

S. Hümmeke<sup>1</sup>, J. Voßhans<sup>1</sup>, E. Esser<sup>1</sup>

## Navigierte Implantatchirurgie im klinischen Einsatz

Dreidimensionale Diagnostik hat zu einer deutlichen Verbesserung der Planungsmöglichkeiten im Bereich der Implantologie geführt. Die genaue Kenntnis der anatomischen Situation erlaubt es vorhandenes Knochenangebot besser auszunutzen, notwendige Augmentationen vorherzusehen und anatomische Strukturen sicherer zu schonen. Aufgrund der metrischen Genauigkeit der bildgebenden Verfahren kann die ideale Implantatposition, unter Berücksichtigung individueller anatomischer und prothetischer Erfordernisse virtuell auf zehntel Millimeter genau festgelegt werden. Zur intraoperativen Umsetzung der Planung stehen Navigationsverfahren und computerunterstützt angefertigte Bohrschablensysteme zur Verfügung. Während die Systeme in vitro eine Umsetzungsgenauigkeit von <0,5 mm erzielen konnten; stehen klinische Studien aufgrund der problematischen Kontrollmöglichkeit noch aus. Die spezifischen Operationssituation am Patienten lässt Abweichungen von dieser Präzision erwarten.

In der Zeit von November 2002 bis Juli 2003 wurden insgesamt 127 navigierte Implantationen durchgeführt. Die bildgebende Diagnostik erfolgte durch digitale Volumetomographie mit dem Gerät DVT 9000 der Firma NewTom, die virtuelle Implantatplanung und die navigierte Operation mit dem videooptischen Navigationssystem der Firma RoboDent. Der Einsatz des Systems erwies sich als praktikabel. Intraoperativer Befund und postoperative Röntgenkontrolle zeigten bei 89 % der Implantate eine Übereinstimmung mit der geplanten Situation. Eine quantitative Analyse der erzielten Präzision war aufgrund fehlender Kontrollmöglichkeiten nicht möglich.

*Schlüsselwörter: Navigierte Implantatchirurgie, virtuelle Implantatplanung, Computertomographie, Digitale Volumetomographie*

### **Clinical outcome of navigated implant surgery**

Advances in three-dimensional radiographic diagnostics lead to significant improvements in implant planning. Precise knowledge of the individual anatomic situation permits a better use of the local bone available, allows to preview necessary augmentation and to avoid damage of vulnerable anatomical structures. Due to the precision of radiographic imaging, ideal implant positions can be determined in a virtual planning with submillimetric accuracy under respect of the local anatomy and prosthetic considerations. Navigating systems and computer assisted manufactured surgical guides are available to transfer the virtual planning intraoperatively. While these systems show in vitro accuracy <0,5 mm, clinical studies to evaluate the in vivo accuracy are still missing due to a lack of controll possibilities. The specific intraoperative situation probably leads to less accurate results.

From november 2002 to july 2003 we carried out 127 navigated implant surgeries. Three dimensional radiographic data were obtained by digital volume tomography with the DVT 9000 machine of the NewTom company. Virtual implant planning and navigated surgery was performed with the Robodent videooptic navigational system. The intraoperative handling of the system was acceptable, but requires specific attention of the surgical team.

Intraoperative findings and postoperative radiographic controll matched in 89 % with the virtual planning. Quantitative analyses of the achieved precision were not feasible due to a lack of controll methods

*Keywords: Navigated implant surgery, virtual implant planning, Image guided surgery, computed tomography, digital volume tomography*

### **1 Einleitung**

Fortschritte in der dreidimensionalen bildgebenden Diagnostik haben zu einer Dosisreduktion geführt, die Ihre vermehrte Anwendung im Rahmen komplexer implantologischer Planungen erlaubt [10,14,15].

