


## Redaktion

E. Esser, Osnabrück  
 S. Haßfeld, Dortmund

 plus Video

Nutzen Sie auch das Videomaterial zur „Dentalen Navigation“ in der elektronischen Version des Beitrags! Folgen Sie diesem Pfad: [www.DerMKG-Chirurg.de](http://www.DerMKG-Chirurg.de) → Online-Archiv → Beitrag → Supplementary HTML

Die computergestützte dentale Implantologie unterstützt den Chirurgen bei der Bildgebung, Planung und Durchführung eines Eingriffs sowie bei der anschließenden Dokumentation. Die Ziele dabei sind:

- die Umsetzung einer präoperativen Planung mit einer Genauigkeit von <math><1\text{ mm}</math>,
- der Schutz von Risikostrukturen,
- die Erhöhung der Sicherheit für den Patienten und
- die Dokumentation des Eingriffs und der Ergebnisse.

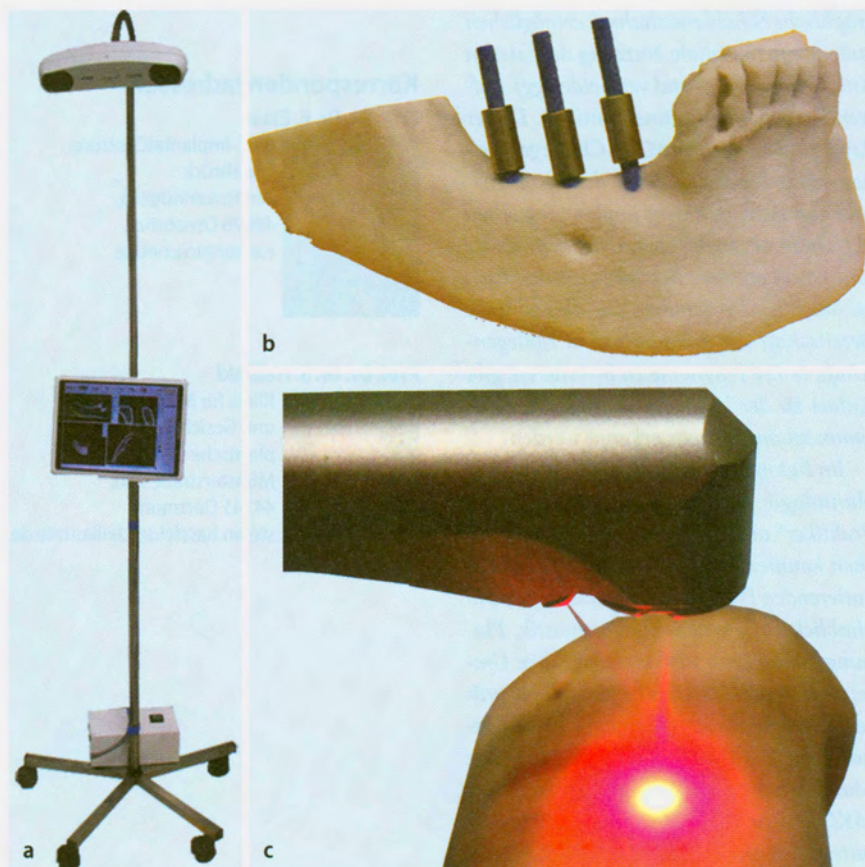
Zum Erreichen dieser Ziele wurden und werden verschiedene Systeme entwickelt. Navigationssysteme und Bohrschablonen unterstützen den Chirurgen beim genauen intraoperativen Umsetzen der Planung während des Eingriffs. Der Trend bei den Navigationssystemen geht zur einfachen Bedienung und kleinen transportablen Bauform (**Abb. 1 a**). Auch für die Bohrschablonen werden aktuell neue Herstellungsverfahren entwickelt. Damit soll die eigenständige Fertigung einer Bohrschablone anhand einer computerbasierten Planung ermöglicht werden (**Abb. 1 b**). Auch neue Instrumente mit Vorteilen für die spätere Einheilung der Implantate wie Laser lassen sich durch die Kombination mit computergestützten Assistenzsystemen einsetzen (**Abb. 1 c**).

S. Stopp<sup>1,2</sup> · T. Maier<sup>1,2</sup> · T.C. Lüth<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> MIMED, Lehrstuhl Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, Technische Universität München, Garching

<sup>2</sup> IMETUM, Zentralinstitut für Medizintechnik, Technische Universität, München

## Neue Verfahren in der computergestützten dentalen Implantologie

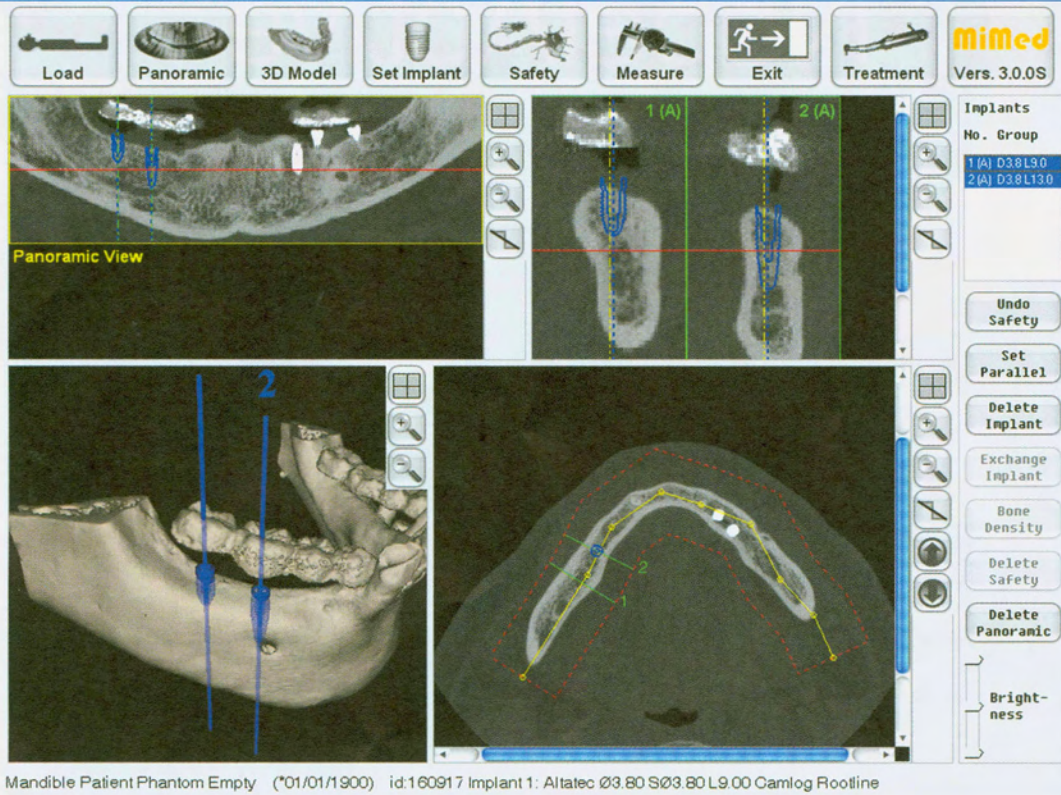


**Abb. 1** ▲ Aktuelle Entwicklungen für die dentale Implantologie. **a** Kompaktes Navigationssystem der Firma RoboDent, **b** 3-D-Druck von Patientenkiefen mit integrierten geplanten Implantatachsen und aufgeschobenen Bohrhülsen für die eigenständige Bohrschablonenherstellung, **c** Implantatbettpräparation mit einem Laser der Firma KaVo

Des Weiteren werden Systeme entwickelt, um die Qualitätskontrolle und Dokumentation eines Eingriffs zu ermögli-

chen, ohne dabei Nachteile, wie sie durch den Einsatz von Röntgenstrahlung (CT) entstehen, in Kauf nehmen zu müssen.





