

Ziel der folgenden Studie war, den Prototypen eines neuen modularen Planungs- und Navigationssystems für die dentale Implantologie, genannt *Mona Dent* (Abb. 1), hinsichtlich der Bedienerführung, der Rüstzeiten, Flexibilität der Aufstellung des Navigationssystems und der Sicherheit zu evaluieren.

Ein neues Planungs- und Navigationssystem für die dentale Implantologie

ERSTE UNTERSUCHUNGEN IM BEZUG AUF ERGONOMIE UND PRÄZISION

Eine genaue Analyse der bestehenden anatomischen Verhältnisse und eine sorgfältige präoperative Planung sollten einer Implantatinsertion vorausgehen. Die Planung kann heutzutage basierend auf 3D-Bildaten mit Hilfe von CAD-Programmen erfolgen. Entscheidend ist die Übertragung dieser virtuellen Planung auf den realen Patientensitus.

Neben der Nutzung von Bohrschablonen leistet diese Übertragung die Instrumentennavigation. Sie bietet darüber hinaus ein Maxi-

mum an intraoperativer Flexibilität. Die Instrumentennavigation kann so einerseits für unerfahrene Chirurgen und andererseits in schwierigen Fällen mit geringem Knochenangebot auch für erfahrene Implantologen sehr hilfreich sein.

Für den Implantologen sind bei der Nutzung computergestützter Planungs- und Navigationssystemen eine einfache und übersichtliche Bedienerführung, kurze Rüstzeiten und maximale Flexibilität in Bezug auf die Aufstellung des Navigationssystems bei gleichzeitig hoher Sicherheit und Präzision von entscheidender Bedeutung für die effektive und kostendeckende Nutzung solcher Systeme.

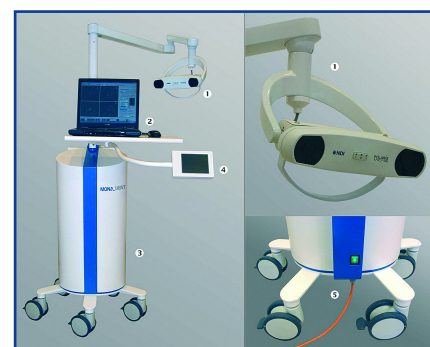


Abb. 1: Die Komponenten des neuen Planungs- und Navigationssystems *Mona Dent* sind eine Infrarot-Kamera (1), Notebook (2), Chassis (3), 5-Zoll-TFT-Display (4), standfestes Drehgestell (5).

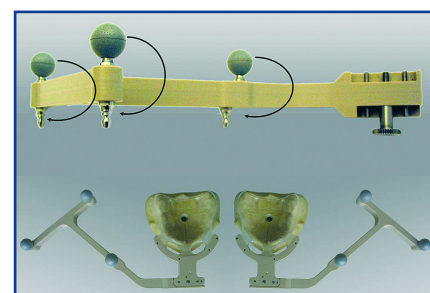


Abb. 2: Patiententracker: Auf beiden Seiten mit je drei passiven Markern in unterschiedlicher Geometrie bestückbar.

ermöglicht es dem Implantologen, die Implantate frei und interaktiv in Echtzeit in den CT-Daten zu bewegen und dabei in 2-D-Ansichten und als 3-D-Bilder darzustellen. So können verschiedene Therapieoptionen beurteilt und die Therapie optimiert werden.

Hardware

Für die Planungs- und Navigationsprozeduren wird ein Notebook mit einem Intel-Pentium-M740-Prozessor mit 1,73 GHz, 1024 MB RAM,

Die Autoren dieses Beitrags

Dr. med. Dr. med. dent. Stephan Weihe,
Dr. med. Dr. med. dent. Eric-Peter Franz,
Dr. med. Dr. med. dent. Lars Bonitz, Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Stefan Hassfeld, alle Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie – Plastische Operationen (Prof. Dr. Dr. S. Hassfeld), Klinikum Dortmund gGmbH, Dortmund, Lehrstuhl der Universität Witten/Herdecke
ZÄ Christina Kruse, Zahnarztpraxis Dr. med. dent. F. R. Kruse, Dortmund

Ansprechpartner für die Verfasser

Dr. med. Dr. med. dent. Stephan Weihe, Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie – Plastische Operationen, Klinikum Dortmund gGmbH, Lehrstuhl für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Fakultät für Zahnmedizin, stephan.weihe@klinikumdo.de

