiefer mit einer an das CT heranreichenden Qualität, aber deutlich geringerer Strahlenbelastung [Möbes et al. 2000].

Der Einsatz eines haptischen Interface bei der Operationsplanung wurde für die Dysgnathie-Chirurgie an zwei Patienten erprobt [Sohmura et al. 2004].

#### **4.6 Evaluation des Trainingseffekts**

In einer weiterführenden Studie soll entsprechend dem Simulator für Wurzelspitzenresektionen am virtuellen menschlichen Schädel, ein weiterer Operationssimulator mit dem virtuellem Modell eines Schweinepräparats entwickelt werden. Dieses Modell sieht die Durchführung von Wurzelspitzenresektionen am Kopf eines Schlachtschweins durch Studenten vor. Es ist geplant zwei Gruppen von jeweils 20 Studenten randomisiert einzurichten, wobei eine Gruppe vor der Arbeit am Schweinekiefer ein Training am virtuellen Modell erfährt.

Bewertet wird die erfolgreiche Wurzelspitzenresektion. Die Kürzung der Wurzelspitze um 3 mm bei geringem ossären Defekt ( $<12 \text{ mm}^3$ ) wird als Zielparameter definiert. Als weitere Parameter sind die Operationszeit und Schonung intraossär verlaufender Strukturen, wie Nerv-, Gefäßbündel und Nachbarzähne.

Unser Modell würde bei günstigem Ergebnis für die am virtuellen Modell trainierten Studenten eine erste Möglichkeit in der Zahnheilkunde und Kieferchirurgie bieten, Studenten und junge Ärzte/ Zahnärzte ohne Gefährdung von Patienten auszubilden. Für den Fall, dass die Effektivität der Trainingsmethode anhand dieser weiterführenden Untersuchung validiert werden kann, könnten für das Training virtuelle Modelle verschiedener menschlicher Individuen in der Klinik eingesetzt werden, um die Erfahrung mit anatomischen Varianten zu ermöglichen, bevor das Training am Patienten beginnt.



Es gibt bereits einige Studien zur Evaluation von Simulationsprogrammen. Dabei handelt es sich um vergleichende Untersuchungen zu endoskopischen Operationen [Kypson et al. 2003; Ali et al. 2002; Takiguchi et al. 2005; Youngblood et al. 2005; Rosen et al. 2006; Hart et al. 2006; Laguna et al. 2006]. Sie stellen die Fähigkeiten von trainierten Probanden denen einer Kontrollgruppe, die kein virtuelles Training erhielt, gegenüber. Alle Veröffentlichungen zeigen, dass die virtuelle Übung die chirurgischen Fähigkeiten positiv beeinflusst. Die größten Fortschritte werden zu Beginn des Trainings erzielt [Hart et al. 2006; Hackethal et al. 2006]. Die Daten legen nahe, virtuelles Training zukünftig schon in die Frühphase der medizinischen Ausbildung zu integrieren [Hoznek et al. 2006] und ergänzend zu den bestehenden Ausbildungsmitteln zu verwenden [Bloom et al. 2003]. Über die Endoskopie hinaus sind Untersuchungen zur Lerneffektivität des virtuellen Trainings bisher nicht erfolgt.

## 5 Zusammenfassung

Das gezielte Abtragen knöcherner Strukturen, ohne darin verlaufende Strukturen zu verletzen, ist essentieller Bestandteil operativer Maßnahmen, besonders im Bereich der dentoalveolären Chirurgie. Mit Hilfe eines neuen Simulators können diese Bohr- und Fräsvorgänge virtuell trainiert werden, was am Beispiel von Wurzelspitzenresektionen demonstriert werden soll.

Mit Hilfe des VOXEL-MAN-Systems wurde aus den Schichtdaten eines Schädels ein virtuelles, dreidimensionales Modell erstellt und Nervi alveolares inferiores sowie apikale Granulome der Zähne 23, 25, 36 und 35 modelliert. Um ein realistisches Bohrgedühl über das angebundene Krafrückkopplungsgerät zu bekommen, wurden in VOXEL-MAN Methoden integriert, die eine Kollisionserkennung mit hoher Auflösung ermöglichen. Zusätzlich wurden auf die berechnete Kraft Schwingungen aufmoduliert, die das Bohrgedühl verstärken sollen. Durch eine stereoskopische Darstellung mit Shutterbrillen wurde die räumliche Wahrnehmung weiter verbessert.