**Abb. 2** ◀ Planung mit der Software der Firma RoboDent. Basierend auf importierten Bilddaten werden die für die Beurteilung des Knochenangebots und zur Ausrichtung der Implantate benötigten Ansichten berechnet

## Computergestützte Verfahren in der dentalen Implantologie

Im Folgenden wird ein Überblick über die einzelnen Schritte, die eingesetzten Geräte und möglichen Verfahren in der dentalen Implantologie gegeben.

### Bildgebung

Die präoperative Bildgebung kann in zwei- und dreidimensionale Verfahren unterteilt werden.

Das Standardverfahren für die präoperative Bildgebung ist die zweidimensionale Orthopantomographie (OPG). Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in der geringen Strahlungs dosis. Die diagnostische Verwertbarkeit ist aber durch die Zweidimensionalität begrenzt. Des Weiteren handelt es sich beim OPG nicht um ein kalibriertes bildgebendes Verfahren. Damit kann einem Grauwert in den Bilddaten nicht eindeutig eine Dichte und damit eine bestimmte Gewebeart zugeordnet werden.

Für die computergestützte Planung und Durchführung eines Eingriffs werden zumeist dreidimensionale bildgebende Verfahren wie Computertomo-

graphie (CT) oder digitale Volumentomographie (DVT) eingesetzt. Die CT beruht auf einer schichtweisen Bildaufnahme.

### Der entscheidende Vorteil der CT-Aufnahme gegenüber anderen dreidimensionalen Verfahren besteht in der Kalibrierung der Grauwerte.

Diese werden in Hounsfield-Einheiten angegeben. Damit lässt sich einem Grauwert in den Bilddaten eine Gewebeart zuordnen und eine Segmentierung beispielsweise der Knochenoberfläche automatisch durchführen. Des Weiteren können basierend auf den kalibrierten Bilddaten auch eingebrachte Marker eines bestimmten Materials, wie beispielsweise Titan, automatisch segmentiert und für automatische Registrierungsverfahren [7, 14] eingesetzt werden.

Bei der DVT wird – anders als bei der CT mit schichtweise aufgezeichneten Daten – ein Volumen aufgenommen. Damit ist die DVT grundsätzlich für die spätere computergestützte Planung und Durchführung des Einsatzes geeignet. Jedoch sind die Bilddaten nicht kalibriert. Dies hat zur Folge, dass der Benutzer die Seg-

mentierung der Knochenoberfläche manuell durchführen muss.

### Planung

Die Planung des Eingriffs kann entsprechend dem verwendeten präoperativen bildgebenden Verfahren in zwei- und dreidimensionale Planungsverfahren unterschieden werden. Dabei lässt sich auch eine Kombination aus der Planung am Gipsmodell und zweidimensionaler OPG-Aufnahme verwenden. Die Aufgaben der Planung in der dentalen Implantologie sind:

- Definieren von Sicherheitsbereichen (beispielsweise Nervenverläufe) und
- Definieren der Implantatlagen.

Die dreidimensionale Planung für die computergestützte Präparation des Knochens wird auf der Basis der präoperativ akquirierten 3-D-Bilddaten durchgeführt. Folgende Schritte sind für die Planung eines computergestützten Eingriffs notwendig:

- Einlesen der Bilddaten,
- Einzeichnen der Panoramalinie,
- Generieren des 3-D-Modells,



- Auswählen und Ausrichten der Implantate und
- Einzeichnen des Nervenverlaufs.

Die Bilddaten, welche als Basis für die Planung dienen, werden von einer CD, DVD oder per PACS in die Planungssysteme importiert. Durch die Verwendung des DICOM-Standards lassen sich Daten unterschiedlicher bildgebender Systeme unabhängig vom jeweiligen Hersteller einlesen.

Aus diesen Bilddaten werden die benötigten Ansichten für die Planung errechnet (Abb. 2). Dafür wird in einem ersten Schritt eine Panoramalinie eingezeichnet und entlang dieser Linie eine Panoramaansicht berechnet. Diese stellt die Bilddaten in einer OPG-ähnlichen Weise dar und ermöglicht eine intuitive Orientierung. Neben der Panoramaansicht wird aus den eingelesenen Bilddaten ein 3-D-Modell berechnet und dargestellt. Werden für die Planung CT-Daten verwendet, kann die für die Darstellung des 3-D-Modells benötigte Knochenoberfläche automatisch segmentiert werden. Bei nicht kalibrierten Bilddaten (z. B. DVT) muss eine manuelle Einstellung des Schwellenwerts erfolgen (Abb. 3).

### Bei nicht kalibrierten Daten wird der Schwellenwert manuell eingestellt

In der Panoramaansicht kann der Nervenverlauf (Unterkiefer) erkannt und eingezeichnet werden. Des Weiteren lassen sich geplante Implantate hinsichtlich Position und Orientierung ausrichten.

Zusätzlich wird für jedes geplante Implantat ein Querschnitt („cross section“) des Kiefers an der entsprechenden Stelle dargestellt. In dieser Ansicht kann die Implantatachse auf den späteren Aufbau ausgerichtet werden.

Die Planungsdaten können gespeichert und exportiert werden. Sie lassen sich dann für die Herstellung einer Bohrschablone oder für eine navigierte Implantation verwenden.

### Schablonenherstellung

Die Herstellung von Bohrschablonen kann als zusätzlicher Schritt der Planung ange-

## Zusammenfassung · Abstract

MKG-Chirurg 2008 · 1:10–21 DOI 10.1007/s12285-008-0011-z  
© Springer Medizin Verlag 2008

S. Stopp · T. Maier · T.C. Lüth

### Neue Verfahren in der computergestützten dentalen Implantologie

#### Zusammenfassung

Die computergestützte dentale Implantologie ist ein sich ständig entwickelndes Gebiet. Sie umfasst Bildgebung, Planung und die Unterstützung des Chirurgen während des Eingriffs sowie die postoperative Dokumentation. Zahlreiche Verfahren und Systeme haben sich bereits in der klinischen Praxis etabliert. Dreidimensionale Bildgebungsverfahren ermöglichen u. a. eine computerbasierte präzise Planung. Dabei kann die genaue Lage von Implantaten präoperativ festgelegt werden. Für die intraoperative Umsetzung der Planung stehen Bohrschablonen und Navigationssysteme zur Verfügung.

