

# Forschung · Wissenschaft Recherche · Science

**Editor-in-chief**  
**Chefredaktor**  
**Rédacteur en chef**  
Jürg Meyer, Basel

**Editors**  
**Redaktoren**  
**Rédacteurs**  
Urs Belser, Genève  
Peter Hotz, Bern  
Heinz Lüthy, Zürich

**Assistant Editor**  
**Redaktions-Assistentin**  
**Rédactrice assistante**  
Catherine Weber, Basel

## **Advisory board / Gutachtergremium / Comité de lecture**

P. Baehni, Genève  
F. Barbakow, Zürich  
J.-P. Bernard, Genève  
C.E. Besimo, Basel  
M. Bickel, Bern  
S. Bouillaguet, Genève  
U. Brägger, Bern  
Th. Brunner, Zürich  
E. Budtz-Jørgensen, Genève  
D. Buser, Bern  
M. Cattani, Genève  
B. Ciucchi, Genève  
K. Dula, Bern  
J. Fischer, Bern  
A. H. Geering, Bern  
R. Gmür, Zürich  
W. Gnoinski, Zürich  
Ch. Hämmerle, Zürich  
N. Hardt, Luzern

T. Imfeld, Zürich  
K.H. Jäger, Basel  
J.-P. Joho, Genève  
S. Kiliaridis, Genève  
I. Krejci, Genève  
J. Th. Lambrecht, Basel  
N.P. Lang, Bern  
Ch. Lehner, Zürich  
T. Lombardi, Genève  
H.U. Luder, Zürich  
A. Lussi, Bern  
F. Lutz, Zürich  
C. Marinello, Basel  
G. Menghini, Zürich  
R. Mericske-Stern, Bern  
J.-M. Meyer, Genève  
A. Mombelli, Genève  
W. Mörmann, Zürich  
Ph. Mojon, Genève

G. Pajarola, Zürich  
S. Palla, Zürich  
S. Paul, Zürich  
M. Perrier, Lausanne  
M. Richter, Genève  
H. Sailer, Zürich  
J. Samson, Genève  
P. Schärer, Zürich  
J.-P. Schatz, Genève  
P. Schüpbach, Zürich  
P. Stöckli, Zürich  
U. Teuscher, Zürich  
H. van Waes, Zürich  
T. von Arx, Bern  
A. Wichelhaus, Basel  
J. Wirz, Basel  
A. Wiskott, Genève

**Publisher**  
**Herausgeber**  
**Editeur**  
Schweizerische Zahnärzte-Gesellschaft SSO  
Société Suisse d'Odonto-Stomatologie  
CH-3000 Bern 7

**Adresse der wissenschaftlichen Redaktion**  
Prof. Jürg Meyer  
Zentrum für Zahnmedizin  
Institut für Präventivzahnmedizin und Orale Mikrobiologie  
Hebelstr. 3  
4056 Basel

# CT-gestützte Navigation zur Insertion von dentalen Implantaten in Oberkiefermodellen

## Zusammenfassung

Die Verwendung CT-gestützter intraoperativer Navigation hat in vielen medizinischen Spezialgebieten einen Gewinn an Genauigkeit erbracht und zusätzlich häufig nur einen minimal invasiven Eingriff erfordert.

In dieser Studie soll die Genauigkeit des SMN®-Systems (Zeiss, Oberkochen, Deutschland) für das navigierte Setzen von Implantaten in den Seitenzahnbereich des Oberkiefers untersucht werden. Zusätzlich wird die Genauigkeit des SMN-Systems für die navigierte Bohrung zur Implantation in den Seitenzahnbereich des Oberkiefers untersucht werden. Das System soll dabei eine mögliche Perforation in die Kieferhöhle vermeiden helfen.

Dazu wurden 60 Bohrungen in 10 Polyurethanmodelle eines knöchernen Schädels angebracht. Diese Modelle wurden so hergestellt, dass die Kieferhöhle von cranial einsichtig war. Die CT-Untersuchung erfolgte in 1,0-mm-Schichten. Die CT-Daten wurden auf die Arbeitsplatte des SMN®-Systems (Zeiss, Oberkochen, Deutschland) transferiert, sodass nach Referenzierung anhand der auf das Modell aufgebrachten Marker eine Überlagerung dieses gefrästen Modells mit den CT-Daten möglich war. Mit einem auf dieses System kalibrierten Hilfswerkzeug, mit dem auch die Referenzierung des Modells durchgeführt wurde, konnten die Messbohrungen stattfinden. Das Ziel der Bohrung war es, nicht den knöchernen Kieferhöhlenboden zu perforieren. Die Distanz zwischen der Tiefe der erreichten Bohrung und dem Kieferhöhlenboden wurde nach der Bohrung vermessen. Dabei wurde eine durchschnittliche Bohrtiefe von 6,97 mm ( $s = 0,4$ ) und ein durchschnittlicher Abstand zur Kieferhöhle von 0,11 mm ( $s = 0,2$ ) gefunden. In 13 Fällen konnte eine Perforation gesehen werden, was einer Perforationsrate von 22% entspricht.

