

Miaozhen Wang, Mijiritsky Eitan, Yalin Zhan, Huidan Shen, Feng Liu

Digital workflow for prosthetically driven implant navigation surgery in a fully edentulous patient: a case report

Digitaler Workflow für die prothetisch orientierte, navigierte Implantatchirurgie bei einer unbezahnten Patientin: ein Fallbericht

Zusammenfassung

Hintergrund: Die dynamische Implantatnavigation bietet bei unbezahnten Patienten wichtige Vorteile gegenüber dem statischen Ansatz. Nach bestem Wissen der Autoren handelt es sich bei dem vorliegenden Fallbericht um die erste Beschreibung der Anwendung einer dynamischen Navigationstechnik für die Implantation bei unbezahnten Patienten.

Fallbericht: Einer 55-jährigen Patientin, die mit dem Wunsch nach Zahnersatz erschien, wurde die Versorgung mit implantatgetragenen Full-arch-Brücken vorgeschlagen. Die Behandlung erfolgte nach einem Protokoll mit digital navigierter Implantatchirurgie und Sofortprovisorium. Zunächst wurde eine Kunststoffprothese hergestellt, die als Röntgen-schablone diente. Nach Akquise der digitalen Daten mittels Doppelscan-Technik wurden die Implantatpositionen prothetisch orientiert geplant. Im Unterkiefer wurden für die Registrierung vier Titan-Miniimplantate platziert. Das erste prothetische Implantat wurde freihändig gesetzt und mit dem Patienten-Tracker verbunden. Nach Kalibrierung und Registrierung wurde dann das Navigationssystem eingesetzt, und die Insertion der verbleibenden fünf Implantate erfolgte navigiert. Im Oberkiefer wurde auf dieselbe Weise vorgegangen. Innerhalb von 24 Stunden nach dem Eingriff folgte die Belastung der Implantate.

Ergebnisse: Nach der Implantatsetzung wurde eine postoperative DVT durchgeführt, deren Auswertung ergab, dass alle Implantate exakt und in Übereinstimmung mit der Behandlungsplanung platziert worden waren.

Schlussfolgerung: Das Behandlungsergebnis zeigt, dass ein volldigitaler Workflow für die prothetisch orientiert navigierte Implantatchirurgie sich für die Versorgung zahnloser Patienten mit festsitzendem implantatgetragenen Zahnersatz eignet. Die Genauigkeit und Präzision dieses Workflows sollte durch hochwertige Evidenz bestätigt werden.

Abstract

Background: Dynamic navigation has important potential advantages over the static approach for fully edentulous patients. To the best of the authors' knowledge, this is the first published case report describing the use of a dynamic implant navigation technique for a fully edentulous patient.

Case report: A 55-year-old female presented for the replacement of missing teeth. Treatment with an implant-supported fixed dental prosthesis was proposed. A digital navigation implant surgery/immediate provisionalization protocol was used. An acrylic resin denture was fabricated as a radiographic guide. Digital data were obtained through the double scan technique, and a prosthetically driven 3D implant positioning was designed. Four titanium mini screws were inserted into the mandible for registration. The first implant was inserted in a freehand manner and attached to a patient tracker. After calibration and registration, the navigation system was set up. The other five implants were inserted using the navigation system. The procedure followed for the maxilla was similar. After surgery, a loading procedure was performed within 24 h.

Results: Following implant placement, a postoperative CBCT scan was performed. The results showed that all implants were placed precisely, in accordance with the treatment plan.

Conclusion: From the results obtained it appears that a fully digital workflow for prosthetically driven implant navigation surgery is suitable for the treatment of fully edentulous patients requiring an implant-supported fixed restoration. High-level evidence is needed to determine the accuracy and precision of this workflow.

Keywords: *dynamic navigation, dental implant, oral implantology, digital workflow, case report, fully edentulous jaw*

Introduction

Different methods have been proposed to apply virtual digital planning to the surgical field. Computer-assisted implant (CAI) surgical techniques can be categorized as static or dynamic¹. Static systems use surgical templates or implant guides, while dynamic systems transfer the desired implant position to the surgical field using visual imaging tools and a monitor display. There is evidence for high implant survival rates and a reasonable level of accuracy with the use of CAI surgery².

The image-guided dynamic navigation system was developed to provide real-time visualization of anatomical structures such as bone and teeth as well as drill tips during implant surgical procedures. At present, most commercially available navigation systems used in dental surgery are optical tracking systems. These systems can be classified as either active or passive; in this study, an active tracking system (Yizhimei, Suzhou, China) was utilized.

The active tracking system consists of five main components: 1) an infrared tracking camera; 2) a screen displaying images of the patient and the position of the instrument as well as 3) a notebook computer running the planning and guidance software; 4) a drilling handpiece that emits infrared light; and 5) a patient tracker fixed to the jaw, which also emits infrared light. A bracket is utilized for fully edentulous jaws.

As the drill approaches the planned implant location, a display image allows the surgeon to insert the drill into the planned entry point with precision, to adjust the drill orientation to the planned entry angle, and to drill to the desired depth³.

Dynamic navigation has important potential advantages over the static approach for fully edentulous patients, including: 1) improved ergonomics, capable of guiding long and angled implants; 2) increased predictability of bone reduction via the ability to verify the depth of the implant shoulder; 3) better fitting guides, thus ruling out guidance failure; and 4) the ability to view and modify the plan during surgery according to tactile feedback or unexpected complications⁴. However, there are limited clinical reports regarding the use of dynamic navigation systems for complete-arch implant-supported rehabilitations in edentulous patients.

The aim of the present study was to describe a digital workflow for prosthetically driven implant navigation surgery in an edentulous patient.

Indizes: *dynamische Navigation, Dentalimplantat, orale Implantologie, digitaler Workflow, Fallbericht, zahnloser Kiefer*

Einleitung

Für die Anwendung virtueller digitaler Planung im Bereich der Chirurgie sind verschiedene Methoden vorgeschlagen worden. Die computergestützten Techniken der Implantatchirurgie können in statische und dynamische Verfahren unterteilt werden¹. Statische Systeme verwenden Operations- bzw. Implantatschablonen, während dynamische Systeme die gewünschte Implantatposition mittels visueller Darstellung auf einem Monitors auf das Operationsfeld übertragen. Hohe Implantatüberlebensraten und ein akzeptabler Grad an Genauigkeit sind für die computergestützte Implantatchirurgie durch Studien belegt².

Die bildgeführte dynamische Navigation wurde mit dem Ziel entwickelt, anatomische Strukturen, wie den Knochen und die Zähne, zusammen mit den Spitzen der Bohrer während der implantatchirurgischen Arbeitsschritte sichtbar zu machen. Gegenwärtig handelt es sich bei den meisten kommerziell erhältlichen Navigationssystemen für die Zahnmedizin um optische Tracking-Systeme. Diese lassen sich wiederum in aktive und passive Systeme unterteilen. In der vorliegenden Studie kam ein aktives Trackingsystem (Yizhimei, Fa. Suzhou Digital-health care, Suzhou, China) zum Einsatz.