In der Entwicklung befinden sich bereits Systeme, welche basierend auf den Navigati-

onsdaten die Leistung eines Bohrers steuern und somit eine Fehlbehandlung vermeiden. Unter Zugrundelegung der positionsabhängigen Leistungssteuerung werden Ansätze zum sicheren Einsatz von Lasern für die Fertigung von Implantatbetten entwickelt. Neue Fertigungsmethoden erlauben auch die eigenständige Herstellung von Bohrschablonen. Für die Dokumentation der Eingriffe entstehen Verfahren zur strahlungsfreien Vermessung der Lage inserierter Implantate.

#### Schlüsselwörter

Dentale Implantologie · Computergestützt · Navigation · Leistungssteuerung · Assistenz

### New methods in computer-aided dental implantology

#### Abstract

Computer-aided dental implantology is a constantly evolving field of research. Besides imaging and planning of dental interventions, research also focuses on computer assistance during surgery and postoperative documentation. Numerous methods and systems have been established in clinical practice. Among these, three-dimensional imaging methods are used as the basis for precise computer-aided planning of interventions, which enables the surgeon to define the position of an implant preoperatively. Intraoperatively, the surgeon is able to set implants according to the planning by using drill guides or navigation systems.

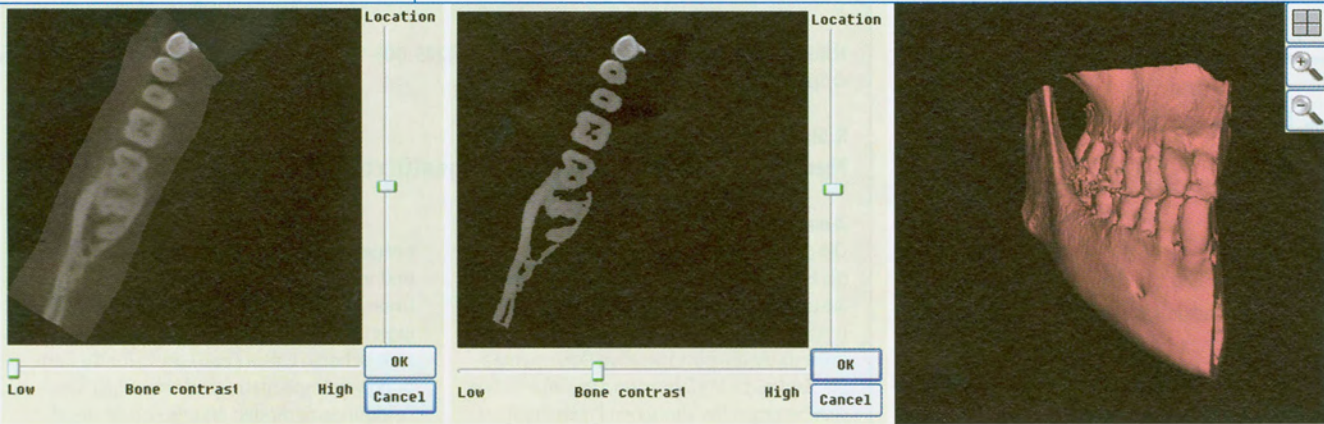
Recent developments include systems which can control the tool power based on

navigation data. This principle is applied to control a drill or a laser for cavity creation, whereas the tool can only be enabled by the surgeon if the tool is situated in the planned area. This enables the safe use of lasers for creation of implant beds. Additionally, new manufacturing methods, such as 3-D printing, allow in-house fabrication of drill guides according to the planning. Concerning documentation of dental interventions, new methods for measuring the position and orientation of inserted implants have been proposed.

#### Keywords

Dental implantology · Computer-aided · Navigation · Power control · Assistance





**Abb. 3 ▲** Manuelle Segmentierung von DVT-Daten zur Erstellung eines 3-D-Modells. Dieser Schritt ist bei der Verwendung nicht kalibrierter Bilddaten notwendig und entfällt bei CT-Daten



**Abb. 4 ▲** Navigationssysteme für dentale Implantologie: **a** RoboDent NaviBase, **b** RoboDent NaviPanel

sehen werden. Sie erfolgt entweder klassisch mit einem Gipsmodell oder computergestützt auf der Basis einer dreidimensionalen Planung. Beim zweitgenannten Verfahren wird eine Bohrschablone mithilfe der Stereolithographie oder durch eine computergesteuerte Fräse erzeugt. Ei-

ne weitere Möglichkeit der Herstellung einer Bohrschablone besteht darin, Bohrlöcher und Bohrhülsen durch eine navigierte Fräse einzubringen.

Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Herstellung von Bohrschablonen im 3-D-Druckverfahren. Der

Vorteil dieser neuen Methode besteht darin, dass auf einen zusätzlichen Bissabdruck und eine externe Schablonenfertigung verzichtet werden kann.

### Präparation

Die intraoperative Umsetzung der Planung kann freihändig, mit Bohrschablone oder mit computergestützter Navigation erfolgen. Neben den klassischen Bohrern lassen sich auch Laser für das Präparieren der Implantatbetten einsetzen. Bei der Umsetzung der Planung mit Bohrschablonen wird die Lage des Bohrers durch die Bohrhülsen in der Schablone vorgegeben.

Für die Navigation haben sich Systeme mit optischen Messsystemen etabliert. Über solche Messsysteme kann die Lage des verwendeten navigierten Bohrerhandstücks relativ zum Patienten vermessen werden, wobei das Handstück mit einem optischen Messkörper (Tracker) ausgestattet wird. Bei den Trackern werden solche zur Einmalverwendung und autoklavierbare unterschieden. Zwei Systeme der Firma RoboDent, NaviBase und NaviPanel, werden in **Abb. 4 a** und **4 b** gezeigt.

### ► Für die Navigation haben sich Systeme mit optischen Messsystemen etabliert

Für die Darstellung der aktuellen Instrumentenlage zum Patienten und zu den präoperativen Planungs- und Bilddaten muss der Übergang zwischen den Bild- und Planungsdaten und den optischen Messdaten ermittelt werden. Dieser als Patientenregistrierung bezeichnete Vor-



gang kann prinzipiell auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden:

- durch Landmarkenregistrierung,
- durch Oberflächenregistrierung oder
- durch automatische Markerregistrierung.

Aufgrund der geforderten hohen Genauigkeiten in der dentalen Implantologie hat sich die automatische Markerregistrierung durchgesetzt. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht neben der hohen Genauigkeit darin, dass es bei kalibrierten Bild-daten (CT) automatisch ohne zusätzliche Benutzerinteraktion durchgeführt werden kann. Die Patientenregistrierung erfolgt dabei über eine Bisschiene mit Titanmarkern [14].