Zusammenfassend konnte eine hohe Präzision bei CT-gesteuerter Navigation zur kontrollierten Bohrung zur Implantation erreicht werden.

Schweiz Monatsschr Zahnmed 111: 828–833 (2001)

Schlüsselwörter: Navigation, Implantate, Oberkiefer

Zur Veröffentlichung angenommen: 18. April 2001

Korrespondenzadresse:

Univ. Doz. Dr. Dr. Günter Schultes, Abteilung f. Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Universitätsklinik / LKH Graz Auenbruggerplatz 7, A-8036 Graz  
Tel. ++43/316/385-2565, Fax ++43/316/385-3511

GÜNTER SCHULTES und ALEXANDER GAGGL

Klinische Abteilung für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie  
Universitätsklinik Graz

## Einleitung

Die Verwendung des dentalen CT hat sich in der präimplantologischen Diagnostik der schwierigen Alveolarkamm-morphologie als äusserst hilfreich erwiesen (SOLAR & GAHLEITNER et al. 1999, WICHT et al. 1994). Dabei wurde die Computertomographie einerseits zur genauen Darstellung der tatsächlichen Morphologie des Kieferkamms und andererseits zur Verifizierung anatomisch bedeutender Strukturen eingesetzt (SCHOM et al. 1996). Diese anatomisch bedeutenden Strukturen entsprechen dem Verlauf des Alveolarkamms im Unterkiefer und dem Verlauf des Kieferhöhlen- und Nasenhöhlenbodens im Oberkiefer. Im Oberkiefer stellt sich dabei häufig die Frage, ob eine Implantation ohne Augmentation der Kieferhöhle oder des Nasenbodens möglich ist. Das Alveolarkamm-CT kann hier entscheidend zur Beantwortung dieser Frage beitragen und die Wahl der geeigneten Augmentationstechnik beeinflussen (PELEG et al. 1999). Dennoch stellt sich mit der Entwicklung von längenreduzierten und durchmesserextendierten Implantaten (STELLINGSMA et al. 2000) heute immer häufiger die Frage nach der Vermeidbarkeit einer Augmentation bei optimaler Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Knochenhöhe im Oberkiefer. Die Problematik bei der präimplantologischen Planung anhand computertomographischer Bilder besteht dabei in der genauen intraoperativen Umsetzung. Dabei kann die Planung am zahnlosen Alveolarfortsatz nur annähernd und schwer kontrollierbar umgesetzt werden.

Durch die Anfertigung von Implantationshilfen konnte zwar die präoperative Planung intraoperativ übertragen werden. Dabei konnten durch diese mechanischen Übertragungshilfen aber nur zweidimensional korrekte Richtungsorientierungen für die Implantatbohrung gegeben und damit nur eine zweidimensionale Festlegung der Bohrrichtung bedingt werden. Dies war zudem nur möglich, wenn die Bohrhilfen auf anatomisch reproduzierbare Strukturen des Kiefers abgestützt werden konnten, die eine eindeutige Positionierung der Bohrschablone erlaubten. Auch die Verwendung dreidimensionaler Modelle konnte die Notwendigkeit von dreidimensionalen Übertragungshilfen nicht vermeiden und brachte nur bei zusätzlich notwendigen Augmentationsverfahren wichtige zusätzliche Informationen (GAGGL et al. 2000).

Ein neues Verfahren mit dreidimensionaler intraoperativer Kontrollmöglichkeit chirurgischer Interventionen stellt die CT-gestützte Navigation mit Arbeitswerkzeugen dar. Hier kann durch die Kopplung des CTs an die reale Situation am OP-Tisch eine intraoperative Sichtbarmachung der Patientenmorphologie erfolgen und die Position eines Hilfswerkzeuges am oder im Patienten dreidimensional kontrollierbar geführt werden (WATZINGER et al. 1997, GAGGL et al. 1998, WATZINGER et al. 1999).

