

Autor
Wissenschaftler
Status
Aktuell
Kategorie
Studienbericht

Chancen, Nutzen und Probleme der Navigation in der dentalen Implantologie

MONA_DENT® – ein neues Planungs- und Navigationssystem

Dr. Dr. Stephan Weihe, Christina Kruse, Dr. Dr. Eric-Peter Franz,
Susanne Joachim, Dr. Dr. Lars Bonitz, Prof. Dr. Dr. Stefan Hassfeld

Der Einsatz von Planungs- und Navigationssystemen in der dentalen Implantologie wird kontrovers diskutiert. Während Systemhersteller mit hoher Präzision, Sicherheit und der Anwendung bei geringem Knochenangebot werben, bescheinigen Gegner bisherigen Systemen zu geringe Praktikabilität, Flexibilität und Rentabilität. Ziel unserer Untersuchung war es daher, den Prototypen von MONA_DENT® auf seine „Alltagstauglichkeit“ und bezüglich seiner Präzision zu evaluieren. MONA_DENT® erwies sich als zuverlässig, präzise und einfach zu bedienen bei kurzen Rüstzeiten und guter Rentabilität.

Jeder Insertion dentaler Implantate sollten eine genaue Analyse der bestehenden anatomischen Verhältnisse und eine sorgfältige präoperative Planung vorausgehen. Gemäß dem Prinzip des sogenannten „backward-planning“ werden dabei die geplanten Implantatpositionen durch Berücksichtigung der optimalen prothetischen Planung gemeinsam seitens Prothetiker und Zahntechniker unter ästhetischen und statischen Gesichtspunkten bestimmt.

Die Planung der Implantate kann heutzutage basierend auf 3D-Bilddaten (Computertomographie – CT oder digitale Volumentomographie – DVT) am Computer mit Hilfe von CAD (computer-aided-design)-Software erfolgen. CAD-Programme werden in anderen Fachgebieten (Automobilindustrie, Design, Architektur) seit langem bereits erfolgreich eingesetzt und dürften den meisten daher bekannt sein. Bezüglich der Vorteile solcher CAD-Planungsprogramme herrscht in Fachkreisen der Implantologen weitgehend Übereinstimmung, wohingegen der Nutzen von Navigationssystemen in der dentalen Im-

plantologie seit geraumer Zeit kontrovers diskutiert wird. Während Systemhersteller mit hoher Präzision, Sicherheit und der Anwendungsmöglichkeit auch bei geringem Knochenangebot werben, bescheinigen Gegner bisherigen Systemen zu geringe Praktikabilität, Flexibilität und Rentabilität.

Entscheidend ist jedoch nach einer Implantatplanung mit Hilfe des Computers die Übertragung dieser virtuellen Planung auf den realen Patientensitus. Neben der Nutzung von Bohrschablonen kann hier die Instrumentennavigation gute Dienste leisten und bietet darüber hinaus verglichen mit der Bohrschablone ein Maximum 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.

Eine einfache und übersichtliche Bedienung, kurze Rüstzeiten und maximale Flexibilität in Bezug auf die Aufstellung des Navigationssystems



Abb. 1: Das neue Planungs- und Navigationssystem MONA_DENT® mit seinen Komponenten: Infrarot-Kamera (1), Notebook (2), Chassis (3), 5" TFT-Display (4), standfestes Drehgestell (5).

bei gleichzeitig hoher Sicherheit und Präzision sind für den Anwender bei Nutzung entsprechender Planungs- und Navigationssysteme von entscheidender Bedeutung für die effektive und kostendeckende Nutzung solcher Systeme.

Ziel der nachfolgenden Studie war es daher, den Prototypen von MONA_DENT® (Abb. 1), einem neuen modularen Planungs- und Navigationssystem für die dentale Implantologie, unter diesen Gesichtspunkten zu evaluieren sowie eine erste klinische Anwendung durchzuführen.