Mit dem hier vorgestellten Modell ist es möglich, beliebig komplexe, volumenbasierte Modelle visuell und haptisch zu "begreifen" und mit diesem Modellen bohrend und fräsend zu interagieren. Das haptische Gedühl ist aufgrund der speziellen Kollisionserkennung, der Berücksichtigung wichtiger Parameter des Bohrvorgangs und des Aufmodulierens von Bohrgeräuschen auf das Werkzeug sehr überzeugend. Durch die postoperative Rekonstruktion beliebiger Schnittebenen ist eine mehrdimensionale Kontrolle der durchgeführten Bohrvorgänge möglich.

Am Beispiel von Wurzelspitzenresektionen konnte gezeigt werden, dass mit dem hier vorgestellten System eine sehr realistische bohrende und fräsende Interaktion auch mit komplexen anatomischen Modellen möglich ist. Grundsätzlich ist es möglich, durch das Einfügen virtueller Pathologien in vorhandene Bilddaten verschiedenartige Operationen zu simulieren.

## 6 Literaturverzeichnis

- Ali MR, Mowery Y, Kaplan B, DeMaria EJ (2002) Training the novice in laparoscopy. More challenge is better. *Surg Endosc* 16:1732-1736
- Andersson L, Kurol M (1987) CT scan prior to installation of osseointegrated implants in the maxilla. *Int J Oral Maxillofac Surg* 16: 50–55
- Arshat H, Kim KS, Jalil AH (1985) Outpatients laparoscopic sterilization -- a review of the difficulties in procedure and complications encountered. *Malays J Reprod Health* 3: 59-63
- Arx T (2005) Failed root canals: the case for apicoectomy (periradicular surgery). *J Oral Maxillofac Surg* 63: 832-837
- Besimo C, Lambrecht JT, Nidecker A (1995) Dental implant treatment planning with reformatted computed tomography. *Dentomaxillofac Radiol* 24: 264–267
- Bloom MB, Rawn CL, Salzberg AD, Krummel TM (2003) Virtual reality applied to procedural testing: the next era. *Ann Surg* 237:442-448
- Bockholt U, Müller W, Voss G, Ecke U, Klimek L (1999) Real-time simulation of tissue deformation for the nasal endoscopy simulator (NES). *Comput Aided Surg* 4: 281-285
- Boyne PJ, James RA (1980) Grafting of the maxillary sinus floor with autogenous marrow bone. *J Oral Surg* 38: 613–616
- Carrotte P (2005) Surgical endodontics. *Br Dent J* 98: 71-79
- Casselmann JW, Deryckere F, Hermans R, Declercq C, Neyt L, Pattyn G, Meeus L, Vandevoorde P, Steyaert L, Devos V (1991) Denta scan CT software program used in the anatomic evaluation of the mandible and maxilla in the perspective of endosseous implant surgery. *Rö Fortschr Geb Röntgenstr Neuen Bildgeb Verfahr* 155: 4–10
- Chandler NP, Koshy S (2002) The changing role of the apicectomy operation in dentistry. *J R Coll Surg Edinb* 47: 660-667