Das aktive Tracking-System umfasst fünf Hauptkomponenten: (1) eine Infrarot-Trackingkamera, (2) einen Bildschirm zur Darstellung der Bilder des Patienten und der Instrumentenposition mit (3) einem Notebook-Rechner, auf dem die Planung und Navigationssoftware läuft, (4) ein Winkelstück für die Bohrungen, das ein infrarotes Signal aussendet und (5) einen am Kiefer befestigten Patiententracker, der ebenfalls Infrarotlicht emittiert. Im unbezahnten Kiefer wird hierfür eine Halterung verwendet.

Nach Heranführung des Bohrers an die geplante Implantatstelle hilft die Bildschirmdarstellung dem Operateur dabei, den Bohrer präzise am geplanten Eintrittspunkt anzusetzen, entsprechend dem geplanten Eintrittswinkel auszurichten und die Bohrung mit der gewünschten Tiefe vorzunehmen³.

Die dynamische Navigation kann bei unbezahnten Patienten wichtige Vorteile gegenüber dem statischen Ansatz bieten. Hierzu zählen: (1) bessere Ergonomie, dank deren auch lange und angulierte Implantate geführt inseriert werden können, (2) bessere Vorhersagbarkeit der

Knochenreduktion durch die Möglichkeit, die Tiefe der Implantatschulter zu überprüfen, (3) besser passende Schablonen, wodurch Navigationsfehler ausgeschlossen werden und (4) Möglichkeit, die Planung während des Eingriffs zu betrachten und abhängig vom taktilen Feedback oder bei unerwarteten Komplikationen anzupassen und zu verändern⁴. Allerdings fehlen klinische Berichte zum Einsatz dynamischer Navigationssysteme für implantatgetragene Full-arch-Rehabilitationen bei zahnlosen Patienten.

Ziel der vorliegenden Studie war es daher, einen digitalen Workflow für die prothetisch orientierte Implantatnavigation bei einer zahnlosen Patientin zu beschreiben.

Kasuistik

Eine 55-jährige Patientin wurde an die Universitätszahnklinik der Universität Peking zur implantatprothetischen Rehabilitation überwiesen. Die allgemeinmedizinische Anamnese war unauffällig. Die Patientin wünschte Ersatz für ihre fehlenden Zähne, nachdem die gesamte Restbe-zahnung 3-Monate zuvor extrahiert worden war. Die vorgeschlagene Versorgung mit implantatgetragenen Full-arch-Brücken wurde akzeptiert.

Alle beschriebenen Behandlungsmaßnahmen entsprechen klinischem Standard und wurden in Einklang mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Die Patientin stimmte neben der Behandlung auch der Publikation des vorliegenden Artikels zu. Bilder der Patientin sowie persönliche und klinische Details werden unter Wahrung ihrer Anonymität präsentiert. Alle in der Studie gewonnenen und ausgewerteten Daten sind im vorliegenden Artikel aufgeführt.

Zur Anwendung kam ein Protokoll mit digital navigierter Implantatsetzung und Sofortprovisorien (Abb. 1 und 2). Die Integration des geplanten Zahnersatzes in das kraniofaziale Modell wurde über eine Doppelscantechnik mit Markern realisiert. Als Röntgenschablonen wurden hierfür Repliken der Prothesen der Patientin aus einem Acrylkunststoff hergestellt. Sechs bis acht röntgendichte Gut-tapercha-Marker wurden entlang der vestibulären Fläche der Prothesenbasen platziert (Abb. 3a bis c). Die zentrische Kondylenposition und okklusale Vertikaldimension wurden bestimmt und die jeweilige Schablone während der Aufnahme der DVT mit einem Silikonstopp gegen den Gegenkiefer fixiert. Es wurden zwei separate DVT durchgeführt: eine mit der Röntgenschablone und dem Silikon-

Case report

A 55-year-old female patient was referred to the Peking University School and Hospital of Stomatology for implant-supported prosthetic rehabilitation. The patient had no relevant medical history. She presented for the replacement of missing teeth. All of her teeth had been removed more than 3 months previously. Treatment with implant-supported fixed dental prostheses was proposed and accepted.

The reported procedures were carried out following standard clinical procedures and in accordance with the Declaration of Helsinki. The patient gave her consent for the treatment as well as for the publication of this article. The identifying images and other personal or clinical patient details are presented without compromise of patient anonymity. All data generated or analyzed in the present study are included in this article.

A digital navigation implant surgery/immediate provisionalization protocol was followed (Figs 1 and 2). The integration of a planned prosthesis into a craniofacial model could be achieved through a double-scan technique and fiducial markers. An acrylic resin radiographic guide was fabricated that replicated the patient's denture. Six to eight radiopaque gutta-percha markers were placed along the buccal flanges (Fig 3a to c). The centric relation and occlusal vertical dimension were determined, and silicone rubber was used to stabilize the radiographic guide against the opposing dentition during the CBCT scanning. Two separate CBCT scans were acquired: one including the radiographic guide and silicone rubber, and the other including the radiographic guide alone. The second scan was performed using different exposure parameters to allow 3D visualization via the planning software. As the radiopaque markers were visible in both scans, they could be combined so that the prosthesis could be positioned accurately in both the maxilla and the mandible⁵. The prefabricated denture could be displayed using the planning software, and the 3D position of the implants adjusted based on the prosthesis used and the regional anatomy (Fig 3d). The entrance points of the self-drilling titanium mini screws, which served as fiducial markers, could also be determined in the software, as titanium screws may disturb the implant pathway if they are inserted at random (Fig 3e). Then, a 3D-printed template guide for the titanium screws was fabricated for use during the surgery (Fig 3f).

On the day of surgery, bone-anchored titanium mini screws were inserted into the residual bone under local anesthesia, with assistance from the static guide, which was superimposed on the CBCT image. These markers were used

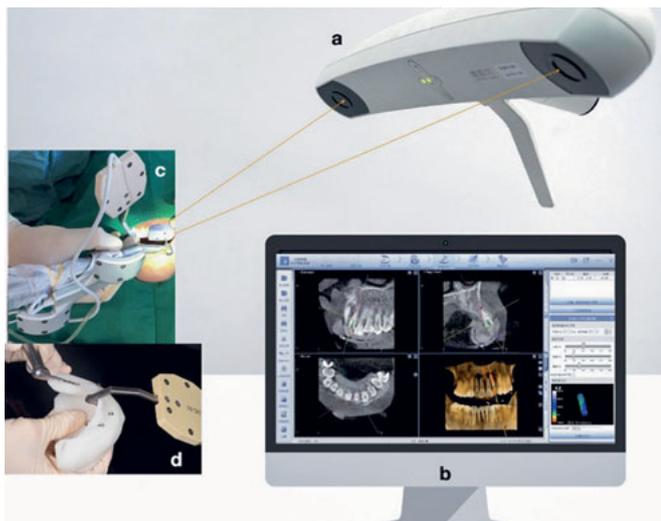


Fig 1 This system consists of five main components: An infrared tracking camera (a). A screen with the images of the patient and position of the instrument as well as a notebook computer running the planning and guidance software (b). A drilling handpiece, which emits infrared light (c). A patient tracker fixed on the jaw, which also emits infrared light; for a fully edentulous jaw, an implant and a matching bracket is utilized (d).