Material und Methode

Software

Das modulare Konzept des neu entwickelten Planungs- und Navigationssystems basiert auf der Planungssoftware implant3D (med3D GmbH, Heidelberg). Diese bereits etablierte Planungssoftware nutzt konventionell akquirierte CT-Daten im DICOM-3-Format, die mittels CD-ROM direkt auf das System übertragen werden. Während der CT-Daten-Akquisition trägt der Patient eine röntgenopake Schiene, die auf dem unter ästhetischen und statischen Gesichtspunkten gemeinsam vom Prothetiker und Zahntechniker erarbeiteten Wax-up basiert. Dieses Vorgehen entspricht dem Prinzip des so genannten „backward-planning“. Auf diese Weise wird die Platzierung der Implantate in anatomisch korrekter Position dadurch erleichtert, indem die geplante prothetische Versorgung im CT und damit später bei der CAD-Planung gut sichtbar ist.

Mit der Software implant3D ist es dem Implantologen möglich, die Implantate interaktiv in Echtzeit frei in den CT-Daten zu bewegen und dabei in 2D-Ansichten und als 3D-Bilder darzustellen. So kann die Therapie nach Beurteilung verschiedener Therapieoptionen optimiert werden.

Hardware

Ein Notebook (Tecra S3, Toshiba Europe GmbH, Neuss) wird für die Planungs- und Navigationsprozeduren benutzt und dessen Spezifikation (Intel Pentium

M740 Prozessor mit 1,73 GHz, 1024 MB RAM, 15" TFT XGA Display, 128 MB Grafikspeicher, DVD/CDRW Laufwerk, 40 GB Festplatte und Windows XP Pro) garantiert die für eine zügige Planung notwendige Leistungsfähigkeit.

Des Weiteren besteht das System aus einer Infrarot-Kamera der neuesten Generation (Polaris® Vicra™, Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario, Kanada), deren Montage auf einem Arm mit mehreren Gelenken (KaVo Dental GmbH, Biberach), die Beweglichkeit in alle Richtungen ermöglicht. Die Infrarot-Kamera hat eine Genauigkeit von 0,25 mm RMS, die Aufwärmzeit beträgt 10 Minuten. Zusätzlich sind ein Erschütterungsdetektor, ein USB 2.0 Interface sowie Wartungs- und Diagnosetools vorhanden. Ein farbiges 5" TFT-Display (T050Q1D1, Distec GmbH, Germering) ist auf einem Schwanenhals montiert (Abb. 1) und ermöglicht so die optimale Positionierung in der unmittelbaren Nähe des Operationsfeldes. Nach der Implantatplanung können die Registrierung und der Bohrprozess auf diesem Monitor verfolgt werden.

Um die Patientenposition in den Bilddaten mit der realen intraoperativen Patientenposition zu korrelieren, wird der Navigationsbogen zur Kalibrierung mit einer individuellen Bisschiene am Kiefer des Patienten befestigt. In den Navigationsbogen sind in präzise definierten Positionen Titanmarker integriert. Zusätzlich wird ein Steckbaustein mit einer definierten Geometrie am Navigationsbogen befestigt. Nach der Datenakquisition im CT sucht die Planungssoftware die Marker auf und die Implantate können dann in Relation zu den Markern geplant werden. Während der Operation trägt der Patient neben dem Navigationsbogen noch einen Patiententracker mit passiven Markern (Passive Spheres™, Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario, Kanada), der es möglich macht, die Lage der Kiefer des Patienten zu verfolgen. Der Patiententracker kann auf beiden Seiten mit Markern in geringfügig unterschiedlicher Geometrie bestückt werden, sodass er gleichermaßen im Ober- und Unterkiefer zur linken wie zur rechten Seite des Patienten herausgeführt werden kann (Abb. 2). Die Navigationssoftware erkennt die Position des Patiententrackers automatisch. Mit einer speziellen Hal-