Computertomographie und digitale Volumetomographie [3,9,12,13,19] ermöglichen die Erstellung digitaler Bilddatensätze als Grundlage virtueller Implantatplanungen. Trägt der Patient bei Aufnahmeerstellung eine röntgenopake prothetische Aufstellung, lassen sich zudem bei der folgenden virtuellen Planung prothetische Aspekte in

<sup>1</sup> Abteilung für Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie, Klinikum Osnabrück

Relation zum lokalen Knochenangebot berücksichtigen [11]. Die metrische Genauigkeit der bildgebenden Diagnostik liegt im Submillimeterbereich [3,10,15,19], sodass die idealen Implantatpositionen auf zehntel Millimeter genau festgelegt werden können. Zur intraoperativen Umsetzung dieser hochpräzisen Diagnose und Planungsmöglichkeiten stehen heute Bohrschablonen und videooptische Navigationsverfahren zur Verfügung, bei denen in vitro eine erzielbare Präzision von <0,5 mm nachgewiesen werden konnte. Klinische Studien die das intraoperative Handling und die in vivo erzielbare Umsetzungsgenauigkeit beschreiben, stehen bislang noch aus.

## 2 Material und Methode

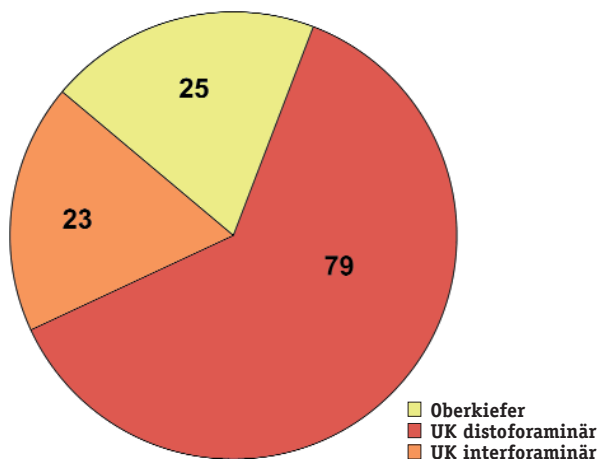
Seit November 2002 wurden bei 42 Patienten 127 Implantate mit intraoperativer Instrumentennavigation geplant (OK 25, UK interforaminär 23, UK distofoaminär 79 Implantate).

Der Behandlungsablauf der navigierten Implantation gliedert sich in:

1. orientierende klinische und radiologische Diagnostik (OPT)
2. Modellanalyse und prothetisches Wax up
3. Anfertigung einer Navigationssschiene (zu ersetzende Zähne röntgenopak)
4. 3-D bildgebende Diagnostik mit Navigationssschiene
5. Datenexport nach DICOM
6. virtuelle Implantatplanung
7. navigierte Operation

Die sichere, schaukelfreie Fixierung der Navigationssschiene im Munde des Patienten erfolgte über die noch vorhandenen Restzähne. Zur radiologischen Visualisierung der zu ersetzenden Zähne wurde dem Kunststoff Bariumsulfat beigemischt, bzw. wurden radioopake Prothesenzähne verwandt.

Die Aquisierung der dreidimensionalen Bilddaten erfolgte mit dem DVT 9000 der Firma NewTom (Marburg). Aus diesen



**Abbildung 1** Lokalisationsverteilung der 127 Implantate bei 42 Patienten

**Figure 1** Localisation of 127 Implants on 42 patients

Rohdaten wurden Axiale in 1 mm Schichten parallel zur Occlusionsebene und somit annähernd senkrecht zur prospektiven Implantatachse generiert.

Der Datenexport erfolgte nach DICOM Standard und mit dem Robodent Planungsmodul die virtuelle Implantatplanung. Die Ausrichtung der Implantate bezüglich Dimension, Insertionsposition und Angulation erfolgte unter Berücksichtigung anatomischer und prothetischer Aspekte. Aus Sicherheitsgründen wurde im Unterkieferseitenzahnbereich ein Mindestabstand zum Canalis mandibularis von 2 mm eingeplant.