Diese Eigenschaft könnte somit auch eine exakte Positionierung von Implantaten ermöglichen. Dennoch waren Mittelwertabweichungen dieser Technik in den letzten Jahren zu gross, um sie für die Implantatchirurgie nützen zu können (HASSFELD et al. 1998). Mit der Minimierung von Fehlerquellen und der Entwicklung neuer Hilfswerkzeuge wurden weitere Verbesserungen erreicht, die nun auch die Nutzbarkeit der CT-gestützten Navigation in der Implantologie wahrscheinlich werden lassen. Im Rahmen dieser Studie sollte nun die Fehlerwahrscheinlichkeit und die damit verbundene Nutzbarkeit einer CT-navigierten Bohrung zur Implantatlagerpräparation im Oberkiefer bei Vermeidung der Perforation zu angrenzenden pneumatisierten Strukturen erarbeitet werden. Zusätzlich soll die Einsetzbarkeit dieser Technik zur Implantation von Kurzimplantaten unter Vermeidung zusätzlicher Augmentationsmassnahmen verifiziert werden.

## Material und Methoden

Im Rahmen dieser Studie erfolgten 60 Zielbohrungen an 10 Oberkiefermodellen, die auf der Basis eines Patienten-CT mit einer CNC-Fräsmaschine hergestellt wurden (Abb. 1). Da-



Abb. 1 Polyurethanmodell des Mittelgesichts.

bei erfolgte die Auswahl eines geeigneten Patienten bzw. CT nach einer idealen Konstellation des Oberkiefers zur Durchführung dieses Versuchs. Die Patienten mussten zahnlose Alveolarfortsätze im Oberkieferseitenzahnbereich aufweisen. Zudem musste eine Resthöhe des Alveolarknochens zwischen 5 und 8 mm bestehen. Dabei galt die Distanz zwischen dem höchsten Punkt des Kieferkamms und dem Sinusboden als Bemessungsgrundlage. Diese Polyurethanmodelle wurden dabei so gestaltet, dass sie nur bis zur Höhe des Orbitabodens gefräst wurden, um das Lumen der Kieferhöhle patientengetreu wiedergeben zu können und einen direkten Einblick in die Kieferhöhlen zu ermöglichen.

So wurde jedes Oberkiefermodell zunächst mit 6 Referenzierungsmarker versehen und ein CT (Evolution CT, Siemens, Erlangen, Deutschland) mit 1 mm Schichtabstand angefertigt. Dieses wurde in die Arbeitsstation des Navigationssystems SMN Zeiss (Oberkochen, Germany) eingespielt.

Zur Überprüfung von CT-bedingten Übertragungsfehlern wurden die Durchmesser von je zwei Bohrungen im Bereich des Processus pterygoideus und deren kürzester Abstand voneinander im CT und am Nativmodell vermessen. Das Nativmodell wurde mit einer Schiebelehre vermessen und das CT-Modell durch computergestützte Vermessung am Bildschirm kontrolliert. Die entsprechenden Werte wurden notiert und die Differenzen und deren Standardabweichungen errechnet.

Am Oberkiefermodell wurde dann ein dreidimensionaler Infrarotsensor befestigt (Abb. 2), der in direktem optischem Kontakt mit drei räumlich distanziert angeordneten Infrarotkamas stand, die ihrerseits Verbindung mit der Arbeitsstation hatten.

Anschließend erfolgte die Modellreferenzierung anhand der 6 Referenzierungsmarker. Die Referenzierung wurde mit einem Winkelstück und einem kalibrierten Normbohrer durchgeführt, der im späteren Versuch als Bohrwerkzeug verwendet wurde. Am Winkelstück wurden 3 Infrarotsensoren in einer sternförmigen Anordnung (Abb. 3) montiert. Diese standen ebenso in ständigem optischem Kontakt mit drei Infrarotkamas, die ihrerseits für die entsprechende Sensorrückmeldung zur Arbeitsstation verantwortlich waren. Durch Überlagerung der Referenzpunkte zwischen Nativ- und CT-Modell und Kalibrierung des Tools konnten Bewegungen der Bohrspitze in Relation zum Oberkiefermodell und dem sich klar abzeichnenden Sinusboden an der Workstation nachvollzogen werden. So wurde der Eintritts- und Zielpunkt einer Bohrung in die Maxilla geplant. Als Zielpunkt galt jeweils die craniale Begrenzung des Alveolarknochens bzw. der Sinusboden. Durch eine gezielte Führung



Abb. 2 Ein dreidimensionaler Sensor ist an das Polyurethanmodell befestigt.



Abb. 3 Bohrung mit dem Bohrwerkzeug. Ebenfalls ist ein Sensor auf diesem aufgebracht.