- Chong BS, Pitt Ford TR (2005) Postoperative pain after root-end resection and filling. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 100: 762-6
- Coatrieux JL, Barillot C (1990) A Survey of 3D Display Techniques to Render Medical Data. In: Höhne, K. H., Fuchs, H., Pizer, S. M. (Hrsg) *3D Imaging in Medicine Algorithms, Systems, Applications*. Springer, Berlin 175-196
- Ecke U, Klimek L, Muller W, Ziegler R, Mann W (1998) Virtual reality: preparation and execution of sinus surgery. *Comput Aided Surg* 3: 45–50
- Ferreira FB, Ferreira AL, Gomes BP, Souza-Filho FJ (2004) Resolution of persistent periapical infection by endodontic surgery. *Int Endod J* 37: 61-69
- Filippi A, Meier ML, Lambrecht JT (2006) Periradicular surgery with endoscopy--a clinical prospective study. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 116: 12-17
- Foley JD, van Dam A, Feiner SK, Hughes JF (1990) *Computer Graphics: Principles and Practice, Second Edition*. In: *The System Programming Series*. Addison-Wesley Publishing Company, 701-704
- Foley KT, Smith MM (1996) Image-guided spine surgery. *Neurosurg Clin North Am* 7: 171–186
- Freedman A, Horowitz I (1999) Complications after apicoectomy in maxillary premolar and molar teeth. *Int J Oral Maxillofac Surg* 28:192-194
- Freysinger W, Gunkel AR, Thumfart WF (1997) Image-guided endoscopic ENT surgery. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 254: 343–346
- Gagliani MM, Gorni FG, Strohmenger L. (2005) Periapical resurgery versus periapical surgery: a 5-year longitudinal comparison. *Int Endod J* 38: 320-327
- Gibson S, Fyock C, Grimson E (1998) Volumetric object modeling for surgical simulation. *Med Image Anal* 2: 121–132
- Girod S, Keeve E, Girod B (1995) Advances in interactive craniofacial surgery planning by 3D simulation and visualization. *Int J Oral Maxillofac Surg* 24: 120–125
- Glombitza G, Evers H, Hassfeld S, Engelmann U, Meinzer HP (1999) Virtual surgery in a (tele-)radiology framework. *IEEE Trans Inf Technol Biomed* 3: 186–196
- Grotz KA, Al-Nawas B, de Aguiar EG, Schulz A, Wagner W (1998) Treatment of

- injuries to the inferior alveolar nerve after endodontic procedures. Clin Oral Investig 2: 73-76
- Gunkel AR, Freysinger W, Thumfart WF (2000) Experience with various 3-dimensional navigation systems in head and neck surgery. Arch. Otolaryngol. Head Neck Surg 126: 390–395
- Hackethal A, Immenroth M, Burger T (2006) Evaluation of target scores and benchmarks for the traversal task scenario of the minimally invasive surgical trainer-virtual reality (MIST-VR) laparoscopy simulator. Surg Endosc 19
- Hart R, Doherty DA, Karthigasu K, Garry R (2006) The value of virtual reality-simulator training in the development of laparoscopic surgical skills. J Minim Invasive Gynecol 13:126-133
- Hassfeld S, Muehling J (1998) Navigation in maxillofacial and craniofacial surgery. Comput Aided Surg 3: 183–187
- Hassfeld S, Streib S, Sahl H, Stratmann U, Fehrentz D, Zöller J (1998) Low-dose-Computertomographie des Kieferknochens in der präimplantologischen Diagnostik. Mund Kiefer Gesichtschir 2: 188–193
- Heiland M, Petersik A, Pflesser B, Tiede U, Schmelzle R, Höhne KH, Handels H (2004) Realistic haptic interaction for computer simulation of dental surgery - evaluation of virtual apicectomies by 38 dental students. CARS 2004, Amsterdam
- Heiland M, Sternberg-Gospos N, Pflesser B, Schulze D, Höhne KH, Schmelzle R, Petersik A (2004) Virtuelle Simulation dentoalveolärer Eingriffe in einem dreidimensionalen Computermodell mit Kraftrückkopplungssystem. Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie 8: 163 – 166
- Hell B, Bier J (2000) Chirurgische Zahnerhaltung. In: Schwenzer N, Ehrenfeld M (Hrsg) Zahnärztliche Chirurgie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 75-87
- Hill DL, Hawkes DJ, Gleeson MJ, Cox TC, Strong AJ, Wong WL, Ruff CF, Kitchen ND, Thomas DG, Sofat A (1994) Accurate frameless registration of MR and CT images of the head: applications in planning surgery and radiation therapy. Radiology 191: 447–454
- Hoffmann-Axthelm W. (1995) Die Geschichte der Mund- Kiefer- und Gesichtschirurgie. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin

- Hoffmann K (1958) Lorenz Heister (1683-1758). Zahnärztl Prax 9: 96
- Höhne KH, Hanson WA (1992) Interactive 3D-segmentation of MRI and CT volumes using morphological operations. J Comput Assist Tomogr 16: 285-294
- Höhne KH, Pflesser B, Pommert A, Riemer M, Schiemann T, Schubert R, Tiede U (1995) A new representation of knowledge concerning human anatomy and function. Nature Med 1: 506-511
- Hoznek A, Salomon L, de la Taille A, Yiu R, Vordos D, Larre S, Abbou CC (2006) Simulation training in video-assisted urologic surgery. Curr Urol Rep 7:107-113
- Hrusztics A, Bogdan S, Fellegi V, Szabo G (2003) New surgical approach in apicoectomy of maxillary molars' palatal root. Fogorv Sz 96: 125-127
- Jalaß J (1992) Dreidimensionale Modellkonstruktion auf der Grundlage Magnet-Resonanz-Tomographischer Date. Inauguraldissertation, Kiel
- Johnson L, Thomas G, Dow S, Stanford C (2000) An initial evaluation of the Iowa dental surgical simulator. J Dent Ed 64: 847-853
- King JM, Caldarelli DD, Petasnick JP (1992) DentaScan™ a new diagnostic method for evaluating mandibular and maxillary pathology. Laryngoscope 102: 379-387
- Koea J (2005) Getting started as a hepatobiliary surgeon: lessons learned from the first 100 hepatectomies as a consultant. N Z Med J 118: 1322.
- Kypson AP, Nifong LW, Chitwood WR, (2003) Robotic mitral valve surgery. Surg Clin North Am 83:1387-1403
- Laguna MP, de Reijke TM, Wijkstra H, de la Rosette J (2006) Training in laparoscopic urology. Curr Opin Urol 16:65-70
- Lange T, Indelicato DJ, Rosen JM (2000) Virtual reality in surgical training. Surg. Oncol. Clin. North Am 9: 61-79
- Leuwer R, Pflesser B, Urban M (2001) Die stereoskopische Simulation ohrchirurgischer Eingriffe an einem neuartigen Computermodell. Laryngo-Rhino-Otol 80: 298-302
- Mägdefessel-Schmutzer U, Klinger G (2002) Chirurgische Zahnerhaltung durch Wurzelspitzenresektion ein- oder mehrwurzliger Zähne (Teil 1). Fachbeitrag der

Friedrich-Schiller-Universität Jena zur Wurzelspitzenresektion

- Massie TM, Salisbury JK (1994) The phantom haptic interface: a device for probing virtual objects. ASME 3rd Annual Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, IL Vol 1: 295–301
- Möbes O, Becker J, Pawelzik J, Jacobs K (1999) Anwendungsmöglichkeiten der Digitalen Volumen-Tomographie in der implantologischen Diagnostik. Z Zahnärztl Implantol 15: 229–233
- Möbes, Becker J, Schnelle C, Ewen K, Kemper J, Cohnen M (2000) Strahlenexposition bei der digitalen Volumetomographie, Panoramaschichtaufnahme und Computertomographie. Dtsch Zahnärztl Z 55: 336–339
- Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Tinazzi Martini P, Bergamo Andreis IA (1998) A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique preliminary results Eur Radiol 8: 1558–1564
- Muller W, Bockholt U, Lahmer A, Voss G, Borner M (2000) VRATS--Virtual Reality Arthroscopy Training Simulator. Radiologe 40:290-294
- Nagao M, Sohmura T, Wakabayashi K, Matsumura K, Hojo H, Oku H, Nakamura T, Takahashi J (2003) A new method to remove artifact of 3D-CT image. J J Dent Mater 22: 168
- Nentwig GH (2003) Wurzelspitzenresektion. In: Horch HH (Hrsg) Zahnärztliche Chirurgie. Urban und Schwarzenberg, München Wien Baltimore, 178-200
- Nentwig GH (2004) Wurzelspitzenresektion - Bewährtes und Neues. Zahnärztl Mitt 1: 44-52
- Nowack BF (2003) Und noch einmal Wurzelspitzenresektion. Zahnärzteblatt Rheinland-Pfalz 18
- Partsch PDC (1899) Ueber Wurzelresection. Dtsch Monatsschr Zahnheilkd 1899: 348-367
- Petersik A, Pflesser B, Tiede U, Höhne KH, Leuwer R. Haptic (2002) volume interaction with atomic models at sub-voxel resolution. In: 10th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Proc Haptics 66–72
- Pflesser B, Petersik A, Tiede U, Höhne KH, Heiland M, Leuwer R (2002) Volume