Bei der von uns verwendeten passiven Instrumentennavigation nach dem Verfahren der Firma RoboDent erfasst ein Kamerasystem in Echtzeit über optische Marker die Relativposition von Winkelstück und Patientenkiefer. Diese wird am Bildschirm visualisiert und ermöglicht so dem Behandler die Führung des Instruments und Implantation gemäß der Planung [22,23].

Bei sechs Patienten wurde die postoperative Eingliederung eines implantatgetragenen Immediatersatzes angestrebt. Gemäß der Planung wurde eine navigierte Modelloperation durchgeführt und Dummy-Implantate in das Modell inseriert. Provisorische Abutments wurden aufgeschraubt und eine Kunststoffbrücke angefertigt, die in den Bereichen der Abutments ausgeschliffen wurde. Intraoperativ werden nach Wundverschluss die Abutments auf die Implantate geschraubt und die Brücke mit Composite einpolymerisiert. Diskrete Inkongruenzen der Implantatposition zwischen Modell- und Patientensituation können so ausgeglichen und die provisorische Brücke spannungsfrei eingegliedert werden. Zur postoperativen Kontrolle wurde ein OPT angefertigt.

Folgende Faktoren wurden bei der retrospektiven Analyse untersucht:

1. Umsetzbarkeit der Implantatposition im vorgesehenen Bereich
2. Intraoperative Modifikation bzgl. Position, Ausrichtung, Augmentation
3. Annäherung an den C. mandibularis < 2 mm (gemäß OPT)
4. Persistierende sensible Defizite
5. Passung von vorbereitetem Immediatersatz
6. Einschätzung der erzielten Genauigkeit intraoperativ und durch OPT

## 3 Ergebnisse

Von den 127 Implantaten wurden 25 (19,7 %) im Oberkiefer, 79 (62,2 %) im distofoaminären Unterkiefer und 23 (18,1 %) interforaminär geplant.

122 (96,1 %) konnten in den vorgesehenen Bereichen inseriert werden. Bei 14 Implantaten (11,02 %) waren hierzu jedoch intraoperative Modifikationen gegenüber der Planung erforderlich (Korrekturen der Position, der Achse, kleinere Augmentationen wider erwarten).

Bei fünf (3,9 %) Lokalisationen wurde aufgrund der sich intraoperativ darstellenden Situation keine Implantatinsertion vorgenommen (zu schmaler Alveolarkamm, schlechte Knochenqualität).



**Abbildung 2** Navigationskamera und Monitore zur intraoperativen Erfassung und Darstellung von Patientenkiefer und Winkelstückposition

**Figure 2** Navigation camera and monitors for intraoperative registration and visualisation of patient jaw and handpiece position

Eine Immediatversorgung wurde bei sechs Patienten (1 OK, 5 UK) geplant und konnte in allen Fällen durchgeführt werden. Von den 26 hierzu vorgesehenen Implantaten war es aufgrund operationstechnischer Schwierigkeiten, die nicht dem System anzulasten waren (Alveolen bei verzögerter Sofortimplantation), an zwei Lokalisationen nicht möglich die Implantate gemäß der Planung zu inserieren und in die Immediatversorgung mit einzubeziehen. Zwei weitere Implantate konnten aufgrund von Diskrepanzen zwischen Modell- und Patientensituation nicht mit in den Immediatersatz einbezogen werden.

79 (62,2 %) der 127 Implantate wurden im distofoamären Unterkiefer inseriert. Die Planung sah hierbei die Wahrung eines Sicherheitsabstandes von 2 mm vor, dennoch zeigte die aufgrund von Überlagerungs- und Verzerrungseffekten nur bedingt aussagefähige Kontrolle durch ein postoperatives OPT in fünf Fällen eine radiologisch erkennbare Distanz <1 mm. Eine persistierenden Schädigung des N. alveolaris inferior resultierte in keinem Fall.