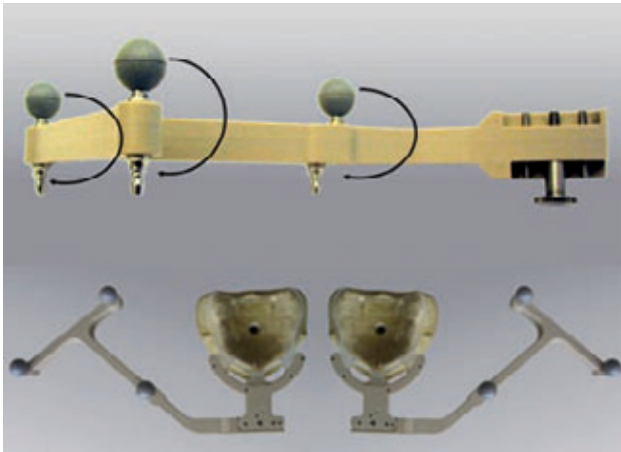


Abb. 2: Patiententracker: Eine Bestückung mit je drei passiven Markern in unterschiedlicher Geometrie ist auf beiden Seiten möglich.

terung kann der Werkzeugtracker in zwei für den Ober- und Unterkiefer verschiedenen Positionen mit dem Implantathandstück verbunden werden, so dass sich der Bohrer während des Bohrvorgangs in Echtzeit und in Relation zum Patienten verfolgen lässt (Abb. 3).



Abb. 3: Werkzeugtracker: Die Halterung ermöglicht die Montage an der Ober- und Unterseite des Handstücks.

Versuchsaufbau – Ergonomie

Die Evaluation der Ergonomie erfolgt an Phantom-Kunststoffmodellen zahnloser Ober- und Unterkiefer, eingesetzt in einen Patientendummy einer dentalen Simulationseinheit (DSEplus, KaVo Dental GmbH, Biberach) und durch verschiedene Testpersonen mit unterschiedlicher Händigkeit und Erfahrung (Rechts-/Linkshänder, Unerfahrener, Erfahrener).

Die Daten der Kiefer werden zuvor im CT bei eingesetztem Navigationsbogen und Steckbaustein akquiriert. Anschließend werden die Daten in die Planungssoftware mit einer CD transferiert. Hier

werden für jeden Kiefer 14 Implantatpositionen geplant und die Implantatpositionen gemäß der Planung navigiert in jeden Kiefer gebohrt.

Das Planungs- und Navigationssystem wird zusammen mit der dentalen Simulationseinheit in einem Raum mit einem Koordinatensystem auf dem Boden platziert. Zusätzlich werden Messpunkte zur Dokumentation und Reproduzierbarkeit der Gerätepositionen festgelegt (Abb. 4).



Abb. 4: Versuchsaufbau für die Ergonomie: Mit Hilfe der Messpunkte und des Koordinatensystems werden die Positionen der DSEplus inklusive Dummy und von MONA_DENT® reproduzierbar dokumentiert.

Für jede der Testpersonen werden die DSEplus und der Kopf des Patientendummies optimal gemäß der spezifischen Behandlungsgewohnheiten jedes Behandlers positioniert und diese Positionen anhand des Koordinatensystems und der Messpunkte A und B dokumentiert. Dann wird das Navigationssystem relativ zu der DSEplus in verschiedenen Positionen platziert und auch diese Positionen werden anhand des Koordinatensystems und der Messpunkte 1 und 2 dokumentiert (Abb. 5). Der Patiententracker wird mit dem Kiefer anhand der Bisschiene verbunden und nach Montage des Werkzeugtrackers der Implantatbohrer in das Implantathandstück eingesetzt. Mit Hilfe des 5" TFT-Displays wird anschließend die Infrarot-Kamera richtig positioniert, indem durch Be-