- cutting for virtual petrous bone surgery. *Comput Aided Surg* 2: 74-83
- Radetzky A, Rudolph M, Starkie S, Davies B, Auer LM (2000) ROBO-SIM: a simulator for minimally invasive neurosurgery using an active manipulator. *Stud Health Technol Inform* 77:1165-1169
- Reichardt PA, Hausamen J-E, Becker J, Neukam FW, Schliephake H, Schmelzeisen R (2002) *Curriculum Zahnärztlich Chirurgie. Band I*, Quintessenz Verlags- GmbH, Berlin
- Rosen J, Brown JD, Chang L, Sinanan MN, Hannaford B (2006) Generalized approach for modeling minimally invasive surgery as a stochastic process using a discrete Markov model. *IEEE Trans Biomed Eng* 53:399-413
- Sakkal S, Gagnon A, Lemian L. (1994) Paresthesia of the mandibular nerve caused by endodontic treatment: a case report. *J Can Dent Assoc* 60: 556-558
- Sanders AJ, Luursema JM, Warntjes P (2005) Validation of Open-Surgery VR Trainer. *Stud Health Technol Inform* 119:473-476
- Schramm A, Gellrich NC, Gutwald R, Schipper J, Bloss H, Hustedt H, Schmelzeisen R, Otten JE (2000) Indication for computer-assisted treatment of cranio-maxillofacial tumors. *Comput Aided Surg* 5: 343–352
- Schubert R, Schiemann T, Tiede U, Höhne KH (1997) Applications and perspectives in anatomical 3-dimensional modelling of the visible human with VOXEL-MAN. *Acta Anat* 160: 123-131
- Schwenzer N, Ehrenfeld M (2000) *Zahnärztliche Chirurgie Band 3*. Stuttgart, New York, GeorgThieme Verlag
- Sohmura T, Kusumoto N, Wakabayashi K, Yamada S, Nagao M, Nakamura T, Takahashi J (2003) Application of haptic device and CAD/CAM fabrication for implant surgery *J Dent Res* 82: 142
- Sohmura T, Kusumoto N, Wakabayashi K, Yamada S, Nakamura T, Oku H, Takahashi J (2003), Application of haptic device to dentistry. Part 1. Support for implant surgery. *J J Dent Mater* 22: 53
- Sohmura T, Hojo H, Nakajima M, Wakabayashi K, Nagao M, Iida S, Kitagawa T, Kogo M, Kojima T, Matsumura K, Nakamura T, Takahashi J. (2004) Prototype of simulation of orthognathic surgery using a virtual reality haptic device. *Int J Oral*