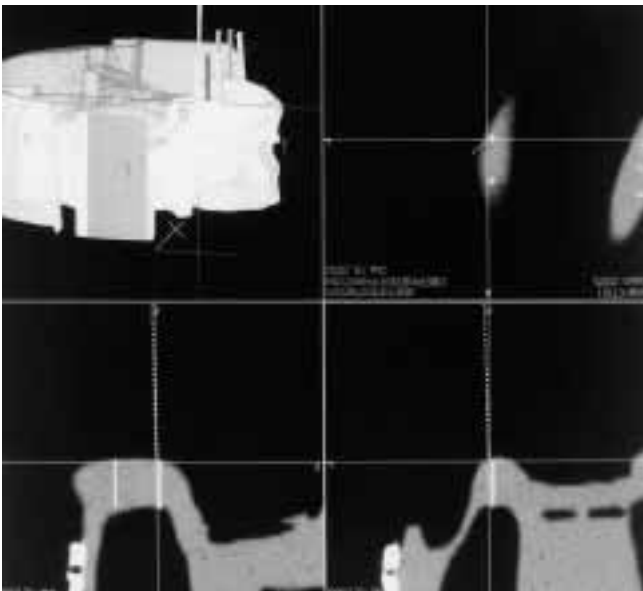


Abb. 4 Bildoberfläche der Arbeitsstation während der Bohrung. Die gepunktete Linie zeigt die Bohrspitze, die sich exakt entlang des geplanten Bohrkanals bewegen lässt.

des Bohrwerkzeuges konnten die Relativbewegungen der Bohrspitze mit einer Zeitverzögerung von 50 ms kontrolliert werden (Abb. 4). So konnte nach Festlegung des Eintrittspunktes am Modell und des Zielpunktes in der Tiefe des Modells eine CT-navigierte Zielbohrung ausgeführt werden. Der Bohrstopp wurde dabei in alleiniger Kontrolle der Bildschirmsituation so gewählt, dass am Bildschirm die Bohrspitze die caudale Begrenzung der Kieferhöhle gerade nicht berührte, um so eine Kieferhöhlenperforation bei der Simulation einer Implantatlagerausschachtung zu vermeiden und dennoch die zur Verfügung stehende Knochenhöhe möglichst vollständig auszunutzen. Zur Ermöglichung genauer Messungen von Penetrationen in die Kieferhöhle wurde diese mit einem Acrylat ausgefüllt. Dies erfolgte erst nach der Durchführung des CT unmittelbar vor der Planung der

Bohrungen. Dieses Vorgehen wurde an jedem der 10 Oberkiefermodelle 6-mal (3-mal rechts und 3-mal links) durchgeführt. So erfolgten 60 navigierte Zielbohrungen.

Nach Abschluss aller Bohrungen erfolgte die Überprüfung des Bohrergebnisses durch Vermessung der Distanz zwischen der geplanten und tatsächlich erreichten Zielbohrlänge. Dazu wurde das Oberkiefermodell an jeder Bohrstelle bis zum tiefsten Punkt der Bohrung aufgefräst (Abb. 5). Anschliessend wurden der Abstand des Bodens der Kieferhöhle zur tiefsten Stelle der Zielbohrung vermessen. Diese Vermessung erfolgte mit einer Schiebelehre. Bei Perforation der Kieferhöhle wurde die Eindringtiefe des Bohrers in den Acrylatblock, der das Kieferhöhlenlumen ausfüllte, gemessen. So konnten Planungsinkongruenzen bis zu 0,01 mm erfasst und festgehalten werden. Die Messung erfolgte an jedem Bohrloch 5-mal. Es wurde der höchste und niedrigste Messwert vernachlässigt und der Mittelwert aus den verbleibenden Werten festgehalten. Zudem wurde die absolute Bohrlänge in gleicher Weise ermittelt. Nach Vermessung aller Werte wurden der Mittelwert aller einzelnen Mittelwerte und die entsprechenden Standardabweichungen berechnet. Zudem wurden Maximal- und Minimalwerte registriert. Die Signifikanz der Mittelwerte wurde durch den einseitigen t-Test überprüft. Dabei wurde der Optimalwert von 0 mm Differenz zwischen Planung und erreichtem Abstand zum Sinusboden als Normwert angenommen.