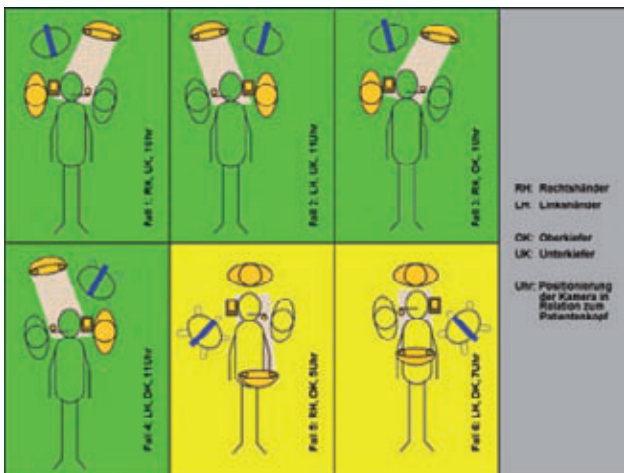


Abb. 5: Ergonomieveruche mit unterschiedlichster Positionierung von Chassis und Kamera zeigen unproblematische (grün) und nur bedingt realisierbare Konfigurationen (gelb).

wegung innerhalb der unterschiedlichen Gelenke die verschiedenfarbigen Patientensymbole zur Deckung gebracht werden (Abb. 6). Bei korrekter Positionierung ändert der Patientenindikator auf dem TFT Dis-

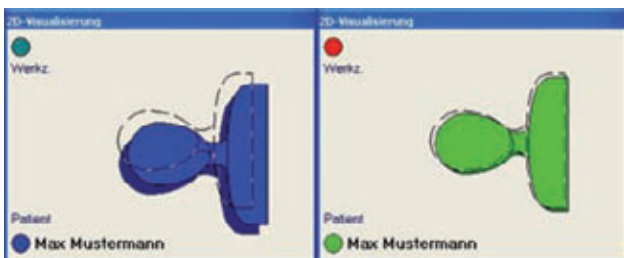


Abb. 6: Modus zur Einrichtung der Infrarot-Kamera: Sind die Patientensymbole zur Deckung gebracht worden und ist die Positionierung korrekt, wechselt die Farbe zu grün.

play die Farbe von rot zu grün. Wiederum wird mit Hilfe des Koordinatensystems und Messpunkt 3 die Position der Kamera dokumentiert und der Abstand zwischen Dummy und Sensor zwischen den Messpunkten 3 und C (Schraube des Navigationsbogens) gemessen und vermerkt.

Wird das Implantathandstück inklusive Bohrer in das Operationsgebiet verbracht, wechselt der Werkzeugindikator auf dem TFT Display ebenfalls die Farbe von rot zu grün. Das Display zeigt nun den Modus zum Einmessen des Bohrers (Abb. 7). Die Werkzeugregistrierung erfolgt durch Einbringung der Bohrer Spitze in eine kleine Einkerbung am Navigationsbogen, den Registrierungspunkt. Nach der Registrierung des Werkzeugs ist auf dem Display ein Zahnbogen

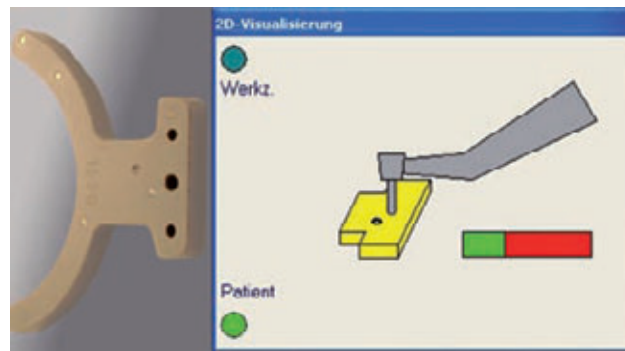


Abb. 7: Registriermodus: Die automatische Registrierung erfolgt, wenn der Bohrer in eine Einkerbung am Navigationsbogen verbracht wird.