**Abbildung 3** Navigationsbögen mit optischen Markern an a) Patientmodell und b) Handstück

**Figure 3** Navigation arc with optical markers a) on patient modell and b) handpiece

Das intraoperative Handling war durch die Wahrung einer ständigen Sichtverbindung der Navigationsbögen mit dem Kamerasystem und die häufig notwendige Verwendung von Bohrer Verlängerungen erschwert.

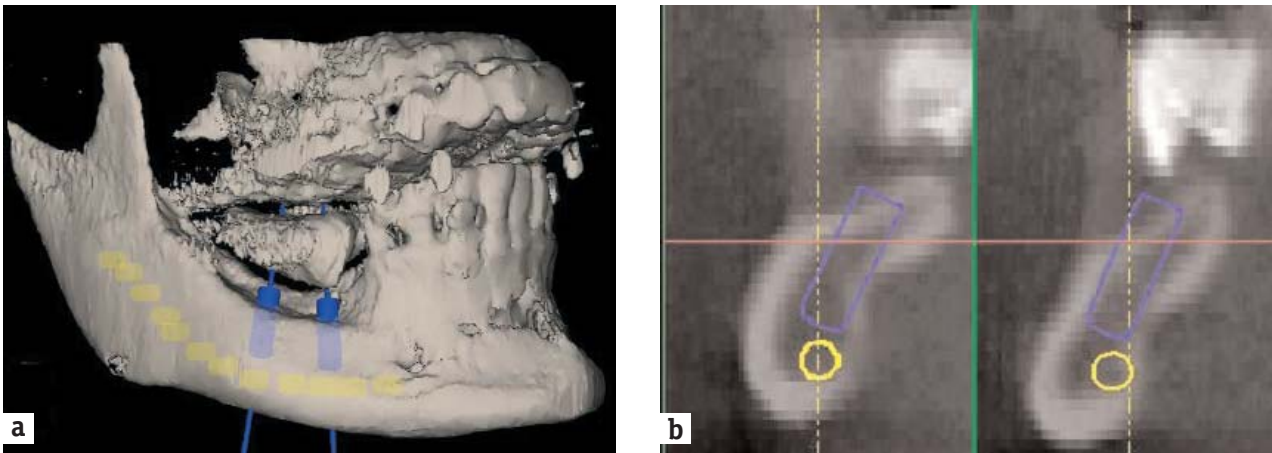
Gegenüber einer konventionellen Implantation zeigte sich der praeoperative Planungsaufwand deutlich erhöht, wobei ein intraoperativer Zeitgewinn nur bei Implantationen ohne Aufklappen resultierte. Als vorteilhaft erwies sich die Flexibilität des Systems, die durch einfachen intraoperativen Wechsel in den Planungsmodus Korrekturen der Implantatposition erlaubt.

#### 4 Diskussion

Dosisreduzierte Computertomographie und digitale Volumentomographie bieten heute die technischen Voraussetzungen dreidimensionale Bilddatensätze mit einer für die Planung komplexer implantologischer Rehabilitationen vertretbaren Strahlenbelastung zu generieren [2,11,14,15]. Die in zahlreichen Studien nachgewiesene metrische Genauigkeit liegt im Bereich von 0,3–0,5 mm und ist daher als Datengrundlage für eine implantologische Planung hinreichend präzise. [1,10,11,15]

Planungssoftware ermöglicht die virtuelle Implantatplanung innerhalb dieser Bilddatensätze mit der gleichen Genauigkeit. Die Herausforderung liegt heute darin, die intraoperative Umsetzung der erzielten Planungsgenauigkeit mit einem vertretbaren prae- und intraoperativem Aufwand zu erzielen [3,6,11,17]. Kommerziell stehen hierzu Bohrschablonen und Navigationsverfahren zur Verfügung. Die in vitro Genauigkeit verschiedener Bohrschablonen und Navigationssysteme liegt bei 0,2 bis 1 mm [3,4,8,14,18,20,21,22].