Abb. 1 Dieses System umfasst fünf Hauptkomponenten: eine Infrarot-Trackingkamera (a), einen Bildschirm für die Darstellung des Patienten und der Instrumentenposition sowie ein Notebook, auf dem die Planungs- und Navigationssoftware läuft (b), ein Infrarotlicht emittierendes Winkelstück (c) und einen am Kiefer fixierten Patienten-Tracker, der ebenfalls Infrarotlicht aussendet; im unbezahnten Kiefer wird hierfür ein Implantat und eine Halterung verwendet (d).

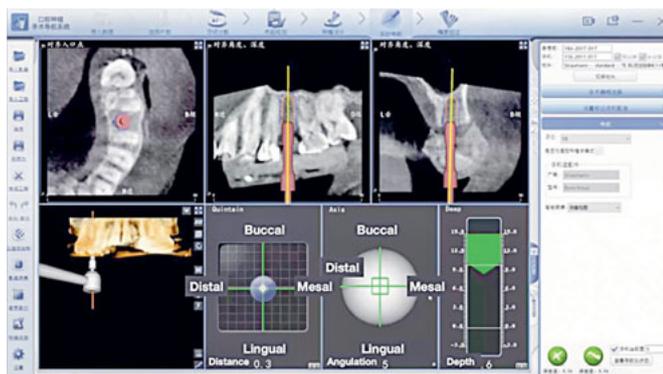


Fig 2 Dental implant placement controlled at all planes and depths.

Abb. 2 Kontrolle der Implantatplatzierung in allen Raumebenen sowie der Insertionstiefe.

stopp, die andere nur mit der Röntgenschablone. Für die zweite DVT wurden die Aufnahmeparameter verändert, um die dreidimensionale Darstellung in der Planungssoftware zu ermöglichen. Da die röntgendichten Marker sich in beiden Aufnahmen darstellten, war eine Überlagerung möglich, sodass die Prothesen in beiden Kiefern exakt platziert werden konnten⁵. Die vorgefertigten Prothesen konnten in der Planungssoftware dargestellt und die Implantatpositionen unter Berücksichtigung der Prothesen und der lokalen anatomischen Situation geplant werden (Abb. 3d). Auch die Eintrittspunkte der selbstschneidenden Titan-Miniimplantate, die als Marker fungierten, wurden in der Software geplant, da willkürlich platzierte Miniimplantate mit den Positionen der prothetischen Implantate interferieren können (Abb. 3e). Anschließend wurde eine 3-D-gedruckte Schablone für die Miniimplantate hergestellt, die während des Eingriffs zum Einsatz kam (Abb. 3f).

Am Tag des Eingriffs wurden unter Lokalanästhesie und mithilfe der statischen Schablone, die auf die DVT-Darstellung überlagert wurde, die Titan-Miniimplantate in den Restknochen inseriert. Sie dienten als Marker für die intraoperative Korrelation der virtuellen Bilder mit der tatsächlichen Kieferposition (Abb. 4a und b). Mit den Markern in situ wurde eine weitere DVT aufgenommen, die gemeinsam mit den chirurgischen Planungsdaten als Input für das Navigationssystem diente.

Während der Operation wurde im Unterkiefer die Primärinzision entlang der Kammitte und eine mediane vertikale Entlastungsinzision durchgeführt, um durch Präparation eines Mukoperiostlappens den Knochentamm freizulegen. Zunächst wurde dann als stabile Verankerung für den Patienten-Tracker ein Einzelimplantat freihändig in Regio 32 eingesetzt (Abb. 4c). Der Insertionstorque dieses Ankerimplantats lag bei > 35 Ncm. Anschließend wurde das Winkelstück für die Bohrungen kalibriert, gefolgt von der intraoralen Punktpaar-Registrierung mit den Marken. Die genannten Arbeitsschritte stellen den Zusammenhang zwischen dem virtuellen Koordinatensystem und dem Operationsbereich her. Auf dem Monitor waren nun sagittale, koronale und axiale Schnitt- und die 3-D-Rekonstruktion zusammen mit dem Bohrvorgang in Echtzeit präsent. Im nächsten Schritt wurde das Niveau der Implantatschulter mit einem kleinen Rosenbohrer markiert (Abb. 4d). Ziel war eine Knochenreduktion um 1 mm in der Koronalebene, und der Kammknochen wurde dementsprechend abgetragen und geglättet. Nun folgte die Präparation des Implantat-

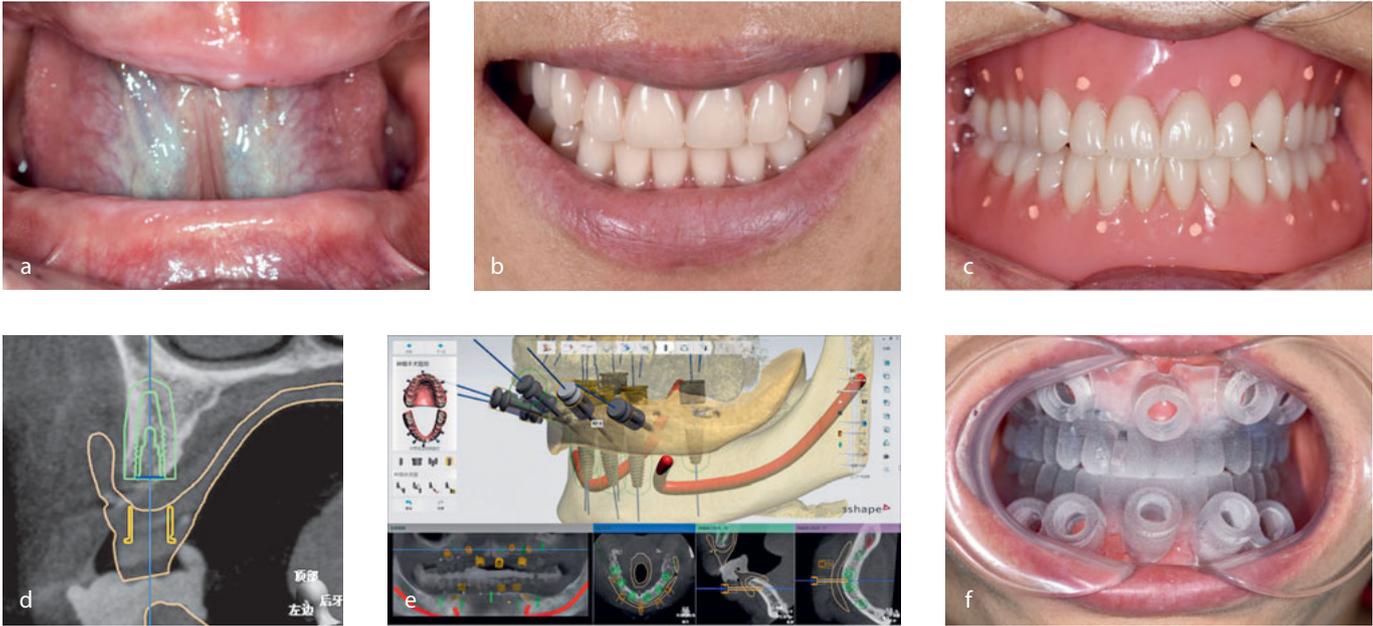


Fig 3 Preoperative clinical view (a). Intraoral view of radiographic guide (b). Radiographic guide with radiopaque markers (c). Dental implant planning based on prosthesis needs and the regional anatomy (green cylinder; d). Virtual planning of the 3D position of the titanium mini screws, thereby avoiding the disturbance of the implant pathways (e). Intraoral view of the static guide for the titanium mini screws (f).