Material und Methode

Software

Die Entwicklung des neuen Planungs- und Navigationssystems folgt einem modularen Konzept. Das System basiert auf der bereits etablierten Planungssoftware *implant3D* der Heidelberger Firma med3D GmbH. Diese Planungssoftware nutzt konventionell akquirierte Computertomographie(CT)-Daten im Dicom-3-Format, die per CD-ROM direkt auf das System übertragen werden können. Gemäß dem Prinzip des sogenannten backward-planning trägt der Patient während der CT-Daten-Akquisition eine röntgenopake Schiene, basierend auf dem unter ästhetischen und statischen Gesichtspunkten vom Prothetiker und Zahntechniker gemeinsam erarbeiteten Wax-up. So ist die geplante prothetische Versorgung im CT gut sichtbar, was die Platzierung der Implantate in anatomisch korrekter Position erleichtert. Die Software

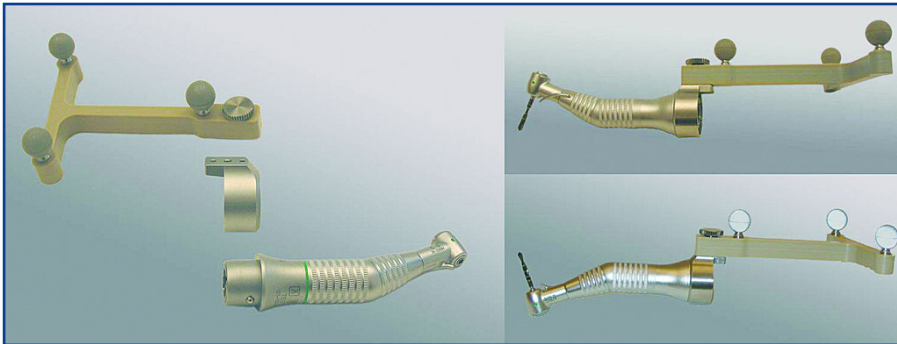


Abb. 3: Werkzeugtracker: mit einer Halterung zur Montage an der Ober- und Unterseite des Handstücks

15-Zoll-TFT-XGA-Display, 128 MB Grafikspeicher, DVD/CDRW-Laufwerk, 40 GB Festplatte und Windows XP Pro benutzt (*Tecra S3*, Toshiba Europe GmbH, Neuss).

Infrarot-Kamera

Des weiteren besteht das System aus einer Infrarot-Kamera der jüngsten Generation (*Polaris Vicra*, Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario, Kanada), die auf einen in alle Richtungen beweglichen Arm montiert ist (KaVo Dental GmbH, Biberach). Die Infrarot-Kamera hat eine Genauigkeit von 0,25 mm RMS (root mean square, quadratischer Mittelwert oder Effektivwert), die Aufwärmzeit beträgt zehn Minuten. Zusätzlich sind ein Erschütterungsdetektor, ein USB-2.0-Interface sowie Wartungs- und Diagnosetools vorhanden. Nach der Implantatplanung können die Registrierung und der Bohrprozess auf einem farbigen 5-Zoll-TFT-Display (*T050Q1D1*, Distec GmbH, Germering) verfolgt werden, der für die opti-



Abb. 4: Versuchsaufbau für die Ergonomie: Die Positionen der *DSEplus* samt Dummy und von *Mona Dent* werden anhand von Messpunkten und des Koordinatensystems reproduzierbar dokumentiert.

tiententracker gleichermaßen im Ober- und Unterkiefer zur linken und rechten Seite des Patienten herausgeführt werden kann (Abb. 2). Die Position des Patiententrackers wird seitens der Navigationssoftware automatisch erkannt. Mit einer speziellen Halterung kann der Werkzeugtracker in zwei verschiedenen Positionen für den Ober- und Unterkiefer mit dem Implantathandstück verbunden werden, um den Bohrer während des Bohrvorgangs in Echtzeit und in Relation zum Patienten zu verfolgen (Abb. 3).