Unsere Erfahrung zeigte jedoch, dass die im klinischen Einsatz erzielbare Präzision deutlich geringer ist. Die Interpretation der bildgebenden Diagnostik, Schwierigkeiten mit der sicheren Fixierung der Navigationsschiene, die manuelle Unruhe des Operateurs, Bewegungen des Patienten und die Notwendigkeit der Wahrung einer permanenten Sichtverbindung zwischen optischen Markern und Kamerasystem führen im klinischen Einsatz zu Abweichungen von der theoretisch erzielbaren Genauigkeit.



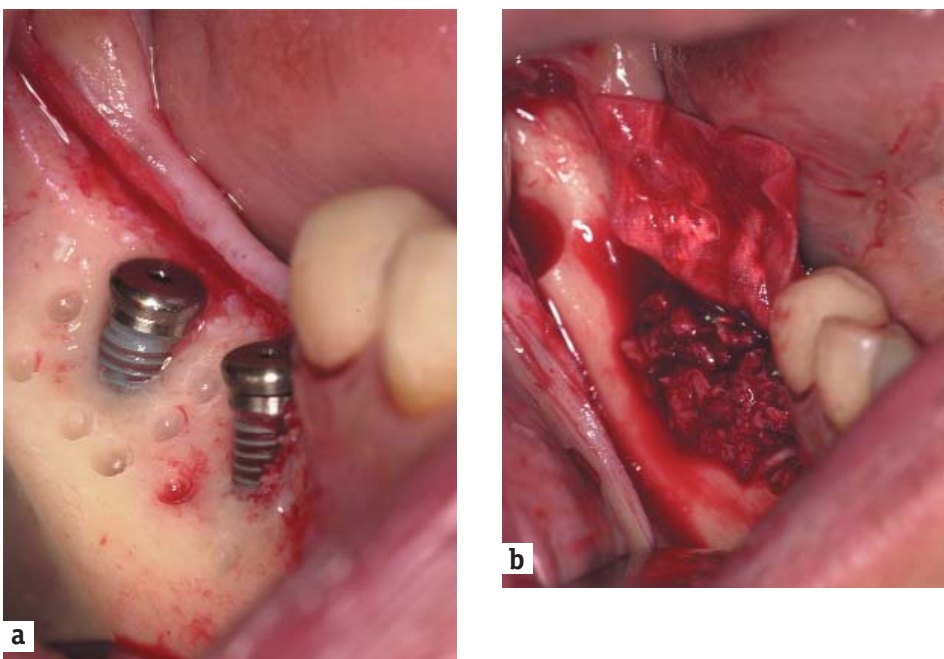
**Abbildung 4** Darstellung a) dreidimensional und b) im Querschnitt der geplanten Implantate regio 46 und 47 mit notwendiger Augmentation

**Figure 4** Visualisation a) three-dimensional and b) crosssectional of planned implants regio 46 and 47 with necessary augmentation

Bislang gibt es noch keine Studien, welche die Genauigkeit des Systems in der klinischen Anwendung untersucht haben. Messverfahren, die es in vivo ermöglichen würden, die Kongruenz der Planungssituation mit der operativ realisierten Implantatposition zu vergleichen stehen momentan noch nicht zur Verfügung. Das Ziel dieser ersten klinischen Pilotstudie war die Praktikabilität des Verfahrens in der klinischen Anwendung zu untersuchen und die Umsetzungsgenauigkeit am Patienten anhand klinisch erfassbarer Faktoren zu untersuchen.