Maxillofac Surg 33: 740-50

- Sternberg-Gospo N (2002) Stellenwert der MR-Kolonographie Vergleich zwischen multiplanarer Rekonstruktion und virtueller Koloskopie. Med Dissertation. Universität Hamurg
- Takiguchi S, Sekimoto M, Yasui M (2005) Cyber visual training as a new method for the mastery of endoscopic surgery. Surg Endosc 19(9):1204-1210
- Tal H, Moses O (1991) A comparison of panoramic radiography with computed tomography in the planning of implant surgery. Dentomaxillofac Radiol 20: 40–42
- Tammisalo D, Hallikainen, Kanerva H, Tammisalo T (1992). Comprehensive oral X-ray diagnosis Scanora multimodal radiography, A preliminary description. Dentomaxillofac Radiol 21: 9–15
- Tiede U, Schiemann T, Höhne KH (1998) High quality rendering of attributed volume data. In David Ebert, Hans Hagen, Holly Rushmeier (Eds.), Proc. IEEE Visualization, Los Alamitos, CA, IEEE Computer Society Press 255-262
- Troulis MJ, Everett P, Seldin EB, Kikinis R, Kaban LB (2002) Development of a three-dimensional treatment planning system based on computed tomographic data. Int. J Oral Maxillofac Surg 31: 349–357
- Tsesis I, Shoshani Y, Givol N, Yahalom R, Fuss Z, Taicher S (2005) Comparison of quality of life after surgical endodontic treatment using two techniques: a prospective study. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 99: 367-371
- van der Meer WJ, Stegenga B (2004) Root canal retreatment or surgical apicoectomy? Ned Tijdschr Tandheelkd 111: 430-434
- Wesson CM, Gale TM (2003) Molar apicectomy with amalgam root-end filling: results of a prospective study in two district general hospitals. Br Dent J 195: 707-714
- Wolf DH. Geschichte und Praxis der Wurzelspitzenresektion. Z Stomatol 27. 1929:89
- Xia J, Ip HHS, Samman N, Wang D, Kot CSB, Yeung RWK, Tideman H (2000) Computer-assisted three-dimensional surgical planning and simulation: 3D virtual osteotomy. Int J Oral Maxillofac Surg 29: 11-17
- Xia J, Samman N, Yeung RWK, Wang D, Shen SGF, Ip HHS, Tideman H (2000)

Computer-assisted three-dimensional surgical planning and simulation. 3D soft tissue planning and prediction. *Int J Oral Maxillofac Surg* 29: 250-258

Youngblood PL, Srivastava S, Curet M, Heinrichs WL, Dev P, Wren SM (2005)  
Comparison of training on two laparoscopic simulators and assessment of skills transfer to surgical performance. *J Am Coll Surg* 200:546-551

## **7 Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. Dr. Heiland und Herrn Prof. Dr. Dr. Schmelzle für die intensive Betreuung und Unterstützung im klinischen Anteil in allen Phasen der Arbeit.

Herrn Petersik, Herrn Dr. Tiede und Herrn Prof. Dr. Höhne danke ich für die Einführung in das VOXEL-MAN-System und die intensive Betreuung meiner Dissertation seitens der Arbeitsgruppe VOXEL-MAN.

Ich freue mich, dass mir die Möglichkeit gegeben wurde, dieses innovative Forschungsgebiet an der Schnittstelle zwischen Medizin und Informatik kennen zu lernen. Durch diese Arbeit entstanden maßgebliche Impulse für meinen weiteren Berufsweg.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mir das Studium der Medizin und Zahnmedizin ermöglicht und mich mit großem Verständnis unterstützt haben.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Frau Kamila für Ihr Verständnis für meine häufige Abwesenheit während dieser Zeit.

## 8 Lebenslauf

### Persönliche Daten

Dr. med. Norman Daniel von Sternberg

geboren am 08.01.72 in Breslau

Staatsangehörigkeit deutsch

### Schulbildung

1979 bis 1980	Grundschule in Breslau
1981	Grundschule in Düsseldorf
1981 bis 1983	Grundschule in Hamburg
1983 bis 1988	St. Ansgar Gymnasium in Hamburg
1988 bis 1992	Gymnasium Neu Wulmstorf
1992	Allgemeine Hochschulreife

### Studium

1992 bis 2002	Studium der Zahnmedizin und Medizin
09 / 1993	naturwissenschaftliche Vorprüfung für Zahnärzte
03 / 1995	Zahnärztliche Vorprüfung
03 / 1996	Ärztliche Vorprüfung
12 / 1998	Staatsexamen Zahnmedizin
04 / 2000	1. Staatsexamen Medizin
09 / 2001	2. Staatsexamen Medizin
10 / 2002	3. Staatsexamen Medizin

### Berufserfahrung

1998 bis 2003	zahnärztliche Tätigkeit
10/03 bis 09/05	wissenschaftlicher Angestellter am UKSH Kiel
seit 10/05	wissenschaftlicher Angestellter am UKE Hamburg

## **9 Eidesstattliche Versicherung**

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Unterschrift:

Dr. med. Norman von Sternberg