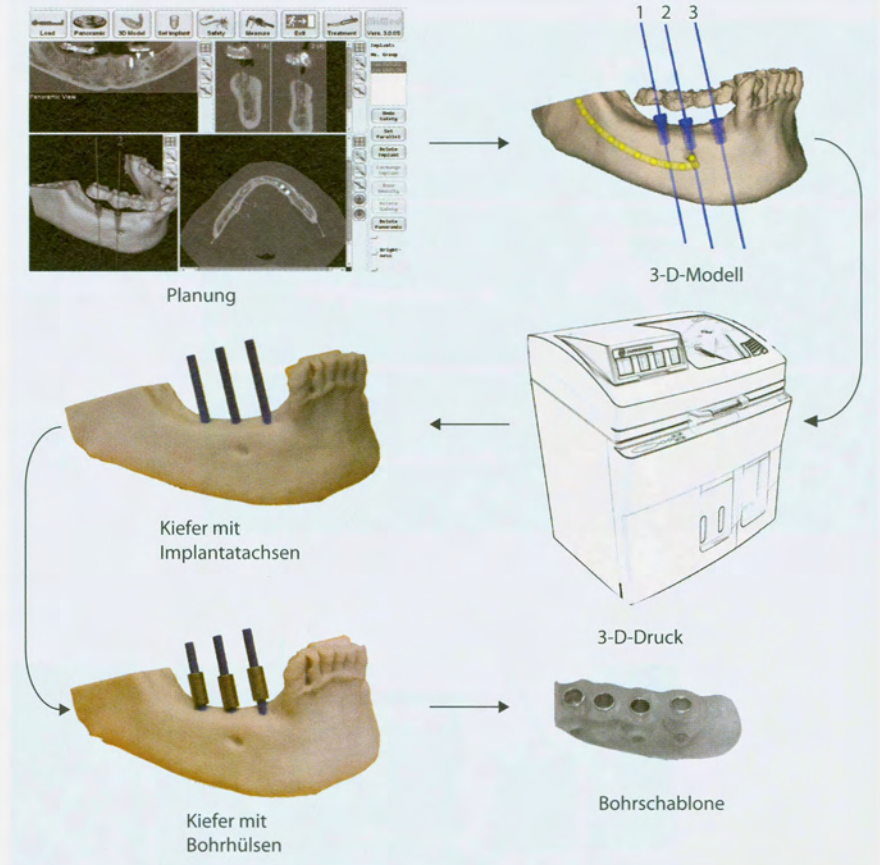
Es konnte gezeigt werden, dass unter Berücksichtigung der gesamten Fehlerkette eine Genauigkeit von  $<1$  mm erreicht wird. Durch diese hohe Genauigkeit und das intuitive Bedienkonzept sind die Systeme praxistauglich einsetzbar [6].

### Postoperative Kontrolle

Die postoperative Kontrolle der Lage von Dentalimplantaten erfolgt zumeist anhand radiologischer Daten, die mit der OPG, CT oder DVT erhoben werden. Ein Vergleich mit der präoperativen Planung ist dabei nicht möglich. Das Computer- und digitale Volumentomogramm erlauben eine dreidimensionale Bewertung der Implantatlage. Für die intraoperative Dokumentation des Bohrvorgangs stellten Szymanski u. Lüth [22] ein Protokollierungssystem vor. Dieses speichert die Lage des Instrumentes relativ zum Patienten auf der Basis der Navigationsinformationen.

In der Forschung werden zur Auswertung von Implantatpositionen zumeist postoperative CT-Aufnahmen verwendet. Diese werden dann den präoperativen CT-Daten angeglichen [9, 12]. Somit lässt sich die postoperative Situation mit der präoperativen vergleichen [5, 10, 13, 23, 24, 25].

Diese Methode wurde beispielsweise für Verifizierung der Implantatlage nach einer bohrschablonen- [13, 24] oder navigationsgestützten [5] Implantation eingesetzt. Für den Vergleich der CT-Daten existieren Softwarelösungen. Der Ab-



**Abb. 5** ▲ Ablauf der eigenständigen Herstellung von Bohrschablonen ohne zusätzlichen Bissabdruck mit 3-D-Druck [17]

gleich basiert hierbei auf dem sog. Mutual Information Algorithmus [9, 12, 27].

### Die Kontrolle kann auch strahlungsfrei durchgeführt werden

Es wurde jedoch gezeigt, dass sich die dreidimensionale Kontrolle von Implantatpositionen auch strahlungsfrei auf der Basis optischer Messung durchführen und dokumentieren lässt [19].

### Aktuelle Trends

Ausgehend von aktuellen Problemen in der navigierten dentalen Implantologie werden neue Ansätze für die Planung und Umsetzung dentalimplantologischer Eingriffe verfolgt und umgesetzt. Diese Ansätze umfassen neben der stetigen Verbesserung der existierenden Navigationssysteme hinsichtlich Größe der Systeme und Instrumente auch neue Herstellungsverfahren für Bohrschablonen, die Integrati-

on innovativer Instrumente wie Laser und die strahlungsfreie Vermessung und Dokumentation der intra- und postoperativen Implantatlagen.

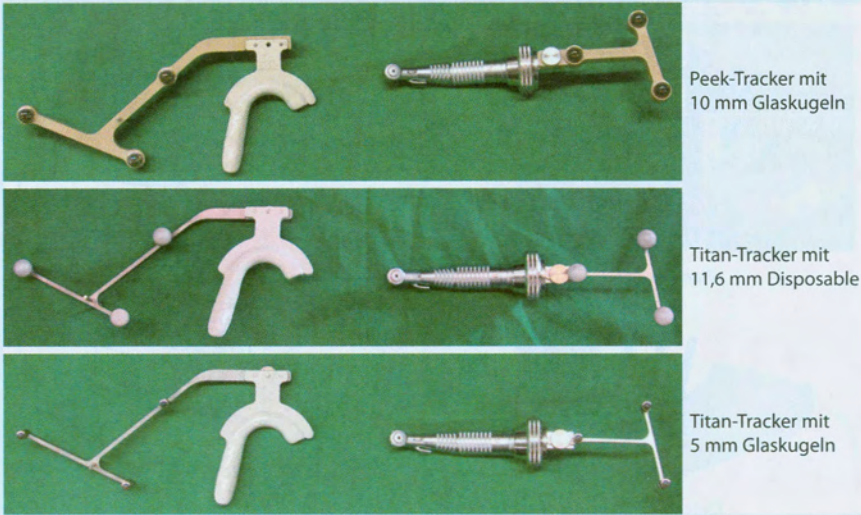
### Eigenständiges Herstellen planungsbasierter Bohrschablonen

Soll die computerbasierte Planung mit einer Bohrschablone erfolgen, erweitert sich die Planung um den Schritt der Bohrschablonenherstellung, die in der Regel von einer externen Firma durchgeführt wird.