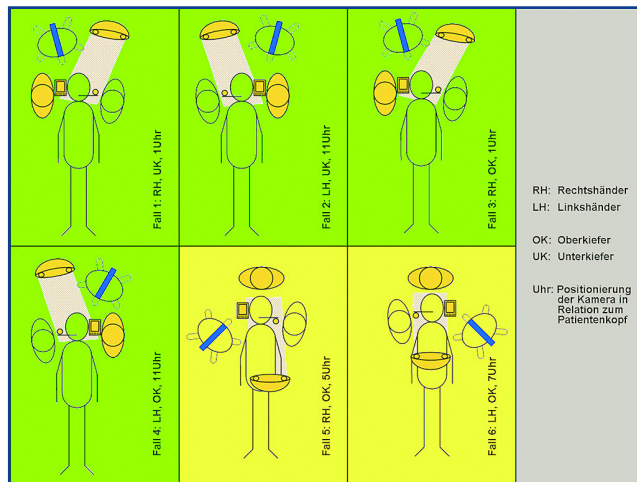


Abb. 5: Ergonomieversuche mit unterschiedlichster Positionierung von Chassis und Kamera. Die grünen Konfigurationen sind unproblematisch, die gelben nur bedingt realisierbar.

male Positionierung in der unmittelbaren Nähe des Operationsfeldes auf einem Schwanhals montiert ist (Abb. 1).

Um die Position des Patienten in den Bilddaten mit der realen Position des Patienten während der Operation zu korrelieren, wird zur Kalibrierung der Navigationsbogen am Kiefer des Patienten mit einer individuellen Bisschiene befestigt. Der Navigationsbogen hat integrierte Titanmarker in präzise definierten Positionen. Zusätzlich wird ein Lego-Stein mit definierter Geometrie am Navigationsbogen befestigt. Nach der Datenakquisition im CT werden die Marker von der Planungssoftware aufgesucht und die Implantate in Relation zu den Markern geplant. Während der Operation trägt der Patient den Navigationsbogen und einen Patiententracker mit passiven Markern (*Passive Spheres*, Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario, Kanada), um die Lage der Kiefer des Patienten zu verfolgen. Der Patiententracker kann auf beiden Seiten mit Markern in geringfügig unterschiedlicher Geometrie bestückt werden, so dass der Pa-

Versuchsaufbau – Ergonomie

Für die Evaluation der Ergonomie werden eine dentale Simulationseinheit (*DSEplus*, KaVo, Biberach) mit einem Patientendummy und Phantom-Kunststoffmodelle zahnloser Ober- und Unterkiefer eingesetzt. Die Daten der Kiefer werden mittels CT bei eingesetztem Navigationsbogen und Lego-Stein akquiriert. Nach Datentransfer in die Planungssoftware werden 14 Implantatpositionen für jeden Kiefer geplant und die Implantatpositionen gemäß der Planung navigiert in jedem Kiefer gebohrt.

Das Planungs- und Navigationssystem sowie die dentale Simulationseinheit werden in einem Raum mit einem Koordinatensystem auf dem Boden platziert und mit Messpunkten zur Dokumentation und Reproduzierbarkeit der Gerätepositionen versehen (Abb. 4).

Die *DSEplus* und der Kopf des Patientendummies werden optimal für den Behandler positioniert und diese Positionen anhand des Koordinatensystems und der Messpunkte A und B dokumentiert. Dann wird das Navigationssystem in verschiedenen Positionen in Relation zu der *DSEplus* positioniert, und diese Positionen werden anhand des Koordinatensystems und der Messpunkte 1 und 2 dokumentiert (Abb. 5). Der Implantatbohrer wird in das Implantathandstück mit dem montierten Werkzeugtracker eingesetzt, und der Patiententracker wird mit dem Kiefer anhand der Bisschiene verbunden. Anschlie-

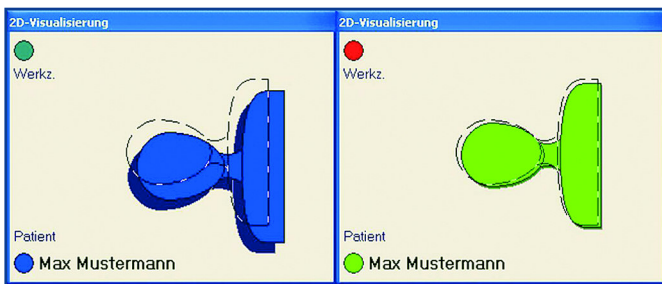


Abb. 6: Modus zur Einrichtung der Infrarot-Kamera: Die Patientensymbole müssen zur Deckung gebracht werden, und bei korrekter Positionierung wechselt die Farbe zu grün.