Abb. 3 Ausgangssituation (a). Intraorale Ansicht der Röntgenschablonen (b). Die Röntgenschablonen versehen mit röntgendichten Markern (c). Implantatplanung anhand der prothetischen Anforderungen und anatomischen Situation (grüner Umriss) (d). Virtuelle Planung der 3-D-Positionen der Titan-Miniimplantate zur Vermeidung von Überschneidungen mit den Positionen der prothetischen Implantate (e). Intraorales Bild mit den Schablonen für die statisch geführte Insertion der Miniimplantate (f).

lagers. Während des Bohrens werden verschiedene Ansichten dargestellt, die eine Überwachung des Abstandes zwischen der Bohrspitze und dem geplanten Osteotomieverlauf (in Millimetern), des Bohrerwinkels in Relation zur geplanten Osteotomieachse (in Grad) und der Tiefendifferenz zwischen der Bohrspitze und dem apikalsten Punkt der geplanten Osteotomie (in Millimetern) ermöglichen (Abb. 4e). Nach der Präparation der Implantatlager wurden die Implantate freihändig eingesetzt. Der chirurgische Ablauf war für alle Implantate im Unter und Oberkiefer derselbe, ausgenommen das Implantat in Regio 17 (Abb. 4f): An dieser Stelle war das Knochenvolumen des Oberkiefers insuffizient, weshalb nach der Präparation des Implantatlagers zusätzlich eine transkrestale Sinusbodenaugmentation erfolgte, die ohne Navigation durchgeführt wurde. Nach den freihändig platzierten Ankerimplantaten 32 und 22 wurden alle übrigen 10 Implantate entsprechend der DVT-basierten, prothetisch orientierten Planung unter dynamischer Führung inseriert (Abb. 4 g und h).

intraoperatively to map the virtual images to the actual patient position (Figs 4a and b). Another CBCT scan was then performed with the fiducial markers in situ. Both the surgical planning data and the second CBCT scan served as inputs for the navigation system.

During surgery, a midcrestal incision and vertical releasing incision in the midline were made at the mandible. After mucoperiosteal flap elevation, the bone crest was exposed. A single implant was inserted freehand into implant site 32 to provide a stable anchor for the patient tracker (Fig 4c). The insertion torque of the anchored implant was > 35 Ncm. Then, calibration of the drilling handpiece was performed, followed by intraoral paired-point registration with the fiducial markers. The procedures outlined above established the relationship between the virtual coordinate system and the surgical field. Sagittal, coronal, axial, and 3D reconstruction images were displayed on the screen, as was the drilling process in real time. A small round bur was used to mark the level of the implant shoulder (Fig 4d). The target was bone reduction of 1 mm in the coronal plane, and the bone crest was reduced

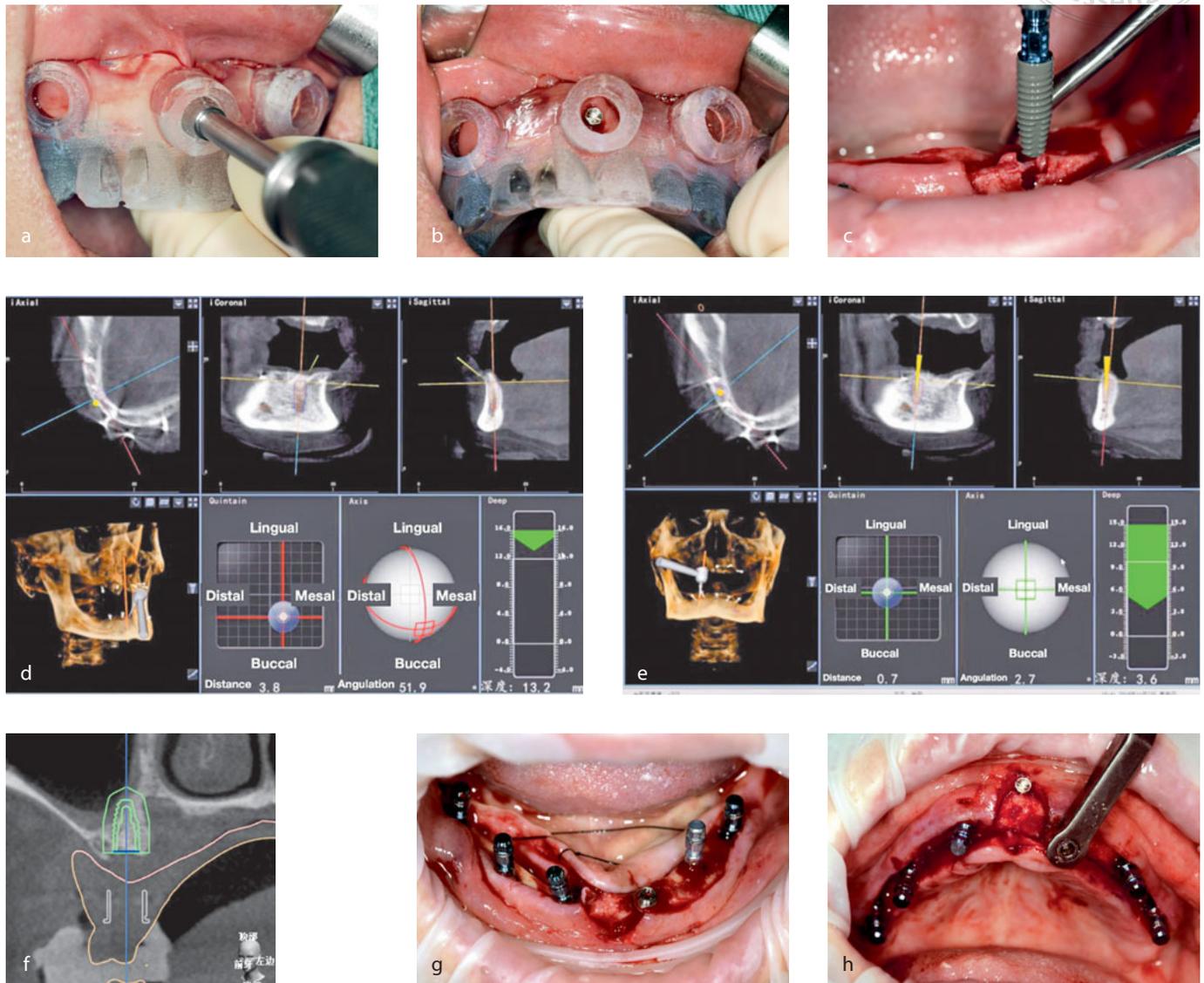


Fig 4 Bone-anchored titanium mini screws were inserted into the residual bone under local anesthesia with the assistance of the guide template (a). Bone-anchored titanium mini screw on the surgical site (b). A single implant was inserted freehand at site 32 to provide a stable anchor for the patient tracker (c). A small round bur was used to mark the level of the implant shoulder with the assistance of dynamic navigation (d). During drilling, the different views presented allowed the surgeon to observe, in real time, the distance (mm) between the drill tip and the path of the planned osteotomy, the angle of the drill in relation to the planned osteotomy axis, and the depth difference (mm) between the tip of the drill and the apical end of the planned osteotomy (e). The vertical volume of bone was insufficient; therefore, a sinus lift through the crest was performed after osteotomy (f). Except for the anchored implants at sites 32 and 22, the other 10 implants were placed using a prosthetically directed CBCT-based plan and dynamic surgical guidance (g and h).