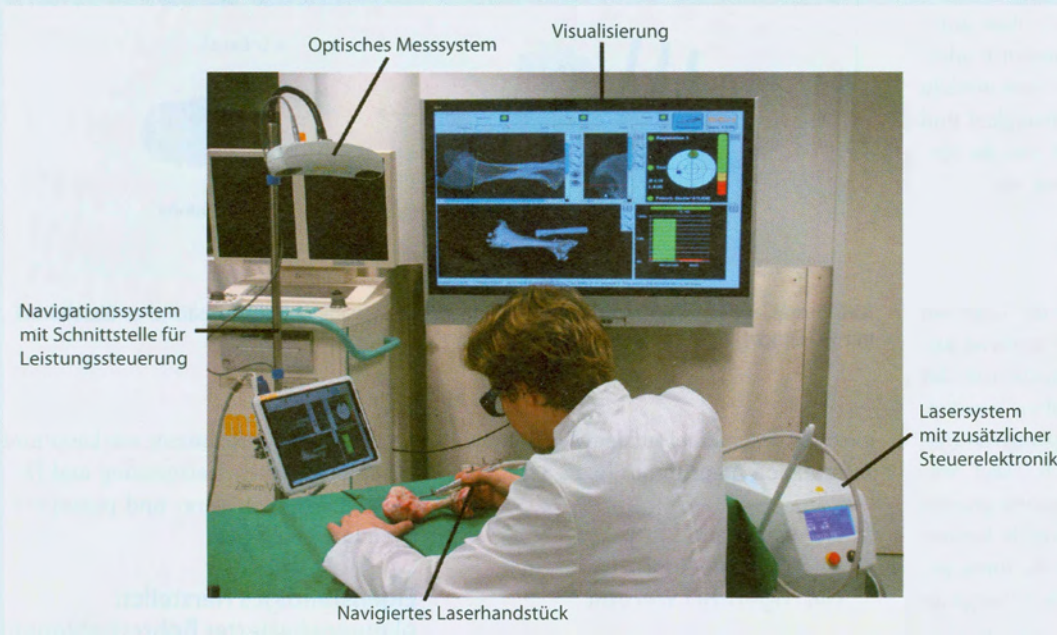
Um dem Chirurgen oder Zahntechniker zu erlauben, planungsbasierte Schablonen ohne zusätzlichen Bissabdruck eigenständig zu fertigen, werden aktuell Verfahren zur Herstellung mit einem 3-D-Drucker entwickelt und realisiert. Neben der Zeitersparnis soll die Preisentwicklung von 3-D-Druckern dabei auch eine preiswerte Fertigung ermöglichen [17].

Der Herstellungsprozess der Bohrschablone mit einem 3-D-Drucker





**Abb. 6** ◀ Navigationsinstrumente mit unterschiedlichen Reflektoren für die dentale Implantologie. Links ist jeweils der Patiententracker mit Bisschiene und rechts das navigierte dentale Bohrerhandstück dargestellt



**Abb. 7** ◀ Versuchsaufbau für das Lasern von Kavitäten für Implantate mit navigierter Leistungssteuerung. Rechts ist der Laser zu sehen, links das Navigationssystem mit optischem Messsystem. Die Darstellungen des Navigationssystems wurden zusätzlich auf einen Plasmabildschirm ausgegeben [18]

läuft dabei in folgenden Schritten ab (Abb. 5):

- Durchführung der Planung auf der Basis präoperativer dreidimensionaler Bilddaten,
- Erzeugung eines 3-D-Modells mit den geplanten Implantatachsen,
- Druck des Kiefermodells mit den geplanten Implantatachsen,
- Aufsetzen von Bohrhülsen auf die Implantatachsen des gedruckten Modells und
- Fertigen einer Bisschiene mit eingeschlossenen Bohrhülsen.

Voraussetzung für die Fertigung einer Bohrschablone mit einem 3-D-Drucker ist die Kalibrierung der Druckerparameter für eine ausreichende Maßhaltigkeit des gedruckten Kiefermodells. Dadurch wird gewährleistet, dass die auf dem gedruckten Kiefermodell gefertigte Bohrschablone exakt auf den Patientenkiefer passt. Der Vorteil der Kalibrierung besteht darin, dass sie nur einmal durchgeführt werden muss und anschließend mehrfach verwendet werden kann.

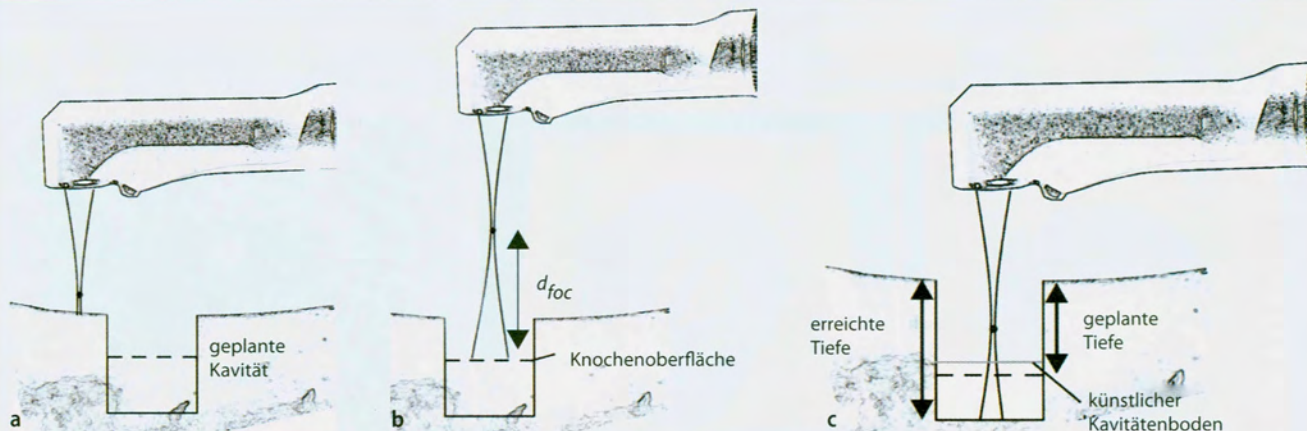
Das Verfahren erlaubt eine eigenständige Herstellung von Bohrschablonen

ohne zusätzlichen Bissabdruck innerhalb weniger Stunden.

### Neue optische Messkörper für die Navigation

Für die Navigation in der dentalen Implantologie stehen kommerziell erhältliche und in der Praxis erprobte Navigationssysteme zur Verfügung. Als System für die Vermessung der Lage eines Bohrerhandstücks relativ zum Patienten haben sich passive optische Messsysteme durchgesetzt. Diese basieren auf der





**Abb. 8** ▲ In folgenden Fällen dürfen keine Laserpulse mehr freigegeben werden: **a** Der Laserstrahl zielt auf Gewebe außerhalb des geplanten Bereichs. **b** Der Abstand  $d_{foc}$  zwischen Fokus und Knochenoberfläche ist zu groß. Deshalb wird nicht genügend Energie zur Überschreitung der Ablationsschwelle eingebracht. **c** Der Kontaktpunkt des Lasers mit der Gewebeoberfläche liegt unterhalb der geplanten Region. Die Tiefe wurde überschritten

Ausendung von Infrarotlicht und der Reflektion auf den Reflektorkugeln der einzelnen Marker der Tracker. Eine Besonderheit stellen die Tracker der Firma RoboDent dar. Hier werden anstelle der nur einmal verwendbaren Disposable-Kugeln Glaskugeln eingesetzt. Diese haben den Vorteil, dass sie gereinigt, sterilisiert und damit wiederholt verwendet werden können.

- Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Glaskugeln das auftreffende Infrarotlicht wesentlich besser reflektieren.

Damit können die optischen Tracker am Patienten und am Bohrerhandstück wesentlich verkleinert und somit kleinere Tracker gefertigt werden. In **Abb. 6** sind Navigationsinstrumente mit unterschiedlichen Reflektoren für die dentale Implantologie dargestellt.

### Navigated Control Bohrer

Eine Erweiterung der Navigationssysteme sind solche mit positionsabhängiger Leistungssteuerung (Navigated Control). Dabei wird auf der Basis der Navigationsdaten die Leistung eines aktiven Instruments in Abhängigkeit von seiner Position gesteuert [8]. Einen Bedarf für dieses Verfahren gibt es in folgenden Situationen [7]:

- Der Bohrer oder Fräser befindet sich nicht mehr an der richtigen Position.
- Die Bohrachse weicht zu stark ab.