## Resultate

Die Vermessung der Distanz der Referenzbohrungen am Nativmodell und am CT ergab eine durchschnittliche Abweichung von 0,1 mm (Tab. I). Weiterhin ergab sich ein Mittelwert der Bohrtiefe von 6,97 mm ( $s = 0,4$ ) und eine mittlere Distanz zum Sinusboden von 0,11 mm ( $s = 0,2$ ). Bei 13 Bohrungen erfolgte eine Perforation des Sinusbodens. Die durchschnittliche Penetrationstiefe in den Acrylatblock, der die Kieferhöhle simulierte, betrug dabei 0,24 mm. 47 Bohrungen konnten ohne Perforation durchgeführt werden. Die mittlere Distanz zur Kieferhöhle betrug 0,23 mm ( $s = 0,2$ ).

Die Einzelergebnisse der Bohrungen sind in der Tabelle I zusammengefasst.

## Diskussion

Das dentale CT hat in der Planung schwieriger implantologischer Eingriffe in den letzten Jahren einen hohen Stellenwert



Abb. 5 Querschnitt des Alveolarfortsatzes des Oberkiefers und der Kieferhöhle nach der Bohrung.

Tab. 1 Ergebnisse der Bohrungen

Modell-Nummer	Bohranzahl	mittlere Bohrtiefe	SD	mittlerer Abstand zum Kieferhöhlenboden	SD	Perforation
1	6	6,8	0,05	0,2	0,05	1 von 6
2	6	7,1	0,06	-0,1	0,07	2 von 6
3	6	6,8	0,1	0,2	0,06	0 von 6
4	6	7,2	0,05	0,1	0,05	2 von 6
5	6	7,2	0,1	-0,3	0,1	2 von 6
6	6	7,3	0,1	0,1	0,1	0 von 6
7	6	7,4	0,05	-0,6	0,05	2 von 6
8	6	7,5	0,04	0,1	0,04	1 von 6
9	6	7,3	0,1	-0,5	0,1	3 von 6
10	6	7,4	0,05	0,2	0,1	0 von 6

SD = Standardabweichung

gewonnen (WICHT et al. 1994, LANEY & TOLAMAN 1989, SOLAR et al. 1999). Der Grund dafür ist in der besseren Auflösung dentaler CTs und damit in einer genauen präoperativen Darstellung des Kieferkamms zu sehen (ROY et al. 1990). Dabei besteht ebenfalls seit mehreren Jahren die Möglichkeit zur dreidimensionalen Visualisierung von CT-Bildern (ROY et al. 1990) und damit die Möglichkeit einer dreidimensionalen Darstellung anatomisch wichtiger verletzungsgefährdeter Strukturen der Kiefer wie des Nervus alveolaris inferior und des Sinusbodens. Die dreidimensionale Diagnostik ermöglicht so dem Operateur eine räumliche Orientierung über die Lage anatomischer Strukturen und ermöglicht ihm, durch präoperative Messungen eine ideale Implantationsstelle zu finden oder über die Notwendigkeit einer Augmentation zu entscheiden. Die genaue Übertragung der Planung konnte dabei bis zur Entwicklung CT-gestützter Navigationstechniken nicht befriedigend in den Operationssitus übertragen werden. Gerade die Entwicklung von Implantaten mit sehr kurzer Schaftlänge und erhöhtem Durchmesser (STELLINGSMA et al. 2000) ermöglicht heute oft die Implantation im Oberkieferseitenzahnbereich ohne Sinusliftoperation. Dabei sollte bei der Verwendung von Kurzimplantaten stets die maximal zur Verfügung stehende Resthöhe des Knochens genutzt werden, ohne eine Perforation zur Kieferhöhle zu bedingen. Neben einer endoskopisch kontrollierten Implantation bietet sich dabei die Möglichkeit einer CT-gestützten navigierten Implantation an (WATZINGER et al. 1999). Die Navigation fand dabei zunächst im Bereich der Neurochirurgie Anwendung (CAVERSACCIO et al. 1997, VRIONIS et al. 1997), wurde jedoch sehr bald von anderen Fachdisziplinen genutzt (WEN et al. 1999). Dabei konnte in der intrakraniellen Chirurgie das exakte Auffinden schwer zugänglicher anatomischer Strukturen erleichtert und in der Schädelbasischirurgie die Schonung anatomischer wichtiger Strukturen erreicht werden (MARMULLA et al. 1997a, MARMULLA & NIEDERDELLMANN 1998). Auf dem Gebiet der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie wurde die Navigation von osteotomierten Segmenten zur Herstellung einer facialis Symmetrie (ZEILHOFER et al. 1997) eingesetzt. Zudem konnte nach präoperativer Planung einer optimalen Profilsituation die exakte intraoperative Umsetzung ermöglicht werden (MARMULLA et al. 1997b). Der Begriff der Exaktheit ist dabei in Relation zur jeweiligen Fragestellung zu werten. So waren bei Weichteilkorrekturmassnahmen intraoperative Navigationsfehler bis zu 2,4 mm tolerierbar (GUNKEL et al. 2000), ermöglichen aber bereits hier keine exakte Umsetzung der präoperativen Planung. In den letzten Jahren wurde jedoch die Präzision der Navigationssysteme erhöht, sodass Planungsfehler (MARMULLA et al.