Abb. 4 Schablonengeführte Insertion der Titan-Miniimplantate unter Lokalanästhesie in den Restknochen (a). Knochenverankertes Miniimplantat in situ (b). Als stabiler Anker für den Patienten-Tracker wurde zunächst das Implantat in Regio 32 freihändig inseriert (c). Das Niveau der Implantatschultern wurde unter dynamischer Navigation mit einem kleinen Rosenbohrer markiert (d). Während des Bohrens konnte der Chirurg anhand der Bildschirm-Ansichten die Abweichung (mm) zwischen der Bohrerspitze und dem geplanten Osteotomieverlauf, die Winkelabweichung (Grad) des Bohrers von der geplanten Osteotomieachse und die Tiefendifferenz (mm) zwischen der Bohrerspitze und dem apikalen Endpunkt der geplanten Osteotomie in Echtzeit beobachten (e). In Regio 17 war das vertikale Knochenvolumen unzureichend, weshalb hier nach der Implantatbettpräparation eine transkrestale Sinusbodenaugmentation durchgeführt wurde (f). Außer den Ankerimplantaten in den Regionen 32 und 22 wurden alle Implantate gemäß der prothetisch orientierten, DVT-basierten Planung mithilfe dynamischer Navigation inseriert (g und h).



Fig 5a to c A provisional metal-reinforced acrylic resin prosthesis was secured to the implants within 24 h and the prosthetic screws were tightened.

Abb. 5a bis c Innerhalb von 24 Stunden nach dem Eingriff wurden metallverstärkte Kunststoffprothesen als Provisorien auf den Implantaten verschraubt.

Der Insertionstorque der meisten Implantat lag bei > 35 Ncm. Es wurden Multi-unit-Abutments verwendet und eine Sofortbelastung durchgeführt. Nur für das Implantat 46 war keine ausreichend Primärstabilität erreicht worden, weshalb hier lediglich ein Gingivaformer zum Einsatz kam. Nach Abschluss der Implantatsetzung wurde eine postoperative DVT aufgenommen. Als Provisorien wurden innerhalb von 24 Stunden metallverstärkte Kunststoffprothesen auf den Implantaten verschraubt (Abb. 5). Die Patientin erhielt für 5 Tage Antibiotika, Schmerzmittel und eine 0,12 %ige Chlorhexidinlösung als Mundspülung. Nach 4 Monaten wurde der definitive Zahnersatz eingegliedert (Abb. 6).

Die röntgendichten Marker ermöglichten eine exakte Überlagerung der prä- und postoperativen DVT-Daten. Von einem kalibrierten und verblindeten Untersucher wurden Messungen zur Insertionsgenauigkeit durchgeführt. Gemessen wurden die räumliche Abweichung der Implantatplattform und des Implantatapex sowie die Abweichung der Implantatachse des platzierten Implantats von der geplanten Position. Das in der vorliegenden Studie verwendete dynamische Navigationssystem umfasst eine validierte Software mit der eine exakte Auswertung durchgeführt werden kann. Die prä- und postoperativen DVT-Daten wurden zueinander ausgerichtet, die Positionen der einzelnen Implantate aus den postoperativen DVT-Daten und die Winkelabweichungen zwischen der tatsächlichen und der geplanten Position berechnet (Abb. 7). Die Ergebnisse zeigten, dass alle Implantate exakt gemäß der Behandlungsplanung platziert waren (Tabellen 1 und 2).

and smoothed accordingly. Then, osteotomy site preparation was performed. During drilling, different views were presented that enabled the surgeon to observe in real time the distance between the drill tip and the path of the planned osteotomy (in millimeters), the angle of the drill in relation to the planned osteotomy axis (in degrees), and the depth difference between the tip of the drill and the apical end of the planned osteotomy (in millimeters; Fig 4e). Following osteotomy site preparation, the implants were placed freehand. The surgery proceeded similarly for the maxilla and mandible, except for implant site 17 (Fig 4f). In the maxilla, the vertical bone volume was insufficient at site 17, so sinus lift through the crest was performed after osteotomy. This step was performed without navigation. With the exception of the anchored implants at sites 32 and 22, the other 10 implants were placed following a prosthetically driven CBCT-based plan under dynamic surgical guidance (Fig 4g and h).

The insertion torque of most implants was > 35 Ncm. Multiunit abutments were placed, and immediate loading was performed. As primary stability of the implant at site 46 could not be achieved during surgery, a healing abutment was screwed in place. Following implant placement, a postoperative CBCT scan was performed. A provisional metal-reinforced acrylic resin prosthesis was secured to the implants within 24 h, and the prosthetic screws were tightened (Fig 5). The patient underwent a 5-day course of antibiotics, analgesics, and 0.12% chlorhexidine solution as a mouthwash. After 4 months, a permanent prosthesis was finalized (Fig 6).

The radiopaque markers enabled the accurate superimposition of the preoperative and postoperative CBCT scans. The measurement was accomplished by a single calibrated and blinded examiner. The 3D deviation at implant platform and at implant apex as well as the deviation of implant axis of