- Die gewünschte Bohrtiefe wurde erreicht.
- Der Bohrer nähert sich einer sensiblen Struktur (Nerv) zu sehr.
- Ein definiertes Gewebvolumen wurde bereits abgetragen.
- Der Fräser verlässt das Arbeitsgebiet oder erreicht ein Sicherheitsgebiet.

Damit werden die Sicherheit für den Patienten und der Komfort für den Chirurgen erhöht. Der Chirurg ist nicht mehr auf die visuelle Darstellung der Navigationsdaten angewiesen, sondern kann sich auf den Situs konzentrieren. Das System verringert beispielsweise die Drehzahl einer Fräse, wenn sie sich einer sensiblen Struktur nähert.

### Navigated Control Laser

Der Einsatz von Lasern für die Präparation von Implantatbetten bietet den Vorteil der geringeren Knochenschädigung und damit der Verkürzung der Einheilzeit der Implantate [1, 2, 3, 4, 11, 15]. Den Vorteilen der Lasertechnik stehen aber prinzipbedingte Nachteile gegenüber.

### ► Den Vorteilen der Lasertechnik stehen prinzipbedingte Nachteile gegenüber

So verliert der Chirurg das haptische Feedback und die Tiefenkontrolle beim Knochenabtrag. Um die Vorteile der Lasertechnik dennoch nutzen zu können, werden Assistenzsysteme entwi-

ckelt, die auf optischer Navigation und lageabhängiger Leistungssteuerung basieren [16, 20]. Durch eine Kombination des Lasersystems mit einem Navigationssystem, einem Volumenmodell des Knochens und einem mathematischen Modell kann der Abtrag berechnet und visualisiert werden (**Abb. 7**). Die Berechnungen der Modelle werden dann für die Steuerung des Lasers verwendet. Über eine zusätzliche Schnittstelle kann die Freigabe von Laserpulsen vom Assistenzsystem unterbunden werden. Dies geschieht in folgenden Fällen (**Abb. 8**):

- Der Laser ist nicht auf die in der Planung definierte Struktur gerichtet.
- Der Laserbrennpunkt ist zu weit von der Knochenoberfläche entfernt. (Die Qualität des Laserabtrags ist schlecht.)
- Die geplante Tiefe der Kavität ist an der Stelle, auf die der Laser gerichtet ist, bereits erreicht.

Damit können anhand einer Planung tiefenbegrenzte Kavitäten für Implantate gefertigt werden. In **Abb. 9** ist die Visualisierung der Abtragsberechnung und das tatsächliche Ergebnis auf dem Knochen dargestellt.

### 3-D-Vermessung von Implantaten

Für die Beurteilung der Lage des gesetzten Implantats und für einen Vergleich mit der Planung wird das Ergebnis dreidimensional vermessen. Der Chirurg



Lasern von Kavitäten mit Navigated Control  
 Der Durchmesser der Kavitäten beträgt 4,5 mm, Laserenergie: 600 mJ, Pulsfrequenz 10 Hz

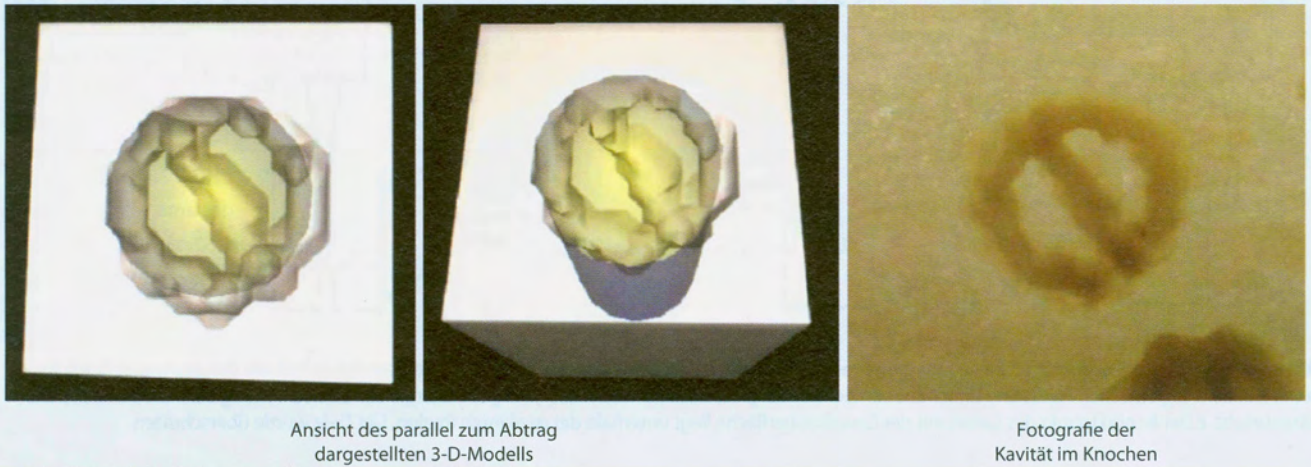


Abb. 9 ▲ Darstellung des Laserabtrags parallel zur Bearbeitung

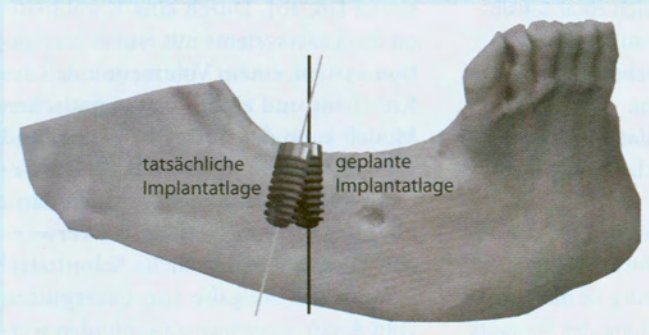


Abb. 10 ◀ Unterschiede zwischen der geplanten Implantatlage und dem tatsächlichen Ergebnis. Geringe Winkelabweichungen des Implantats können über die gesamte Implantatlänge an der Implantat Spitze zu einer Verschiebung von mehreren Millimetern führen

muss beurteilen, ob die Tiefe, die Position und die Ausrichtung des Implantats mit der Planung übereinstimmen (▣ Abb. 10). Da anzunehmen ist, dass Strahlenbelastungen im abheilenden Gewebe ungünstige Reaktionen hervorrufen [21] und die Knochenheilung gehemmt wird [26], sollten möglichst wenige Röntgenaufnahmen gemacht werden. Aus diesem Grund muss die Aufnahme von CT-Daten als ungünstig angesehen werden. In OPG-Aufnahmen mit geringerer Strahlenbelastung ist jedoch keine dreidimensionale Beurteilung der Implantatlage oder ein Vergleich zur präoperativen Planung möglich.