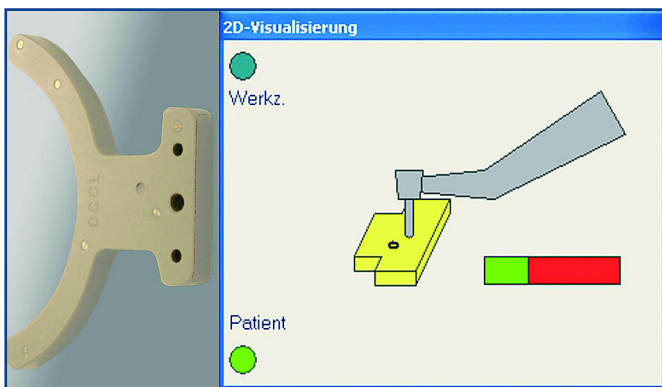


Abb. 7: Registriermodus: Wenn der Bohrer in eine Einkerbung am Navigationsbogen verbracht wird, erfolgt die automatische Registrierung.

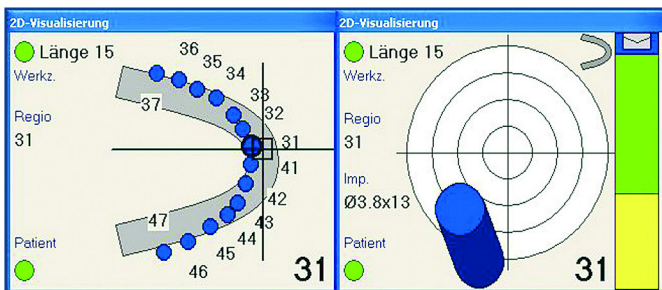


Abb. 8: Modus zur Wahl der als nächstes zu bohrenden Implantatposition gemäß CAD-Planung

Bei der Registrierung wird die Infrarot-Kamera mit Hilfe des 5-Zoll-TFT-Displays richtig positioniert, indem durch Bewegung innerhalb der unterschiedlichen Gelenke die verschiedenfarbigen Patientensymbole zur Deckung gebracht werden (Abb. 6). Der Patientenindikator auf dem TFT-Display ändert bei korrekter Positionierung die Farbe von rot zu grün. Wiederum wird die Position der Kamera mit Hilfe des Koordinatensystems und Messpunkt 3 dokumentiert und der Abstand zwischen Dummy und Sensor wird zwischen den Messpunkten 3 und C (Schraube des Navigationsbogens) gemessen und vermerkt.

Wenn nun das Implantathandstück mit dem Bohrer in das Operationsgebiet verbracht wird, wechselt der Werkzeugindikator auf dem TFT-Display ebenfalls die Farbe von rot zu grün, und das Display zeigt den Registrierungsmodus zum Einmessen des Bohrers (Abb. 7). Für die Werkzeugregistrierung muss die Bohrerspitze in eine kleine Einkerbung am Navigationsbogen, den Registrierungs Punkt, gebracht werden. Nach der Registrierung des Werkzeugs zeigt das Display einen

Zahnbogen mit jeder geplanten Implantatposition. Durch Platzieren des Bohrers für mindestens zwei Sekunden in Nähe der ersten gewünschten Implantatposition wird diese ausgewählt, und das Display wechselt automatisch zum Navigationsmodus (Abb. 8). Zu diesem Zweck zeigt das Display konzentrische Kreise, wobei der erste Kreis außerhalb des Zentrums einer Abweichung von 0,5 Millimetern und 0,5 Grad entspricht. Wenn die Bohrerspitze gemäß der Planung korrekt auf der Oberfläche des Phantomkiefers positioniert wird, wechselt der virtuelle Bohrer im Display die Farbe zu grün, und wenn die Angulation des Bohrers und somit die Bohrrichtung korrekt sind, verschwindet der schwarze Schatten hinter dem grünen Punkt (Abb. 9).

Für die Evaluation der Ergonomie wird die Erreichbarkeit aller geplanten Implantatpositionen von verschiedenen Testpersonen (Rechts-/Linkshänder, Unerfahrener, Erfahrener) und bei unterschiedlicher Positionierung von Dummy und System überprüft. Alle Schwierigkeiten, Abweichungen, Unregelmäßigkeiten etc. werden dokumentiert.