1997a, HUSSTEDT et al. 1999) unter 1 mm resultierten. Diese Entwicklung machte die intraossäre Navigation ohne sichtbare Kontrolle des Operationsgebietes möglich, sodass anatomisch bedeutende Strukturen wie Gefäße oder Nerven in ihrem intraossären Verlauf nicht geschädigt werden. So wurde auch die prothetisch achsengerechte Insertion dentaler Implantate durch computergestützte Planung und Umsetzung ermöglicht (WATZINGER et al. 1999). Dabei kann durch die Verwendung optischer Trackingsysteme auf der Basis von Infrarot- und Lasersensoren eine interferenzfreie Navigation ermöglicht werden und durch die Verbesserung von Hilfswerkzeugen eine hohe Präzision in der navigierten Chirurgie erreicht werden. Bei Lasersystemen erreicht man dabei Genauigkeiten von 0,3 mm (MARMULLA et al. 1997b). Bei dem hier getesteten Infrarotsystem zeigte sich eine Präzision von 0,2 mm bei Simulation einer Implantatbohrung im Oberkiefer. Durch die Verwendung eines hochpräzisen Hilfswerkzeuges konnte die Registrierung der Referenzierungsmarker und eine geplante Zielbohrung mit grosser Genauigkeit ausgeführt werden. Bei der erreichten Genauigkeit kann man somit mit grosser Wahrscheinlichkeit eine Perforation der Kieferhöhle auch bei nahezu optimaler Ausnutzung der möglichen Implantationslänge ausschliessen. Dabei bietet das Bohrwerkzeug den Vorteil der Navigation eines chirurgischen Instrumentes ohne die Notwendigkeit weiterer Hilfswerkzeuge.

Trotz der hohen Bohrpräzision erfolgte bei 22% der Bohrungen eine geringfügige Perforation des Kieferhöhlenbodens. Da die Penetrationstiefe in die Kieferhöhle mit einem Wert von 0,24 mm als gering zu werten ist und derartige Minimalperforationen im Regelfall in vivo keine grosse Relevanz aufweisen, da das Implantat im apikalen Bereich den Knochen, nicht aber die Schneider'sche Membran perforiert, ist die Bohrpräzision im Oberkiefer zunächst als ausreichend zu bezeichnen. Auch wenn eine Perforation vollständig vermieden werden sollte, kann dies erreicht werden, wenn am Bildschirm ein Mindestabstand von 0,5 mm zur Kieferhöhle eingehalten wird.

Kritischerweise muss allerdings festgestellt werden, dass das Ergebnis dieses Versuchs nur bedingt auf eine Anwendung am Patienten übertragen werden kann. Hier gilt es festzustellen, dass die Genauigkeit der Referenzierung, wie bei jedem anderen System, von der Verschieblichkeit der Referenzierungsmarker abhängig ist. Diese ist bei Hartgeweben besonders gering und kann somit die hohe Präzision der Navigation gewährleisten (WATZINGER et al. 1997). Dies bedeutet, dass auch am Patienten Referenzmarken direkt am Knochen befestigt werden müssen, um die gleiche Präzision wie am Modell zu gewährleisten.

Weiterhin ist am Patienten häufig nur eine eingeschränkte dreidimensionale Einstellung des Bohrwerkzeuges auf Grund anatomischer Vorgaben möglich und sind Eigenbewegungen des Patienten nicht vermeidbar. Falls eine genaue Positionierung und ruhige Führung des Bohrwerkzeuges auch am Patienten möglich sind, was häufig durch dessen Unhandlichkeit wegen der grossen Dimension der daran angebrachten Sensoren erschwert ist, ist auch hier von einer hohen Präzision der navigierten Bohrung auszugehen. Dies gilt es aber erst am Patienten zu erproben.