Für den strahlungsfreien dreidimensionalen Vergleich der intra- und postoperativen Lage der inserierten Implantate werden aktuell Verfahren und Systeme entwickelt, welche auf optischer Vermes-

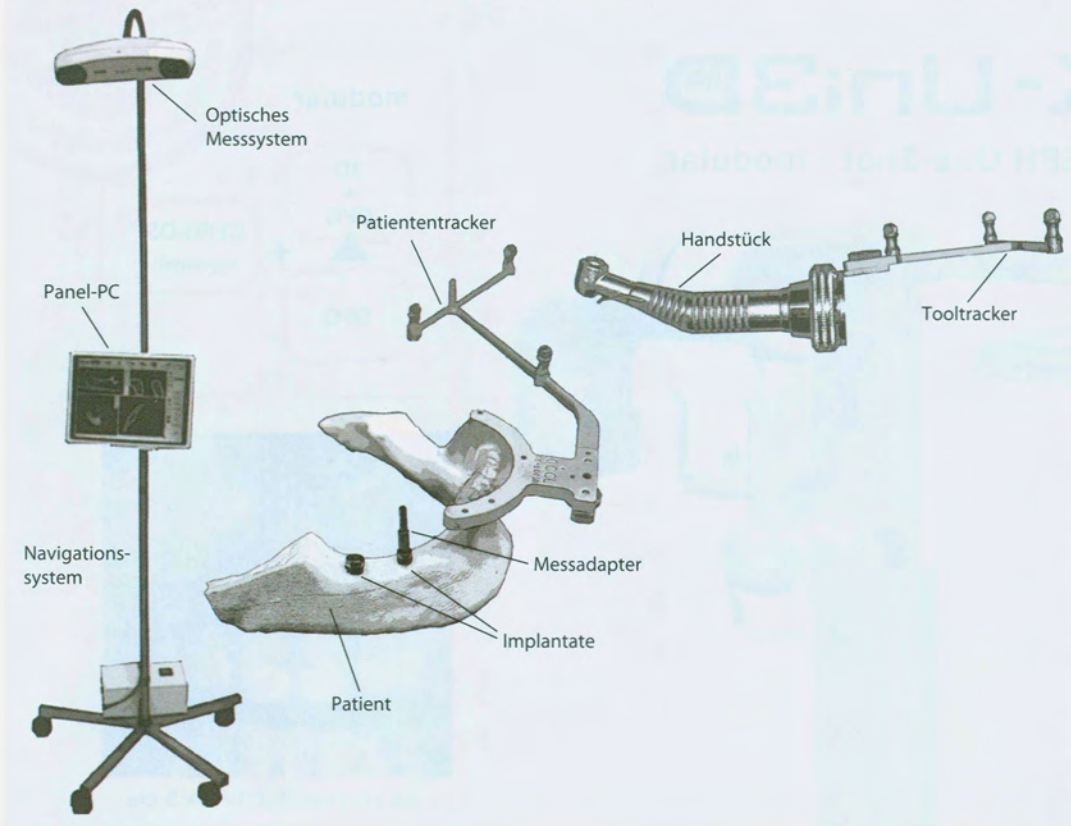
sung basieren [19]. In ▣ Abb. 11 sind die Komponenten eines Systems zur Vermessung der Implantatlage dargestellt. In das Innengewinde eines eingesetzten Implantats wird ein Messadapter eingeschraubt und auf diesen ein navigiertes dentales Handstück aufgesetzt. Der Patient trägt während der Vermessung eine Bisschiene mit einem optischen Tracker. Die Lage des Handstücks wird über das optische Messsystem des Navigationssystems relativ zum Patienten und zu den Planungsdaten vermessen. Über den Messadapter und die bekannte Größe und Form des eingesetzten Implantats kann die Position und Lage des Implantats bestimmt werden. Des Weiteren ist ein Vergleich zur Planung möglich.

Der klinische Einsatz einer solchen Vermessung wird in ▣ Abb. 12 veranschaulicht.

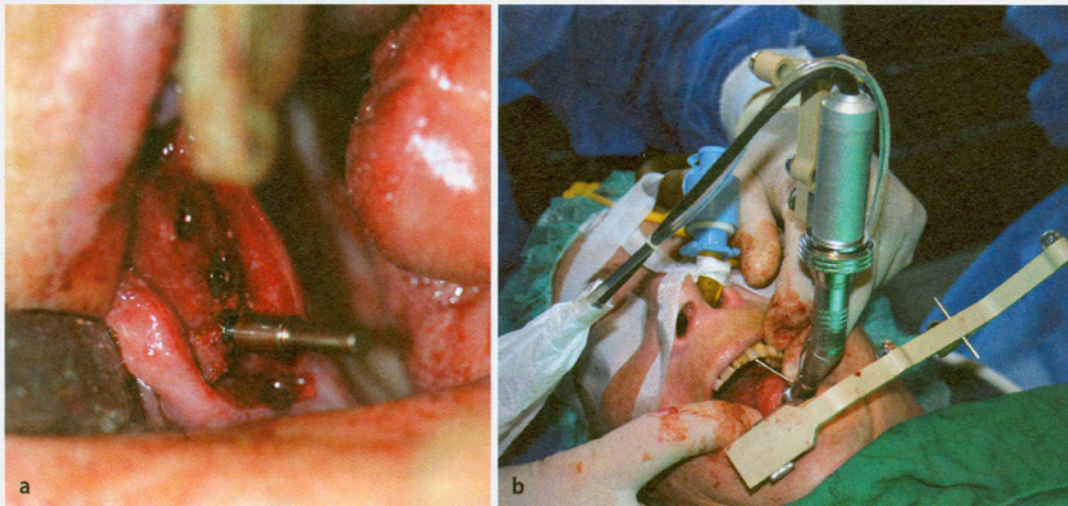
### Fazit für die Praxis

Die erzielten Fortschritte in der computergestützten dentalen Implantologie ermöglichen schon heute ein präzises und sicheres Einbringen von Implantaten. Durch den Einsatz von Navigationssystemen kann eine präoperative Planung intraoperativ umgesetzt werden, ohne Nachteile wie lange Wartezeiten und eine eingeschränkte Kühlung des Bohrkanals in Kauf nehmen zu müssen, wie es beim Einsatz von Bohrschablonen der Fall ist. Zukünftige Entwicklungen zum eigenständigen Fertigen von planungsbasierten Bohrschablonen könnten zumindest den Nachteil der Herstellungszeit minimieren. Die Verwendung von Lasern zur schonenden Knochenbearbeitung wird durch den Einsatz der Navigation und





**Abb. 11** ◀ Dargestellt sind die Hauptkomponenten eines Systems zur strahlungsfreien Implantatvermessung [19]. Über das Navigations-system mit Panel-PC und optischem Messsystem kann die Lage des Bohrerhandstücks relativ zum Patienten vermessen werden. Dafür werden jeweils optische Tracker verwendet. Über das Handstück erfolgt dann mit einem Messadapter die Berechnung der Lage des Implantats im Patientenkiefer



**Abb. 12** ◀ Klinischer Einsatz. **a** Der Messadapter wird in ein gesetztes Implantat eingeschraubt. **b** Auf den eingeschraubten Messadapter wird das navigierte dentale Handstück gesteckt. Die Lage des Implantats kann somit vermessen werden

der lageabhängigen Steuerung der Leistung ermöglicht werden. Ob diese Systeme mit dem Bohrer als Standardinstrument konkurrieren können, wird die zukünftige Entwicklung zeigen.