Versuchsaufbau – Präzision

Für die Evaluation der Präzision wird ein ähnliches experimentelles Setup gewählt mit dem Unterschied, dass die Phantomkiefer gegen hochpräzise CNC-gefertigte Kunststoffmodelle mit definierter Geometrie (Abb. 10) ausgetauscht werden, die nach dem Bohren mit hoher Genauigkeit vermessen werden können. Erneut wurde die CT-Datenakquisition mit dem Navigationsbogen und dem Lego-Stein vorgenommen. Nach der Planung und der Registrierung werden die Implantatbetten von verschiedenen Testpersonen navigiert gebohrt. Anschließend werden die Phantommodelle mit einem 3-D-Digitalisierungssystem vermessen.

Ergonomie

Zu Beginn zeigten sich bei den Untersuchungen zur Ergonomie Schwierigkeiten in der Positionierung der Infrarot-Kamera aufgrund von Limitationen in den Gelenken des Kameraarms (Abb. 4). Nachdem diese Limitationen eliminiert wurden, konnte die Infrarot-Kamera sehr leicht adjustiert werden. Speziell das TFT-Display ist hilfreich, um die richtige Position des Kameraarms ohne Schwierigkeiten zu finden, indem verschiedenfarbige Patientensymbole durch Bewegen des Kameraarms zur Deckung gebracht werden.

Weil der Patiententracker auf beiden Seiten mit passiven Markern bestückt werden kann, kann der Tracker auf der linken und rechten Seite jedes Kiefers positioniert werden. Aus diesem Grund kann das Naviga-

(n = 586)	RMS (mittlere Genauigkeit)	Mittelwert	Standard- Abweichung
x-y-Abweichung (seitliche Abweichung)	0,67 mm	0,59 mm	0,31 mm
z-Abweichung (Tiefenabweichung)	0,86 mm	0,69 mm	0,52 mm
Winkel-Abweichung	1,40°	1,25°	0,62°

Tabelle 1: Vorläufige Ergebnisse der ermittelten Abweichungen bei den Präzisionsversuchen



Abb. 9: Navigationsmodus: Der innerste Kreis entspricht einer Abweichung von 0,5 mm und einer Verkipfung von 0,5 Grad.

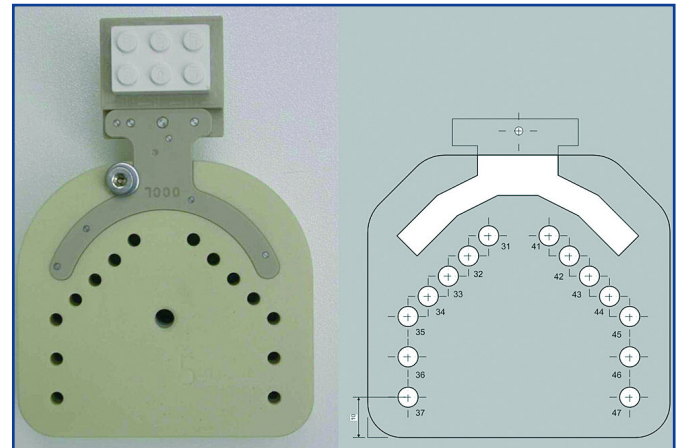


Abb. 10: CNC-gefertigtes Kunststoffmodell mit definierter Geometrie zur Durchführung der Präzisionsversuche

tionssystem von Rechts- und Linkshändern gleichermaßen genutzt werden. Aufgrund der geringfügig unterschiedlichen Markergeometrie auf beiden Seiten des Trackers kann das Navigationssystem automatisch die Orientierung des Patiententracker erkennen. Letztendlich konnten alle geplanten Implantatpositionen im Ober- und Unterkiefer von allen Testpersonen unabhängig von deren Erfahrung und Rechts- und Linkshändigkeit erreicht werden. Grundsätzlich ist auch die Positionierung von Navigationssystem und Infrarot-Kamera in allen in **Abbildung 5 (Seite 7)** dargestellten Konfigurationen möglich, die Konfigurationen 5 und 6 (gelb) eignen sich jedoch in Abhängigkeit des zahnärztlichen Behandlungsstuhls nicht oder nur bedingt und sind lediglich bei Lagerung des Patienten auf einem Operationstisch möglich.