Von den 127 vorgesehenen navigierten Implantationen konnten 122 (96 %) an den vorgesehenen Lokalisationen inseriert werden, bei 16 (12,6 %) waren jedoch intraoperativ Modifikationen der Angulation oder des Insertionspunktes nach intraoperativer Darstellung des OP-Situs erforderlich, um unnötige Perforationen oder Augmentationen zu vermeiden. Navigationsverfahren bieten im Gegensatz zu Bohrschablonsystemen intraoperative Fle-

xibilität. Insbesondere bei sehr schmalen Kieferkämmen, deren Ausdehnung anhand der bildgebenden dreidimensionalen Diagnostik manchmal nicht eindeutig zu beurteilen ist, erwies sich die Möglichkeit intraoperativ in den Planungsmodus der Navigationssoftware zu wechseln und kleine Korrekturen der Insertionsposition durchzuführen als hilfreich. Bei sechs Patienten wurde implantatgetragener Immediatersatz vorbereitet und konnte postoperativ in allen Fällen in geplanter Weise eingegliedert werden. Jedoch konnten zwei der geplanten 26 Implantate aufgrund Diskrepanz zur Modelloperation und zwei weitere aufgrund intraoperativer Schwierigkeiten bei der Eingliederung am avisierten Implantationsort nicht mit in den Immediatersatz einbezogen werden. Als vorteilhaft gegenüber anderen Formen der Sofortversorgung ergibt sich der wesentlich reduzierte Behandlungsbedarf am Operationstag und der Wegfall von weiteren Manipulationen am



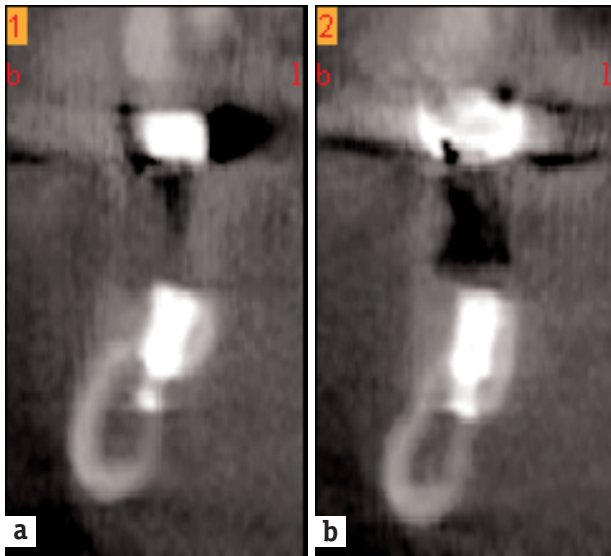
**Abbildung 5**

a) Navigiert inserierte Implantate entsprechend der Planungssituation  
b) nach geplanter Augmentation

**Figure 5**

a) Image guided inserted implants according to virtual planning  
b) after planned augmentation





**Abbildung 6** Radiologische Kontrolle (DVT) entspricht der Planungssituation (vgl. Abbildung 4)

**Figure 6** Radiographic control (DVT) correlates to virtual planning (see figure 4)

Implantat durch Wechsel von Abutments, da das Provisoriums bereits im Vorfeld angefertigt wird.

Bei fünf der 79 distofoaminär inserierten Implantate zeigte die radiologische OPT-Kontrolle einen Abstand zum Canalis mandibularis <1 mm, obgleich ein Sicherheitsabstand von 2 mm vorgesehen war. Rückschlüsse auf die tatsächliche Distanz zum Canalis sind aufgrund der verzerrenden, überlagernden Darstellung des OPT dennoch nur bedingt möglich [5,12,14,16].

Beim operativen Einsatz muss neben der klinisch relevanten Gesamtgenauigkeit aus virtueller Planung und intraoperativer Umsetzung auch die Handhabung des Systems Berücksichtigung finden [3,11,17]. Im Vergleich zu einer konventionellen Implantatinsertion zeigte sich das intraoperative Handling des Systems praktikabel, dennoch beansprucht die erforderliche Wahrung der Sichtverbindung zwischen Kamerasystem und optischen Markern an den Navigationsschienen eine Adaption des Operateurs und der Assistenz. Aufgrund von Interferenz mit der Schiene ist der Einsatz von Bohrererlängerungen relativ häufig erforderlich, so dass bei Implantationen im Seitenzahnbereich eine ausreichende Mundöffnung des Patienten berücksichtigt werden muss.