Erst wenn sich in diesen Versuchen die Übertragungspräzision und der komplikationsarme Einsatz navigierter Bohrwerkzeuge zur Schonung anatomischer Strukturen bei gleichzeitiger Ausnutzung optimaler Implantatlängen zeigt, kann die Navigation auch auf dem Gebiet der Implantologie wesentliche Vorteile bringen. Nichtsdestotrotz kann unter Beachtung der genannten Divergenzen auf Grund der aufgezeigten Versuchsergebnisse der Einsatz am Patienten erfolgen.

## Résumé

L'utilisation d'un système de navigation dirigé par ordinateur à base de scanner (tomographies computerisées) (CT-Scan) a permis d'améliorer la précision chirurgicale dans de nombreuses spécialités de la médecine. Une telle approche présente en outre l'avantage de ne nécessiter le plus souvent qu'une intervention d'une invasivité minimale. Le but de l'étude était d'évaluer la précision du système SMN® (Zeiss, Oberkochen, Allemagne) dans le contexte de navigation de forages implantaires au niveau maxillaire postérieur. Plus particulièrement, l'objectif était de déterminer le potentiel de ce système pour la pose d'implants maxillaires sans perforation du sinus maxillaire. Soixante forages ont été effectués sur dix modèles dupliqués en polyuréthane à partir d'un crâne osseux. Les modèles étaient conçus de sorte à permettre un contrôle visuel direct du sinus à l'aide d'une ouverture crânienne. L'examen par scanner (CT-Scan) a été réalisé par couches d'une épaisseur d'un millimètre. Les données du scanner ont été transmises sur le disque dur du système SMN®, afin de les superposer au modèle fraisé à l'aide de marqueurs attachés à ce dernier. Le modèle a été indexé à l'aide d'un instrument de forage spécial, calibré par rapport au système. Le même instrument de forage a été utilisé par la suite pour la préparation des logements, assistée par navigation. La cible du forage était le plancher du sinus maxillaire. En fait, l'objectif était de se rapprocher le plus possible du plancher sinusien sans pour autant le perforer. La distance entre le fond des logements et le plancher du sinus a été mesurée après section des modèles. En moyenne, une profondeur de forage de 6,97 mm ( $s = 0,4$ ), ainsi qu'une distance par rapport au plancher sinusien de 0,11 mm ( $s = 0,2$ ) ont été trouvées. Dans treize cas une perforation a été constatée. En conclusion, le forage contrôlé par navigation basée sur scanner, permet d'atteindre un haut niveau de précision.

## Summary

SCHULTES G, GAGGL A: **Dental implantation with computer assisted navigation** (in German). *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 111: 828–833 (2001)

The use of CT-based intraoperative navigation has greatly improved controlled surgery in many specialties. In this study the precision of the SMN® system (Zeiss, Oberkochen, Germany) for navigated drilling and following implantation in the maxilla

is evaluated. This study should prove the suitability of navigation systems for computer-assisted implantation in the maxilla to avoid perforation to the maxillary sinus.

Therefore 60 target drills were carried out on 10 standardised polyurethane milling models after CT-scanning. The models were produced with cranial open maxillary sinuses. The CT-scans were performed with a slice distance of 1 mm. Then the CT-data were transferred to the workstation of the SMN® system (Zeiss, Oberkochen, Germany) and a referenciation of the fiducials for superposition of the native and CT model were done. Referenciation of the model was performed with the aid of a drilling tool. This drilling tool was used for later navigation-assisted drilling into the upper jaw. The target of drilling was the maxillary sinus floor. The aim was to come as near as possible without perforation. The distance of the bottom of the drilling holes to the maxillary sinus floor were measured after section of the model.

An average drilling depth of 6.97 mm ( $s = 0.4$ ) and a mean distance to sinus floor of 0.11 mm ( $s = 0.2$ ) was found. In 13 cases the lower border of sinus was perforated.

In conclusion a high precision of CT-based navigation for controlled preimplantological drilling was seen.