Während der ersten Versuche wurden im Navigationsmodus mit den konzentrischen Kreisen maximale Abweichungen von 2,5 Millimetern und 2,5 Grad detektiert, entsprechend einem halben Millimeter und einem halben Grad pro Kreis. So musste die korrekte Implantatposition bereits nahezu erreicht sein, bevor das Werkzeug erfasst und angezeigt wurde. Im weiteren Verlauf wurde dann eine Änderung des Anzeigemodus in der Form herbeigeführt, dass eine logarithmische Darstellung der Abweichung eine größere Abdeckung des Operationsgebietes ermöglicht (bei gleicher Präzision in Bezug auf die innersten beiden Kreise) (**Abb. 9**). Damit konnte die Handhabung während der Zielführung erheblich verbessert werden.

Präzision

Die vorbeschriebenen Versuche zur Evaluation der Präzision der gesamten Verfahrenskette (CT, Planung und navigiertes Bohren)

sind noch im Gange. Analysen erster Messungen zeigten Abweichungen aufgrund von Bewegungsspiel des Adapters zwischen dem Implantathandstück und dem Werkzeugtracker. Nach Eliminieren dieses Fehlers zeigen die vorläufigen Ergebnisse der ersten von vier Testpersonen Abweichungen, die im Bereich anderer Navigationssysteme liegen (Tab. 1, Seite 8) [1, 2, 3, 4]. Die endgültigen Ergebnisse werden nach weiteren Modifikationen und Verbesserungen innerhalb der nächsten Wochen vorliegen.

Diskussion

Die grundsätzliche Notwendigkeit von Infrarot-Navigationssystemen für die dentale Implantologie wird häufig diskutiert. Das stärkste Argument gegen dentale Navigationssysteme sind der erhebliche Zeitaufwand für die Planung und das Setup, die Wirtschaftlichkeit [5] und der benötigte Platzbedarf für das System während der Operation.

Ein Maximum an Flexibilität und Sicherheit

Technische Fortschritte während der vergangenen Jahre machten die Planung und das Handling bedeutend einfacher und es gibt eine steigende Zahl von Anbietern, die eine Planungssoftware für die dentale Implantologie anbieten. In der Mehrzahl der Fälle werden die Planungsdaten zur Fertigung individueller Bohrschablonen mit Titanhülsen genutzt. Einerseits zeigt die steigende Nachfrage nach diesen Systemen die Notwendigkeit für Hilfsmittel in der dentalen Implantologie, aber andererseits erlaubt die Nutzung von Bohrschablonen keine intraoperative Abweichung von den geplanten Implantatpositionen.

Prinzipiell profitieren die Patienten von der intraoperativen Navigation in der dentalen Implantologie [3, 4]. Speziell moderne Navigationssysteme, die klein, mobil, präzise und einfach zu handhaben sind, kombinieren ein Maximum an Flexibilität mit hoher Sicherheit [2] in der Implantologie, und die Nutzung solcher Systeme ist selbst unter steigendem Kostendruck sinnvoll möglich.

Schlussfolgerung

Schlussfolgernd ist das neu entwickelte Planungs- und Navigationssystem *Mona Dent* zuverlässig und aufgrund seiner exzellenten Bedienung selbst für computerunerfahrene Implantologen einfach zu handhaben. Soweit wir wissen, ist dieses System das einzige, das von Rechts- und Linkshändern genutzt werden kann. Aus den vorgenannten Gründen und aufgrund der hohen Flexibilität in Bezug auf die Positionierung des Systems innerhalb des Behandlungsraums ist es anderen vergleichbaren Systemen überlegen. Das System wird vertrieben durch die IMT GmbH – Institut für Medizintechnik, Dortmund.

Danksagung

Wir danken der GamBit Automation GmbH, dem Entwickler von Mona, für Offenlegung aller benötigten Informationen über das System und für die großzügige Unterstützung unserer Untersuchungen.

Dr. med. Dr. med. dent. Stephan Weihe, Dr. med. Dr. med. dent. Eric-Peter Franz, Dr. med. Dr. med. dent. Lars Bonitz, Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Stefan Hassfeld, ZÄ Christina Kruse, Dortmund ■

Ein Literaturverzeichnis kann bei der Redaktion angefordert werden.