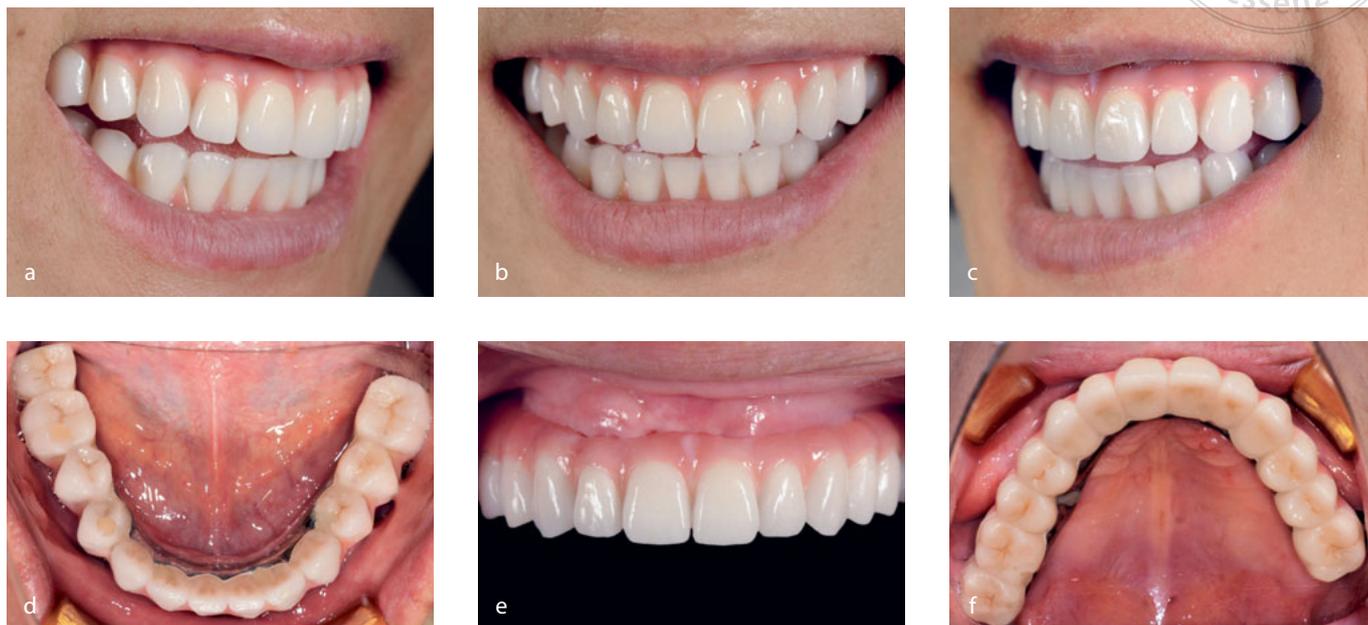


Fig 6a to f Permanent prosthesis.

Abb. 6a bis f Der definitive Zahnersatz.



Fig 7
Dental implant planning (blue cylinders) and dental implant placement (white cylinders).

Abb. 7 Abweichungen zwischen der Implantatplanung (blau) und den tatsächlichen Implantatpositionen (weiß).

the placed relative to the planned implant positions were measured. The dynamic navigation system used in this study included validated software, allowing for accurate evaluation: pre- and postoperative CBCT scans were registered to each other, and the position of each implant in the postoperative scan was detected. Angle deviations between the actual and planned positions were calculated (Fig 7). The results showed that all implants were placed precisely, in accordance with the treatment plan (Tables 1 and 2).

Diskussion

Die computergestützte Implantatnavigation wurde zur exakten Übertragung digital geplanter Implantatpositionen auf das Operationsfeld entwickelt. Bei der statischen Navigation werden die Implantatbohrungen und die Implantatsetzung durch CAD/CAM-gefertigte Operationschablonen präzise geführt. Die statische Schablone liefert einen zuverlässigen Transfer der geplanten Implantatposition. Bei der dynamischen Implantatnavigation werden mit der Technik des Motion-Tracking die Bohrinstrumente und die Kieferposition in Echtzeit erfasst und auf dem Bildschirm mit der virtuellen Planung überlagert. Zudem werden die räumliche Abweichung des Bohrers und Implantats von der virtuell geplanten Position, ebenfalls in Echtzeit, angezeigt, sodass die Bohrtiefe, der Winkel oder die Implantatposition jederzeit korrigiert werden können. Gegenwärtig werden in der zahnärztlichen Implantologie überwiegend digital konstruierte statische Operationschablonen verwendet.

Verglichen mit der statischen Navigation, die das Implantat in eine konkrete präoperativ geplante Position führt, ermöglicht die dynamische Navigation eine deutlich flexiblere Operationsplanung, die jederzeit, das heißt auch intraoperativ, auf Veranlassung des Operateurs angepasst werden kann. In problematischen anatomischen Situatio-

Table 1 Implant data

Tabelle 1 Implantatdimensionen.

Implant site/ Implantatstelle	Diameter (mm)/ Durchmesser (mm)	Length (mm)/ Länge (mm)
16	4.1	8
14	4.1	10
12	4.1	12
22	4.1	12
24	4.1	12
26	4.1	8
36	4.1	8
34	4.1	12
32	4.1	12
42	4.1	12
44	4.1	10
46	4.1	8

Table 2 Descriptive deviation values at the apical (mm), coronal (mm), and angular (degree) levels

Tabelle 2 Deskriptive Auswertung der koronalen (mm), apikalen (mm) und Winkelabweichung (°).

Implant site/ Implantatstelle	Platform/ Plattform	Apical/ Apex	Angular deviation/ Winkel
16	1.833	1.900	2.836
14	0.924	0.799	1.773
12	0.765	0.669	2.006
24	0.953	0.605	2.088
26	0.675	0.871	1.393
36	0.545	0.405	1.380
34	0.562	1.001	2.393
42	0.885	1.196	5.163
44	0.427	0.487	1.749
46	0.954	1.147	2.501

nen kann das sehr wichtig sein. Mit der dynamisch navigierte Implantatinsertion wird eine präzise räumliche Implantatposition, einschließlich Insertionstiefe und Insertionswinkel, angestrebt.

Die Literatur bietet bereits systematische Übersichtsarbeiten zur statischen Implantatnavigation⁶. Die maximale Abweichung und Winkeldiskrepanz waren dabei keineswegs klinisch akzeptabel, was auf gewisse mit statischen Implantatschablonen verbundene Risiken hinweist. Fehler sind hier während verschiedener Arbeitsschritte möglich und zu kritischen anatomischen Strukturen sollte ein Sicherheitsabstand eingeplant werden⁷. Bei Unbezahnten kann die intraoperative Stabilität schleimhautgelagerter Operationsschablonen durch Verschraubung am Knochen verbessert werden, was Diskrepanzen zwischen der geplanten und der tatsächlichen Behandlung reduziert⁸. Allerdings lässt sich die Genauigkeit der statischen Führung vor oder während der Implantatbettpräparation kaum kontrollieren. Ein Alleinstellungsmerkmal der dynamischen Navigation ist die Möglichkeit, die Genauigkeit der Registrierung vor der Präparation zu überprüfen, in dem der Operateur markante Kieferstellen mit der Bohrer Spitze berührt und dabei beobachtet, wie exakt dies auf

Discussion

CAI systems were developed for accurate transference of digitally planned 3D implant positions to the surgical site. The static CAIS system is a CAD/CAM-generated surgical guide that precisely guides implant drilling and placement. The static guide allows the reliable transfer of the planned implant position. The dynamic CAIS system uses motion tracking technology to track implant drilling instruments and the patient's jaw position in real time on the monitor, superimposed on the virtual plan. The 3D deviation of the drill and implant from the virtual planned position can be seen in real time, and the drilling depth and angle or implant position can be adjusted at any time. Currently, digitally designed static guides are commonly used for dental implant placement.

Compared with static guidance, which is able to guide the implant to a particular presurgically planned position, dynamic navigation guidance provides a much more flexible surgical plan that can be replanned at any time, even during the surgery, at the surgeon's behest. This is of great importance when a surgeon is confronted with a challenging anatomical situation. By placing implants with the

dynamic navigation approach, a precise position in the 3D area is pursued, including the insertion depth and the angle.