Zeitvorteile im Vergleich zu einer konventionellen Implantation ergaben sich nur im Falle eines geschlossenen Vorgehens wenn auf die Präparation eines Mukoperiostlappens verzichtet wurde.

Die Gesamtgenauigkeit des Systems ist in hohem Masse von der sicheren lagestabilen Fixierung der Navigationsschiene am Kiefer des Patienten sowohl während der radiologischen Untersuchung als auch in identischer Position intraoperativ abhängig [4,7]. In Abhängigkeit vom Restzahnbestand kann diese Fixierung deutlich erschwert sein, oder macht im Falle zahnloser Kiefer sogar die Insertion von Interimsimplantaten erforderlich, die vor der dreidimensionalen Diagnostik inseriert werden müssen und

somit möglicherweise mit den idealen definitiven Implantatpositionen interferieren. Dieser behandlerische und finanzielle Mehraufwand führte dazu, dass wir die Anwendung des Navigationsverfahrens in unserem Patientengut in zahnlosen Kiefern bislang nicht indiziert sahen.

Indikationen die unserer Erfahrung nach den Aufwand rechtfertigen sind:

- Distofoaminäre Implantationen im Unterkieferseitenzahnbereich
- Implantatgetragene Immediatversorgung
- Minimalinvasive Implantationen bei ausreichendem lokalem Knochenangebot
- Nutzung von ortständigem Knochen unter Vermeidung von augmentativen Techniken

Routinemäßig zum Einsatz kommt das Navigationsverfahren in unserer Klinik im Unterkieferseitenzahnbereich bei anteriorem Restzahnbestand. Die Navigationsschiene lässt sich bei dieser Indikation gut an der Restbezahnung fixieren und die erhöhte intraoperative Sicherheit vor iatrogenen Schädigung des N. alveolaris inferior im Rahmen der Implantation rechtfertigt den erhöhten planerischen und intraoperativen Aufwand. Eine Quantifizierung der metrischen Umsetzungsgenauigkeit des Verfahrens am Patienten ist aufgrund fehlender klinischer Kontrollmöglichkeiten bislang nicht möglich. Prospektive multizentrische Studien zur Validierung der klinischen Behandlungsergebnisse befinden sich in Vorbereitung.