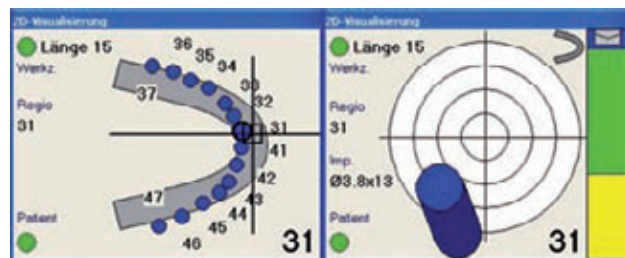


Abb. 8: Modus zur Wahl der gemäß CAD-Planung als nächstes zu bohrenden Implantatposition.

mit jeder geplanten Implantatposition sichtbar. Wird der Bohrer für mindestens 2 Sekunden in Nähe der ersten gewünschten Implantatposition platziert, so wird diese ausgewählt und das System 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 mm und 0,5 Grad entspricht. Wird



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

die Bohrspitze gemäß der Planung korrekt auf der Oberfläche des Phantomkiefers positioniert, 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 durch die Testpersonen bei unterschiedlicher Positionierung von Dummy und System untersucht. Alle Schwierigkeiten, Abweichungen, Unregelmäßigkeiten usw. werden entsprechend dokumentiert.

Versuchsaufbau – Präzision

Zur Evaluation der Präzision wird ein ähnliches experimentelles Setup gewählt. Im Gegensatz zur vorherbeschriebenen Untersuchung werden die Phantomkiefer gegen hochpräzise CNC-gefertigte Kunststoffmodelle mit definierter Geometrie (Abb. 10) ausgetauscht, da diese nach dem Bohren mit sehr hoher Genauigkeit vermessen werden können. Die CT-Datenakquisition erfolgt in vorherbeschriebener Weise. Nach der Planung und der Registrierung werden die Implantatbetten von vier verschiedenen Testpersonen navigiert gebohrt und die Phantommodelle werden anschließend mit einem 3D-Digitalisierungssystem vermessen.

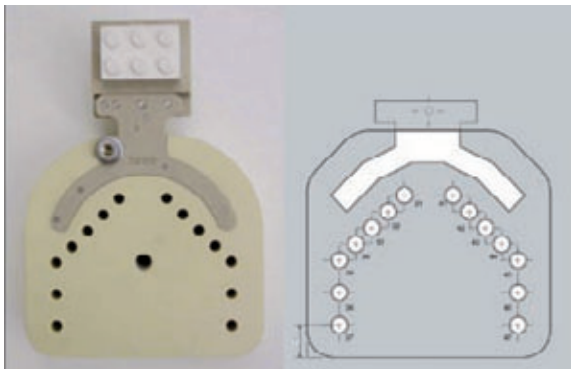


Abb. 10: CNC-gefertigtes Kunststoffmodell zur Durchführung der Präzisionsversuche mit definierter Geometrie.

Klinische Anwendung

Nach Durchführung der Versuche zur Ergonomie und Präzision sowie nach Erlangung der CE-Zer-

tifizierung erfolgt eine erste klinische Anwendung bei einer 46-jährigen Patientin. Bei dieser Patientin wurden zwei Wochen zuvor bereits im Oberkiefer 6 Implantate unter Verwendung einer mittels 2 Hilfsimplantaten fixierten Bohrschablone eingesetzt.

Im Unterkiefer trägt die Patientin gemäß dem Prinzip des „backward-planning“ während der CT-Daten-Akquisition eine röntgenopake Schiene, um die Positionierung der geplanten 4 interforaminären Unterkieferimplantate im CAD-System zu erleichtern. Zur besseren Fixierung des schienengetragenen Patiententrackers wurden vor der CT-Datenakquisition im Unterkiefer ebenfalls 2 Hilfsimplantate inseriert, womit sich unter Einbeziehung der Restbeziehung von 46 und 47 eine Dreipunktstützung der Schiene ergibt.

Ergebnisse

Ergonomie

Aufgrund von Limitationen in den Gelenken des Kameraarms zeigten sich zu Beginn der Untersuchungen zur Ergonomie Schwierigkeiten in der Positionierung der Infrarot-Kamera (Abb. 3). Nachdem diese Limitationen erfolgreich eliminiert werden konnten, ist die Infrarot-Kamera sehr leicht zu adjustieren. Indem verschiedenfarbige Patientensymbole durch Bewegen des Kameraarms auf dem TFT-Display zur Deckung gebracht werden, ist die richtige Position des Kameraarms ohne Schwierigkeiten zu finden.