**Korrespondenzadresse**

S. Stopp



MIMED, Lehrstuhl Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, Technische Universität München Boltzmannstraße 15, 85748 Garching sebastian.stopp@tum.de

**Interessenkonflikt.** Prof. Lüth ist Gründer der Firma RoboDent.

**Literatur**

1. Bornstein E (2004) Proper use of Er:YAG lasers and contact sapphire tips when cutting teeth and bone: scientific principles and clinical application. Dent Today 23: 84–89



2. Charlton A, Dickinson MR, King T, Freemont A (1990) Erbium-YAG and Holmium-YAG laser ablation of bone. *Lasers Med Sci* 5: 365–373
3. Chryssikopoulos S (2003) Er:YAG and CO2 lasers in oral implantology: a study on 83 implants. *J Oral Laser Appl* 3: 97–103
4. Chryssikopoulos S (2003) Transgingivale Implantation im Unterkiefer mit einem Erbium:YAG-Laser. *Implantologie Journal* 2: 46–48
5. Hoffmann J, Westendorff C, Gomez-Roman G, Reinert S (2005) Accuracy of navigation-guided socket drilling before implant installation compared to the conventional free-hand method in a synthetic edentulous lower jaw model. *Clin Oral Implants Res* 16: 609–614
6. Kah R, Hildebrand D, Schermeier O (2002) Implantatnavigation – ein ausgereiftes System in der klinischen Anwendung. *DZW Spezial* 5: 13–17
7. Lüth T, Bier J (2007) Neue Technologien in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. In: Horch HH (Hrsg) *Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie*. Elsevier Urban & Fischer, München, S 37–56
8. Lüth T, Bier J, Bier A, Hein A (2001) Verfahren und Gerätesystem zum Materialabtrag oder zur Materialbearbeitung. Patent DE 101 17 403 C2
9. Maes F, Collignon A, Vandermeulen D et al. (1997) Multimodality image registration by maximization of mutual information. *IEEE Trans Med Imaging* 16: 187–198
10. Meyer U, Wiesmann HP, Runte C et al. (2003) Evaluation of accuracy of insertion of dental implants and prosthetic treatment by computer-aided navigation in minipigs. *Br J Oral Maxillofac Surg* 41: 102–108
11. Olivier W (2004) Das COMPRESS®-Implantat in einer Er:YAG-laserpräparierten Knochenkavität. *ZMK* 20: 745–747
12. Pluim JP, Maintz JB, Viergever MA (2003) Mutual information-based registration of medical images: a survey. *IEEE Trans Med Imaging* 22: 986–1004
13. Sarment DP, Sukovic P, Clinthorne N (2003) Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *Int J Oral Maxillofac Implants* 18: 571–577
14. Schermeier O, Lueth T, Glagau J et al. (2002) Automatic patient registration in computer assisted maxillofacial surgery. *Stud Health Technol Inform* 85: 461–467
15. Schwarz F, Olivier W, Herten M et al. (2007) Influence of implant bed preparation using an Er:YAG laser on the osseointegration of titanium implants: a histomorphometrical study in dogs. *J Oral Rehabil* 34: 273–281
16. Stopp S, Deppe H, Lueth T (2008) A new concept for navigated laser surgery. *Lasers Med Sci* (in press)
17. Stopp S, Deppe H, Lueth T (2007) Manufacturing drill templates for dental implantology using a 3D printer. 4th International CAS-H Conference Proceedings, pp 144–146
18. Stopp S, Deppe H, Lüth T (2007) Model and navigation based laser ablation of bone. Proceedings of the 21st International Congress of Computer-Assisted Radiology and Surgery (CARS), Vol 2, p 479
19. Stopp S, Lüth T (2007) Ein neues Verfahren zur bildfreien Kontrolle der postoperativen Genauigkeit navigiert gesetzter Implantate. *Biomed Tech (Berl)* 52: 234–242
20. Stopp S, Svejdar D, Deppe H, Lueth TC (2007) A new method for optimized laser treatment by laser focus navigation and distance visualization. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 1: 1738–1741
21. Strid KG (1985) Radiologische Untersuchungsverfahren. In: Brånemark PI, Zarb GA, Albrektsson T (Hrsg) *Gewebeintegrierter Zahnersatz, Osseointegration in klinischer Zahnheilkunde*. Quintessenz, Berlin, S 313–328
22. Szymanski D, Lüth T (2004) An automatic intervention documentation system for dental navigation systems. Proceedings of the 18th International Congress of Computer-Assisted Radiology and Surgery (CARS), Vol 2, p 1387
23. Valente F, Schirolli G, Sbrenna A (2007) Accuracy and clinical outcomes of computer-aided oral implant surgery: a preliminary study on 25 patients. Proceedings of the 21st International Congress of Computer-Assisted Radiology and Surgery (CARS), Vol 2, pp 415–417
24. Steenberghe D van, Malevez C, Van Cleynenbrugel J et al. (2003) Accuracy of drilling guides for transfer from three-dimensional CT-based planning to placement of zygoma implants in human cadavers. *Clin Oral Implants Res* 14: 131–136
25. Wanschitz F, Birkfellner W, Watzinger F et al. (2002) Evaluation of accuracy of computer-aided intraoperative positioning of endosseous oral implants in the edentulous mandible. *Clin Oral Implants Res* 13: 59–64
26. Weibrich G, Wagner W (2004) Operatives Vorgehen. In: Koeck B, Wagner W (Hrsg) *Implantologie*. Elsevier Urban & Fischer, München, S 99–157
27. Wells WM III, Viola P, Atsumi H et al. (1996) Multi-modal volume registration by maximization of mutual information. *Med Image Anal* 1: 35–51

## Orthopädisch-chirurgische Implantate und Allergien



Die Implantatallergie ist ein relativ seltenes, aber nicht zu vernachlässigendes Phänomen. Oft fällt eine Abgrenzung zu Infektionen schwer, da sich die Symp-

tome oberflächlich ähneln. Umso mehr ist eine frühe Diagnose sehr wichtig, da der Therapieerfolg hiervon entscheidend abhängt. Die Springer-Fachzeitschrift „Der Orthopäde“, Ausgabe 02/2008, behandelt dieses Thema im CME-Fortbildungsbeitrag. Hierbei gehen die Autoren detailliert auf die Auslöser der Allergie (meist Metalle und Knochenzementkomponenten) bzw. Diagnose-, Therapie- und Vermeidungsmöglichkeiten ein. Insgesamt stellen sie den aktuellen Stand der Forschung auf diesem Gebiet übersichtlich dar.

Dieses Heft beinhaltet zudem Beiträge zu folgenden Themen:

- Spondyloepiphysäre und metaphysäre Dysplasie
- Diagnostik und Therapie der Osteogenesis imperfecta
- Mukopolysaccharidosen
- Hyperphosphatasie und Hypophosphatasie im Kindesalter
- Die kinderorthopädische Bedeutung der Achondroplasie und Hypochondroplasie

Bestellen Sie diese Ausgabe zum Preis von EUR 31,- bei:

Springer Distribution Center  
Kundenservice Zeitschriften  
Haberstr. 7  
69126 Heidelberg  
Tel.: +49 6221-345-4303  
Fax: +49 6221-345-4229  
subscriptions@springer.com

[www.DerOrthopaede.de](http://www.DerOrthopaede.de)