## Literatur

1. Cavalcanti MG, Yang J, Ruprecht A, Vannier MW: Validation of spiral computed tomography for dental implants, *Dentomaxillofac Radiol* 1998;27,329-333
2. Ekestubbe A, Grondahl K, Ekholm S, Johansson PE, Grondahl HG: Low-dose tomographic techniques for dental implant planning, *Int J Oral Maxillofac Implants* 1996;11,650-659
3. Fortin T, Champeboux G, Bianchi S, Buatois H, Couderc JL: Precision of transfer of preoperative planning for oral implants based on cone-beam CT-scan images through a robotic drilling machine, *Clin Oral Implants Res* 2002;13,651-656
4. Gaggl A, Schultes G, Karcher H: Navigational precision of drilling tools preventing damage to the mandibular canal, *J Craniomaxillofac Surg* 2001;29,271-275
5. Garg AK, Vicari A: Radiographic modalities for diagnosis and treatment planning in implant dentistry, *Implant Soc* 1995;5,7-11
6. Hassfeld S, Brief J, Krempien R, Raczakowsky J, Münchenberg J, Giess H, Meinzer HP, Mende U, Wörn H, Mühling J.: Computer-assisted oral, maxillary and facial surgery, *Radiologe* 2000;40,218-226
7. Hassfeld S, Brief J, Stein W, Ziegler C, Redlich T, Raczakowsky J, Krempien, R, Mühling, J: Navigationsverfahren in der Implantologie- Stand der Technik und Perspektiven, *Implantologie* 2003;4,373- 390
8. Hassfeld S, Mühling J: Comparative examination of the accuracy of a mechanical and an optical system in CT and MRT based instrument navigation, *Int J Oral Maxillofac Surg* 2000;29,400-407
9. Hassfeld S, Stein W: Dreidimensionale Planung für die dentale Implantologie anhand computertomographischer Daten, *Dtsch Zahnärztl Z* 2000;55,313-325
10. Hassfeld S, Streib S, Sahl H, Stratmann U, Fehrenz D, Zoller J: Low-dose computerized tomography of the jaw bone in pre-implantation diagnosis. Limits of dose reduction and accuracy of distance measurements, *Mund Kiefer Gesichtschir* 1998;2,188-193
11. Heurich T, Brief J, Hassfeld S: Perfektion in der Implantologie durch computerunterstützte Implantatplanung und deren operative Umsetzung - Möglichkeiten und Grenzen, *Implantologie* 2000;11,9-26
12. Hirsch E, Visser H, Graf HL: Präimplantäre Röntgendiagnostik- Informationsbedarf versus Strahlenbelastung, *Implantologie* 2002;10,291-302
13. Hümmeke S, Voßhans J, Esser E: Diagnostische Möglichkeiten der digitalen Volumentomographie (DVT), *Die Quintessenz* 2003;54,1105-1112
14. Jacobs R: Preoperative radiologic planning of implant surgery in compromised patients, *Periodontol* 2003;33, 12- 25
15. Kornas M, Hassfeld S, Mende U, Zöller J: Metrische Genauigkeit der CT-Analyse vor enossaler Implantation, *Dtsch Zahnärztl Z* 1998;53,120-126

16. Lam EW, Ruprecht A, Yang J: Comparison of two-dimensional orthoradially reformatted computed tomography and panoramic radiography for dental implant treatment planning, *J Prosthet Dent* 1995;74,42-46
17. Meyer U, Wiesmann HP, Runte C, Fillies T, Meier N, Lueth T, Joos U.: Evaluation of accuracy of insertion of dental implants and prosthetic treatment by computer-aided navigation in minipigs, *Br J Oral Maxillofac Surg* 2003;41,102-108
18. Modica F, Fava C, Benecch A, Preti G: Radiologic-prosthetic planning of the surgical phase of the treatment of edentulism by osseointegrated implants: an in vitro study, *J Prosthet Dent* 1991;65,541-546
19. Mozzo P, Procacci C, Tacconi A, Martini PT, Andreis IA: A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results, *Eur Radiol* 1998;8,1558-1564
20. Sarment DP, Sukovic P, Clinthorne N: Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide, *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003;18,571-577
21. Schermeier O, Hildebrand D, Lueth T, Hein. A, Szymanski D, Bier J: Accuracy of an Image Guided System for Oral Implantology, *Computer Assisted Radiology and Surgery* 2001
22. Schermeier O, Lueth T, Cho C, Hildebrand D, Klein M, Nelson K, Bier J: The Precision of the RoboDent System - An in Vitro Study, *Computer Assisted Radiology and Surgery CARS* 2002
23. Schermeier O, Lueth T, Glagau J, Szymanski D, Tita R, Hildebrand D, Klein M, Nelson K, Bier J.: Automatic patient registration in computer assisted maxillofacial surgery, *Medicine Meets Virtual Reality (MMVR)* 2002; 23-26

**Korrespondenzadresse:**

Dr. Stefan Hümmeke  
Klinikum Osnabrück  
Abteilung für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie  
Am Finkenhügel 1  
49076 Osnabrück  
Tel: 0541 / 4054600  
Fax: 0541 / 4054699  
E-Mail: s.huemmeke@gmx.de

**[online curriculum]**

Bitte beachten Sie

die Fragen zu dem Text auf [www.zahnheilkunde.de](http://www.zahnheilkunde.de)