Der Patiententracker kann auf der linken und rechten Seite jedes Kiefers positioniert werden, da er auf beiden Seiten mit passiven Markern bestückt werden kann. Aus diesem Grund kann das Navigationssystem gleichermaßen von Rechts- und Linkshändern genutzt werden. Aufgrund der geringfügig unterschiedlichen Markergeometrie auf beiden Seiten des Trackers kann das Navigationssystem automatisch die Orientierung des Patiententrackers erkennen.

Bei den durchgeführten Untersuchungen konnten alle geplanten Implantatpositionen im Ober- und Unterkiefer von allen Testpersonen erreicht werden,

und das unabhängig von deren Erfahrung und deren Händigkeit. Grundsätzlich ist die Positionierung von Navigationssystem und Infrarot-Kamera in allen in Abb. 10 dargestellten Konfigurationen möglich. Die Konfigurationen 5 und 6 (gelb) eignen sich jedoch in Abhängigkeit des zahnärztlichen Behandlungsstuhls nicht oder nur bedingt. Sie können lediglich dann sinnvoll Anwendung finden, wenn der Patient auf einem Operationstisch gelagert wird.

Während der ersten Versuche wurden im Navigationsmodus mit den konzentrischen Kreisen maximale Abweichungen von 2,5 mm und 2,5 Grad erfasst. Das entspricht einem halben Millimeter und einem halben Grad pro Kreis. So war es notwendig, die korrekte Implantatposition bereits nahezu zu erreichen, bevor das Werkzeug erfasst und angezeigt wurde. Im weiteren Verlauf wurde durch eine Änderung des Anzeigemodus und eine logarithmische Darstellung der Abweichungen eine größere Abdeckung des Operationsgebietes bei gleicher Präzision in Bezug auf die innersten beiden Kreise ermöglicht (Abb. 4). Damit konnte die Handhabung der Werkzeuge während der Zielführung erheblich verbessert werden.

Präzision

Da die vorbeschriebenen Versuche zur Evaluation der Präzision der gesamten Verfahrenskette (CT, Planung und navigiertes Bohren) noch im Gange sind, liegen bislang nur die Analysen erster Messungen vor. Diese zeigten zu Beginn Abweichungen zwischen dem Implantathandstück und dem Werkzeugtracker, die aufgrund von Bewegungsspiel des Adapters entstehen. Nachdem dieser Fehler eliminiert wurde, zeigen die vorläufigen Ergebnisse der ersten von vier geplanten Testpersonen Abweichungen, die denen anderer Navigationssysteme entsprechen (Tab. 1)^[1, 2, 3, 4]. Zur Zeit werden nach weiteren Modifikationen und Verbesserungen erneut Versuche zur Präzision durchgeführt, deren endgültigen Ergebnisse in Kürze vorliegen werden.

Klinische Anwendung

Klinisch ließen sich im Unterkiefer 4 Implantate mit einer Länge von 13 und 15 mm sowie 4 mm

(n = 586)	RMS (mittlere Genauigkeit)	Mittelwert	Standardabweichung
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.

Durchmesser einfach, sicher und präzise inserieren. Das postoperative Röntgenbild (Abb. 11) zeigt die hervorragende Parallelität der Implantate sowie die beiden vor der Implantation eingebrachten Hilfsimplantate zur sicheren Fixierung des Patiententrackers im Unterkiefer. Die zwei Wochen zuvor im Oberkiefer mit einer Hilfsimplantatfixierten Bohrschablone eingebrachten Implantate zeigen ebenfalls sehr gute Parallelität.



Abb. 11: Postoperative Röntgenkontrolle: Sämtliche Implantate im Unterkiefer (Navigation) und Oberkiefer (Bohrschablone) zeigen hervorragende Parallelität. Die Hilfsimplantate befinden sich auch nach der Implantation noch in situ, um die Interimsprothese zu fixieren.