Systematic reviews that focus on the accuracy of static guidance have been published⁶. The maximum deviation and angle discrepancy were far from clinically acceptable, which highlights the risks associated with the use of static guides. Mistakes may occur at various stages, and a safety margin around vital structures is recommended⁷. In fully edentulous cases, the fixation of a mucosa-supported surgical guide with screws allows greater transoperative stability, reducing discrepancies between the planned and the actual treatment⁸. However, it is not easy to evaluate the accuracy of static guidance prior to or during osteotomy site preparation. A unique aspect of dynamic navigation is that the registration accuracy can be evaluated quickly prior to osteotomy by using the drill tip to touch the visible jaw locations and observe how accurately these are mapped to the CT image. In other words, dynamic navigation enables 'on-the-spot' verification of surgical accuracy, greatly reducing the likelihood of unacceptably large guidance errors.

In fully edentulous cases, titanium mini screws are needed for registration of the navigation system. The position and number of the fiducial markers are based on the general guidelines for the registration method used, and pertain to: 1) the spreading out of the fiducial markers; 2) the placement of the centroid of the configuration as close as possible to the critical surgical region; 3) the avoidance of linear or near-collinear marker configurations; and 4) the placement of more markers around the target field than elsewhere⁹. Normally, the screws are screwed into the bone freehand. In the present case, however, a 3D-printed template guide was used to avoid disturbing the implant pathway.

Mediavilla Guzmán et al performed 20 *in vitro* osteotomies using dynamic navigation and reported an accuracy of 0.78 mm for entry point deviation, 1.20 mm for apex deviation, and 2.95 degrees for mean angle deviation¹⁰. Block et al reported placement accuracy for a different dynamic navigation system when treating 100 partially edentulous patients; the mean entry point deviation was 0.87 mm, the mean apex deviation was 1.56 mm, and the mean angle deviation was 3.62 degrees¹¹. These data support the conclusion that implant placement under dynamic navigation guidance is at least similar to, if not better than, that under static guidance. While both static and dynamic image navigation are highly accurate, dynamic navigation systems have the following advantages: 1) the patient can be scanned, planned, and undergo surgery on the same day; 2) the surgical plan can be altered during sur-

die DVT-Rekonstruktionen am Bildschirm übertragen wird. Das heißt, die dynamische Navigation ermöglicht eine Verifizierung der operativen Genauigkeit „an Ort und Stelle“, was die Wahrscheinlichkeit inakzeptabel großer Navigationsfehler drastisch reduziert.

Im unbezahnten Kiefer werden Titan-Miniimplantate für die Registrierung im Navigationssystem benötigt. Die Position und Anzahl der Marker richten sich nach den allgemeinen Richtlinien für die verwendete Methode der Registrierung. Dabei sind zu beachten: (1) die Ausdehnung der Markerkonfiguration, (2) die Platzierung des geometrischen Schwerpunkts (Zentroid) der Konfiguration möglichst nahe am chirurgisch kritischen Bereich, (2) das Vermeiden von kollinearen oder annähernd kollinearen Markerkonfigurationen sowie (4) eine erhöhte Markerdichte um den Zielbereich⁹. In der Regel werden die Miniimplantate freihändig in den Knochen geschraubt. Im vorliegenden Fall wurde jedoch eine 3-D-gedruckte Schablone verwendet, um Überschneidungen mit der geplanten Lage der prothetischen Implantate zu vermeiden.

Mediavilla Guzmán et al. berichteten nach Durchführung von 20 dynamisch navigierten Implantatbettpräparationen von einer Eintrittspunktabweichung von 0,78 mm, einer Apexabweichung von 1,20 mm und einer Winkelabweichung von 2,95°¹⁰. Block et al. werteten die Genauigkeit der Implantatsetzung mit einem anderen dynamischen Navigationssystem an 100 behandelten teilbezahnten Patienten aus und gaben eine mittlere Abweichung des Eintrittspunktes von 0,87 mm, des Apex von 1,56 mm und des Winkels von 3,62° an¹¹. Diese Daten stützen die Schlussfolgerung, dass die Implantatsetzung unter dynamischer Navigation mindestens vergleichbar, wenn nicht besser, als die unter statischer Führung ist. Sowohl die statische Führung als auch die Navigation mit dynamischen Bildern sind sehr genau, aber dynamische Systeme bieten folgende Vorteile: (1) Der Patient kann an demselben Tag geröntgt und gescannt, geplant und operiert werden, (2) die Operationsplanung kann intraoperativ angepasst werden, wenn die Situation eine Änderung erfordert. (3) das gesamte Operationsfeld kann zu jedem Zeitpunkt visualisiert werden und (4) die Genauigkeit kann jederzeit verifiziert werden. Im teilbezahnten Kiefer wird der Patienten-Tracker über eine Schiene auf der Restbeziehung befestigt, während im unbezahnten Kiefer eine Implantat im Kieferknochen verankert wird. Stefanelli et al. berichten, dass die Genauigkeit der Implan-

tatsetzung bei der implantatbasierten Verankerung in unbezahnten Fällen ebenso hoch war, wie die Genauigkeit in teilbezahnten Kiefern¹². Eine Studie von Wittwer et al. an 20 Patienten mit unbezahnten Unterkiefern ergab für 78 Implantate eine mittlere Abweichung des Eintrittspunktes von $1,1 \pm 0,7$ mm und des Apex von $0,8 \pm 0,6$ mm, was einer für die geführte Implantatchirurgie akzeptablen Genauigkeit entspricht¹³. In der vorliegenden Untersuchung betrug die mittlere koronale Abweichung $0,85 \pm 0,39$ mm, die mittlere apikale Abweichung $0,91 \pm 0,44$ mm und die mittlere Winkelabweichung $2,3 \pm 1,1^\circ$. Verglichen mit anderen publizierten Studien ist dies ein gutes Ergebnis.

Allerdings sind Navigationssysteme nicht nur in der Anschaffung, sondern auch in der Einarbeitung teuer (aufgrund der mit dieser Technik verbundenen Lernkurve ist in der Regel ein Training erforderlich). Der Operateur muss lernen, dem chirurgischen Vorgehen auf einem Monitor zu folgen, und die Übersetzung der Monitorinformationen zur lateralen und Winkelabweichungen auf den realen Patienten erfordert ein hohes Maß an Koordination zwischen Auge und Hand. Es wurde berichtet, dass sich die Genauigkeit der Implantatplatzierung nach Durchführung von 20 dynamisch navigierten Standardimplantat-Insertionen verbessert¹¹. Demgegenüber zeigten Cassetta und Bellardini, das bei Verwendung eines statischen geführten computergestützten Implantatchirurgiesystems zwischen erfahrenen und unerfahrenen Chirurgen kein signifikanter Unterschied bezüglich der Genauigkeit der Implantatplatzierung bei unbezahnten Patienten bestand¹⁴. Dank Augmented Reality kann sich der Chirurg inzwischen die präoperativen Planungsdaten über ein portables Gerät auch direkt über dem Operationsbereich einblenden lassen¹⁵.

