



3D-Navigation in der oralen Implantologie

Pascal Marquardt, Dr. med. dent.

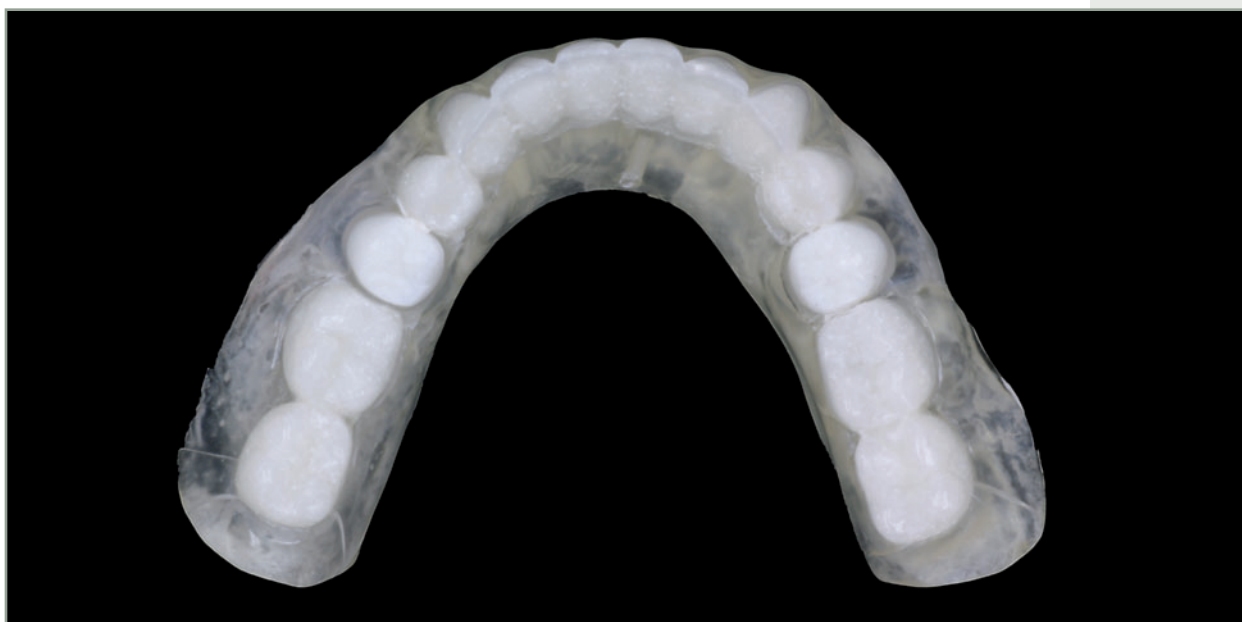
Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Abteilung für Zahnärztliche Prothetik,
Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde,
Freiburg, Deutschland

Siegbert Witkowski, ZTM

Laborleitung,
Abteilung für Zahnärztliche Prothetik,
Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde,
Freiburg, Deutschland

Jörg Strub, Prof. Dr. med. dent.

Ärztlicher Direktor,
Abteilung für Zahnärztliche Prothetik,
Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde,
Freiburg, Deutschland



Korrespondenz an: Dr. Pascal Marquardt

Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde,
Hugstetter Straße 55, 79106 Freiburg; E-Mail: pascal.marquardt@uniklinik-freiburg.de



In der oralen Implantologie ist heute eine präzise präoperative Planung sowohl der Implantatinserterion als auch der prothetischen Versorgung die wichtigste Grundlage einer erfolgreichen Rehabilitation des implantatprothetisch zu versorgenden Patienten. Die radiologischen Daten können durch moderne dreidimensionale Aufnahmetechniken wie der digitalen Volumentomografie mit sehr niedriger Strahlenbelastung bei ausgezeichneter Bildgenauigkeit gewonnen und mit verschiedenen Softwareprogrammen bearbeitet werden. Konnte bisher nur die Position der Implantatschulter oder die Achse der Bohrung in die klinische Anwendung umgesetzt werden, ist es heute möglich, die exakte dreidimensionale Position der geplanten Implantate im Vorfeld der Implantatinserterion zu be-