## Literaturverzeichnis

- CAVERSACCIO M, LADRACH K, HAUSLER R, STUCKI M, BACHLER R, NOLTE L P, SCHROTH G: Concept of a frameless computer-assisted navigation system at the skull base, the nose and the paranasal sinuses. *Oto Rhino Laryngol Nova* 7: 121–126 (1979)
- GAGGL A, SCHULTES G, SANTLER G, KÄRCHER H: Treatment planning of sinus lift augmentations through use of 3-dimensional milled models derived from computed tomography scans. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 86: 388–392 (1998)
- GAGGL A, SCHULTES G, SANTLER G, KÄRCHER H: Three-dimensional planning of alveolar ridge distraction by means of distraction implants. *Comput Aided Surg* 5: 35–41 (2000)
- GUNKEL A R, THUMFART W F, FREYSINGER W: Computer-aided 3D-navigation systems. Surgery and location determination. *HNO* 48: 75–90 (2000)
- HASSFELD S, ZOLLER J, ALBERT F K, WIRTZ C R, KNAUTH M, MÜHLING J: Preoperative planning and intraoperative navigation in skull base surgery. *J Craniomaxillofac Surg* 26: 220–225 (1998)
- HUSSTEDT H, HEERMANN R, BECKER H: Contribution of low dose CT-scan protocols to the total positioning error in computer-assisted surgery. *Comp Aided Surg* 4/5: 275–280 (1999)
- LANEY W R, TOLAMAN D E: The Mayo Clinic experience with tissue-integrated prosthesis. In: ALBREKTSON T, ZARB G E (Eds): *The Brånemark Osseointegrated Implant*. Quintessenz, Chicago: 165–195 (1989)
- MARMULLA R, WAGENER H, HILBERT M, NIEDERDELLMANN H: Precisions of computer-assisted systems in profile reconstructive interventions on the face. *Mund Kiefer Gesichtschir* 1 (Suppl. 1): 65–67 (1997a)
- MARMULLA R, HILBERT M, NIEDERDELLMANN H: Inherent precision of mechanical, infrared and laser-guided navigation systems for computer-assisted surgery. *J Craniomaxillofac Surg* 25: 192–197 (1997b)
- MARMULLA R, NIEDERDELLMANN H: Computer-assisted bone segment navigation. *J Craniomaxillofac Surg* 26: 347–359 (1998)
- PELEG M, CHAUSHU G, MAZOR Z, ARDEKIAN L, BAKOON M: Radiological findings of the post-sinus lift maxillary sinus: a com-

- puterized tomography follow-up. *J Periodontol* 70: 1564–1573 (1999)
- ROY J N, STEIGER P, LING C C: Overlapped detection and contour-tracking algorithms for critical organs – application to kidney. *Comp Med Imag Graphics* 14: 153–161 (1990)
- SCHOM C, ENGELKE W, KOPKA L, FISCHER U, GRABBE E: Indications for dental CT. Case reports. *Aktuelle Radiol* 6: 317–324 (1996)
- SOLAR P, GAHLEITNER A: Dental CT in the planning of surgical procedures. Its significance in the oro-maxillofacial region from the view point of the dentist. *Radiologe* 39: 1051–1063 (1999)
- STELLINGSMA C, MEIJER H J A, RAGHOEBAR G M, TRIPLETT R G: Use of short endosseous implants and an overdenture in the extremely resorbed mandible: A five-year retrospective study. *J Craniomaxillofac Surg* 58: 382–388 (2000)
- VRIONIS F D, FOLEY K D, ROBERTSON J H, SHEA J J, LAWTON M T, SPETZLER R F, BRACKMANN D E, KELLY P J, DAY J D, MACIUNAS R J: Use of cranial surface anatomic fiducials for interactive image-guided navigation in the temporal bone: A cadaveric study. *Neurosurgery* 40: 755–764 (1997)
- WATZINGER F, WANSCHITZ F, WAGNER A, ENISLIDIS G, MILLESI W, BAUMANN H, EWERS R: Computer-aided navigation in secondary reconstruction of post-traumatic deformities of the zygoma. *J Craniomaxillofac Surg* 25: 198–202 (1997)
- WATZINGER F, BIRKFELLNER W, WANSCHITZ F, MILLESI W, SCHOPPER C, SINKO K, HUBER K, BERGMANN H, EWERS R: Positioning of dental implants using computer-aided navigation and an optical tracking system: case report and presentation of a new method. *J Cranio Maxillofac Surg* 27: 77–81 (1999)
- WEN Q H, ARAI H, SHIMOMURA T, ISHIDA K, TAKEKAWA H, TOMODA K, SUZUKA Y, MURATA H, FURUKAWA M, MIWA T: Advantage of a computer-assisted navigation system in endoscopic sinus surgery. *Rhinology* 37: 98–99 (1999)
- WICHT L, MOEGELIN A, SCHEDEL H, PENTZOLD C, BIER J, LANGER R, FELIX R: A dental CT study for preoperative assessment of maxillary atrophy. *Aktuelle Radiol* 4: 64–69 (1994)
- ZEILHOFER H F, KLIEGIS U, SADER R, HORCH H H: Video matching as intraoperative navigation aid in operations to improve the facial profile. *Mund Kiefer Gesichtschir* 1 (Suppl. 1): 68–70 (1997)