Schlussfolgerung

Innerhalb der Grenzen des vorliegenden Fallberichts erwies sich der vorgestellte voll-digitale Workflow für die prothetisch orientiert navigierte Implantatchirurgie bei einer unbezahnten Patientin als geeignetes Protokoll für die Versorgung mit feststehendem implantatgetragenen Zahnersatz. Die Genauigkeit und Präzision dieses Workflows muss jedoch durch hochwertige Evidenz bestätigt werden.

gery when the clinical situation dictates a change; 3) the entire field can be visualized at all times; and 4) accuracy can be verified at all times. A splint connected to the patient tracker can be attached to the remaining teeth in partially edentulous cases. In fully edentulous arches, an implant is inserted into the jaw to provide a stable anchor for the patient tracker. Stefanelli et al reported that, when using the implant-based jaw attachment approach, placement accuracy in fully edentulous cases was equivalent to that obtained in partially edentulous jaws¹². The study of Wittwer et al included 20 patients with fully edentulous mandibles¹³. For 78 implants, the mean entry deviation was 1.1 ± 0.7 mm, and the mean apex deviation was 0.8 ± 0.6 mm, which indicated acceptable accuracy in guided implant surgery¹³. In the present study, the mean coronal deviation was 0.85 ± 0.39 mm, the mean apical deviation was 0.91 ± 0.44 mm, and the mean angular deviation was 2.3 ± 1.1 degrees. This appears to be a good result compared with other studies reported in the literature.

However, navigation systems are expensive, not only in terms of equipment costs but also training costs (training is usually required, given the learning curve associated with this approach). The operator must become accustomed to following the surgical progress on a monitor, and high-level eye-hand coordination is needed to translate lateral and angle deviation information from the monitor to the actual patient. It has been reported that the accuracy of implant placement was improved after 20 standard dental implant placements using the navigation approach¹¹. In contrast, Cassetta and Bellardini demonstrated that, when using a static CAI system, implant placement accuracy in fully edentulous patients was not significantly different between experienced and inexperienced surgeons¹⁴. However, due to the development of augmented reality, surgeons can now directly visualize preoperatively planned data over the area of the operating field via a wearable device¹⁵.

Conclusion

Within the limitations of the present case report, the fully digital workflow presented for prosthetically driven implant navigation surgery in an edentulous patient suggests that this protocol is suitable for treatment of fully edentulous patients requiring implant-supported fixed restorations. High-level evidence is needed to determine the accuracy and precision of this workflow.



Acknowledgments

The authors thank Yizhimei (Suzhou, China) for the technical support.

Disclaimer

The authors declare no conflicts of interest. This research received no external funding.

References

- Jung RE, Schneider D, Ganeles J, et al. Computer technology applications in surgical implant dentistry: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2009;24(suppl):92–109.
- Tallarico M, Esposito M, Khanari E, Caneva M, Meloni SM. Computer-guided vs freehand placement of immediately loaded dental implants: 5-year postloading results of a randomised controlled trial. *Eur J Oral Implantol* 2018;11:203–213.
- Mandelaris GA, Stefanelli LV, DeGroot BS. Dynamic navigation for surgical implant placement. Overview of technology, key concepts, and a case report. *Compend Contin Educ Dent* 2018;39:614–621.
- Gargallo-Albiol J, Barootchi S, Salomó-Coll O, Wang H. Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review. *Ann Anat* 2019;225:1–10.
- Verhamme LM, Meijer GJ, Boumans T, de Haan AFJ, Bergé SJ, Maal TJJ. A clinically relevant accuracy study of computer-planned implant placement in the edentulous maxilla using mucosa-supported surgical templates. *Clin Implant Dent Relat Res* 2015;17:343–352.
- Tahmaseb A, Wu V, Wismeijer D, Coucke W, Evans C. The accuracy of static computer-aided implant surgery: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res* 2018;29(suppl 16):416–435.
- Vieira DM, Sotto-Maior BS, Barros CA, Reis ES, Francischone CE. Clinical accuracy of flapless computer-guided surgery for implant placement in edentulous arches. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2013;28:1347–1351.
- Chen Z, Li J, Sinjab K, Mendonca G, Yu H, Wang HL. Accuracy of flapless immediate implant placement in anterior maxilla using computer-assisted versus freehand surgery: a cadaver study. *Clin Oral Implants Res* 2018;29:1186–1194.
- West JB, Fitzpatrick JM, Toms SA, Maurer CR Jr, Maciunas RJ. Fiducial point placement and the accuracy of point-based, rigid body registration. *Neurosurgery* 2001;48:810–816.
- Mediavilla Guzmán A, Riad Deglow E, Zubizarreta-Macho Á, Agustín-Panadero R, Hernández Montero S. Accuracy of computer-aided dynamic navigation compared to computer-aided static navigation for dental implant placement: an in vitro study. *J Clin Med* 2019;8:2123.
- Block MS, Emery RW, Lank K, Ryan J. Implant placement accuracy using dynamic navigation. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2017;32:92–99.
- Stefanelli LV, DeGroot BS, Lipton DI, Mandelaris GA. Accuracy of a dynamic dental implant navigation system in a private practice. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2019;34:205–213.
- Wittwer G, Adeyemo WL, Schicho K, Gigovic N, Turhani D, Enislidis G. Computer-guided flapless transmucosal implant placement in the mandible: a new combination of two innovative techniques. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2006;101:718–723.
- Cassetta M, Bellardini M. How much does experience in guided implant surgery play a role in accuracy? A randomized controlled pilot study. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2017;46:922–930.
- Edwards PJ, King AP, Hawkes DJ, et al. Stereo augmented reality in the surgical microscope. *Stud Health Technol Inform* 1999;62:102–108.

Danksagung

Die Autoren danken der Firma Yizhimei (Suzhou, China) für die technische Unterstützung.

Hinweis

Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte vorliegen. Für diese Forschungsarbeit wurden keine externen Gelder in Anspruch genommen.



Miaozhen Wang

Miaozhen Wang, DMD

Peking University Hospital of Stomatology, First Clinical Division & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering, Laboratory for Digital and Material Technology of Stomatology & Beijing, Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing, China

Mijiritsky Eitan, DMD

Department of Otolaryngology, Head and Neck Surgery and Maxillofacial Surgery, Tel Aviv Sourasky Medical Center, Sackler School of Medicine, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

Yalin Zhan, DMD

Peking University Hospital of Stomatology, First Clinical Division & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering, Laboratory for Digital and Material Technology of Stomatology & Beijing, Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing, China

Huidan Shen, DMD

Peking University Hospital of Stomatology, First Clinical Division & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering, Laboratory for Digital and Material Technology of Stomatology & Beijing, Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing, China

Feng Liu, DMD

Peking University Hospital of Stomatology, First Clinical Division & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering, Laboratory for Digital and Material Technology of Stomatology & Beijing, Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing, China

Address Dr Feng Liu, Peking University Hospital of Stomatology, First Clinical Division, 37 A Xishiku Street, Xicheng District, Beijing, 100034, China; Tel: +86 010 53295162; Email: dentistliufeng@126.com