In der ersten klinischen Anwendung erwies sich MONA_DENT® ebenso wie in den Laborversuchen zuvor als zuverlässig und aufgrund der Bedienerführung als einfach zu nutzen bei kurzen Rüstzeiten und guter Rentabilität. Gegenüber der Bohrschablone behält der Operateur die intraoperative Flexibilität, gegebenenfalls von der Planung abzuweichen. Eine Abweichung von der Planung erfolgt bei Einsatz der Navigation ohne Verlust an Sicherheit und unter vollständiger intraoperativer Kontrolle der Präzision und Parallelität.

Diskussion

Mit der Argumentation des erheblichen Zeitaufwandes für die Planung und das Setup, den benötigten Platzbedarf von Navigationssystemen während der Operation wird die Notwendigkeit von Infrarot-Navigationssystemen für die dentale Implantologie häufig grundsätzlich diskutiert und deren Wirtschaftlichkeit in Frage gestellt^[5].

Da die technischen Fortschritte der letzten Jahre die Planung und das Handling bedeutend einfacher gemacht haben, gibt es eine steigende Zahl von Anbietern, die eine Planungssoftware für die dentale Implantologie anbieten. Die meisten Systeme nutzen die Planungsdaten zur Fertigung individueller Bohrschablonen mit Titanhülsen. Die steigende Nachfrage nach diesen Systemen belegt die Notwendigkeit von Hilfsmitteln in der dentalen Implantologie, wobei jedoch die Nutzung von Bohrschablonen keine intraoperative Abweichung von den geplanten Implantatpositionen erlaubt.

Mehrere Untersuchungen konnten zeigen, dass die Patienten prinzipiell von der intraoperativen Navigation in der dentalen Implantologie profitieren^[3, 4]. Durch den Einsatz speziell moderner Navigationssysteme, die klein, mobil, präzise und einfach zu handhaben sind, ergibt sich ein Maximum an Flexibilität kombiniert mit hoher Sicherheit^[2] in der Implantologie, sodass die Nutzung solcher Systeme selbst unter steigendem Kostendruck sinnvoll möglich ist.

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass das neu entwickelte Planungs- und Navigationssystem MONA_DENT® nicht nur zuverlässig ist, sondern aufgrund seiner exzellenten Bedienung selbst für Implantologen ohne Computererfahrung einfach zu handhaben ist. Außerdem ist dieses System das einzige – soweit es uns bekannt ist – das sowohl von Rechts- als auch von Linkshändern problemlos genutzt werden kann. Zu diesen Vorteilen kommt eine hohe Flexibilität in Bezug auf die Positionierung des Systems innerhalb des Behandlungsraums, was es anderen vergleichbaren Systemen überlegen macht. Die Nutzung eines Notebooks für die Planungs- und Navigationsprozeduren ermöglicht darüber hinaus eine

hohe Mobilität und die Durchführung der Planung auch ohne das für die spätere Implantatinserktion notwendige Arbeitsumfeld außerhalb der Praxis.

Über die abschließenden Untersuchungen und weitere klinische Anwendungen werden wir gerne erneut berichten.

Danksagung

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

Die Literaturliste kann bei der Redaktion angefordert werden.

Kontakt

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, Universität Witten/Herdecke
Münsterstraße 240
D-44137 Dortmund
Telefon +49 (0)231 953 18500
Fax +49 (0)231 953 18951
stephan.weihe@klinikumdo.de
www.klinikumdo.de

Die Autoren

Dr. med. Dr. med. dent. Stephan Weihe¹,
Christina Kruse², Dr. med. Dr. med. dent.
Eric-Peter Franz¹, Susanne Joachim¹, Dr. med.
Dr. med. dent. Lars Bonitz¹, Prof. Dr. med. Dr.
med. dent. Stefan Hassfeld¹

¹ Klinikum Dortmund, Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie

² Zahnarztpraxis Dr. med. dent. F. R. Kruse, Dortmund