stimmen und in den Operationssitus zu übertragen. Vor Operationsbeginn kann eine prothetische Versorgung angefertigt und dem Patienten unmittelbar nach der Operation eingegliedert werden. Eine so geplante Behandlung wird schnell, wenig invasiv und vor allem vorhersagbar durchgeführt. Dies steigert die Qualität sowohl des chirurgischen Eingriffs als auch der prothetischen Versorgung. Zur dreidimensionalen Navigation können in der oralen Implantologie sowohl statische Systeme, die auf Führungsschienen basieren, wie auch optische, dynamische Navigationssysteme angewandt werden. Der folgende Artikel gibt einen Überblick über aktuelle Systeme zur geführten Implantation und deren Einsatzgebiete.

(Eur J Esthet Dent 2007;2;80–98.)





Die prothetisch orientierte Planung der Implantatposition und deren präzise intraoperative Umsetzung stellt heute einen entscheidenden Faktor zur erfolgreichen Rehabilitation des implantatprothetisch zu versorgenden Patienten dar. Schon während der Planungsphase der Implantatinserterion kann auf der Grundlage des zuvor vom Zahntechniker gefertigten und im Mund des Patienten geprüften Wax-up und Set-up die prothetische Versorgung und der Operationsverlauf vorhergesehen werden. Durch die Einführung digital gestützter Systeme für die Diagnostik und deren Umsetzung auf der Grundlage von dreidimensionalen Datensätzen der Knochenstruktur ist es so möglich, die beiden zentralen Aspekte einer exakt geplanten prothetischen Idealösung und der anatomischen Gegebenheiten im Vorfeld einer Implantation zu vereinen. Hierzu können dreidimensionale Daten einer Computertomografie (CT) oder einer digitalen Volumentomografie (DVT) im DICOM-(Digital Imaging and Communications in Medicine)-Format in speziellen Softwareprogrammen zur Darstellung, Analyse und zu einer späteren Verarbeitung für eine Schienenherstellung genutzt werden¹⁻⁷.

Statische und dynamische Navigationssysteme für die geführte Implantatinserterion

Die geführte Implantatinserterion mittels einer Führungsschiene wird als statisches Verfahren bezeichnet. Derartige Schienen können in Herstellungszentren auf Basis digitaler Daten stereolithografisch produziert werden (Nobel-Guide, Nobel Biocare; SimPlant, Materialise). Es ist auch möglich, vorhandene Röntgenschienen mit speziellen Übertragungsapparaturen vom Zahntechniker in dreidimensionale Implantationsführungsschienen umwan-

deln zu lassen, indem dem Implantatsystem entsprechende Hüllen (Med3D) integriert werden können (Tabelle 1). Sowohl für den Patienten als auch für den Behandler ergeben sich daraus entscheidende Vorteile: vorhandener Knochen kann optimal genutzt werden. Augmentationen können vermieden werden, indem die Position der Implantate – sofern die prothetische Vorgabe dies ermöglicht – während der Planungsphase in Regionen mit einem ausreichenden Knochenangebot gelegt werden. Ist dennoch eine Augmentation notwendig, kann diese im Vorfeld optimal geplant werden. Manuelle Positionierungsfehler des Behandlers werden unterdrückt, kritische anatomische Strukturen können besser geschützt werden. Zudem kann eine provisorische oder definitive prothetische Restauration im Vorfeld der Operation exakt auf dem Modell vorbereitet und zur Sofortversorgung genutzt werden. Dies führt zu einem prognostizierbaren chirurgischen und in der Folge prothetischen Ergebnis der Behandlung⁸.

Neben der Möglichkeit der geführten Implantatinserterion mittels Führungsschienen gibt es die Methode der instrumentennagivierten Implantation, das dynamische Vorgehen. Dieses basiert ebenfalls auf dreidimensionalen Daten der Knochenstruktur, ihrer Analyse und Bearbeitung mittels spezieller Software. Bei der Implantation wird der Bohrer raumbezogen auf den Bilddaten des Patienten in verschiedenen Perspektiven dargestellt. Dies geschieht über eine infrarot-optische Korrelation des Patientenkiefers und des Bohrers durch die Software und der zeitgleichen Darstellung auf einem Monitor für den Operateur⁹. Die Vorteile dieser Technologie liegen in einer Maximierung der intraoperativen Flexibilität und einer sicheren Bestimmung der Instrumentenposition unabhängig von Qualität und Quantität des Knochenbetts. Die exakte Implantatpositionierung im Gipsmodell zur prä-



Tabelle 1 Charakteristika der drei verschiedenen schienengeführten Navigationssysteme

	Med3D	NobelGuide	SimPlant
Basis	Wax-up/Set-up	Wax-up/set-up	Wax-up/set-up
Röntgenuntersuchung	1 CT oder DVT Patient mit Schiene	1 CT oder DVT Patient mit Schiene 1 CT oder DVT der Schiene	1 CT oder DVT Patient mit Schiene
Röntgenschiene	Kaltpolymerisat Zähne mit BaSO ₄ , Steckbaustein 2 Guttaperchamarker	Kaltpolymerisat oder vorhandene, akzeptable Prothetik 6–9 Guttaperchamarker	Kaltpolymerisat Zähne mit BaSO ₄
Referenzierung	Steckbaustein	Guttaperchamarker	BaSO ₄ -Zähne
Herstellung chirurgische Schiene	Umbau der Röntgenschiene	Stereolithografie	Stereolithografie
Genauigkeitsüberprüfung durch den Zahnarzt	Kontrolle eingebrachter Sicherheitsmarker Kontrolle der Hülsen- position	Passung Schiene mit mitgeliefertem Silikon- biss	(Passung der Schiene)
Kosten* (Zahnarzt)			
Software (Vollversion mit Datenkonvertierung)	9.940 €	4.600 €	7.230 €
Röntgenschiene	50–150 €**	0–150 €**	50–150 €**
Chirurgische Schiene (Duplicate denture)	70–170 €*** (Umbau) –	295–495 €*** 258 €	400–600 €*** –
Empfohlene Indikationen	Einzelzahnimplantat Teilbezahnter Patient oder zahnloser Patient	Zahnloser Patient (Teilbezahnter Patient)	Zahnloser Patient Reduziertes Knochen- angebot

Kosten:

* Preise in Deutschland ohne Mehrwertsteuer. Hinzu kommen die Kosten für spezielles chirurgisches Instrumentarium wie Steckhülsen, spezielle Bohrer und Implantat-Einbringinstrumente sowie die Kosten für die CT- oder DVT-Aufnahme.

** Preise abhängig von der Implantatanzahl und der Preisgestaltung des zahntechnischen Labors

*** Abhängig von der Anzahl der Implantate

operativen prothetischen Vorbereitung ist nur sehr eingeschränkt möglich. Intraoperative, optische Navigationsgeräte haben aber aufgrund ihres Anschaffungspreises von ca. 35000–70000€ zum alleinigen Nutzen in der oralen Implantologie nur eine beschränkte Indikation und Verbreitung. Ihr Einsatzgebiet erstreckt sich eher in der kranio-maxillofazialen Chirurgie⁸. Im Folgenden werden verschiedene Systeme zu einer geführten Implantation unter Benutzung spezieller Führungsschienen beschrieben.

Diagnostik und Datenerhebung

Grundlage für jede geführte Implantatinserterion stellt eine dreidimensionale Röntgendiagnostik dar. Zweidimensionale Aufnahmen können häufig nur zu eingeschränkten diagnostischen Aussagen führen. Dies resultiert zwangsläufig in wenig voraussagbaren Behandlungsergebnissen. Während noch 2000 bzw. 2002 Empfehlungen sowohl von der European Academy of Osseointegration

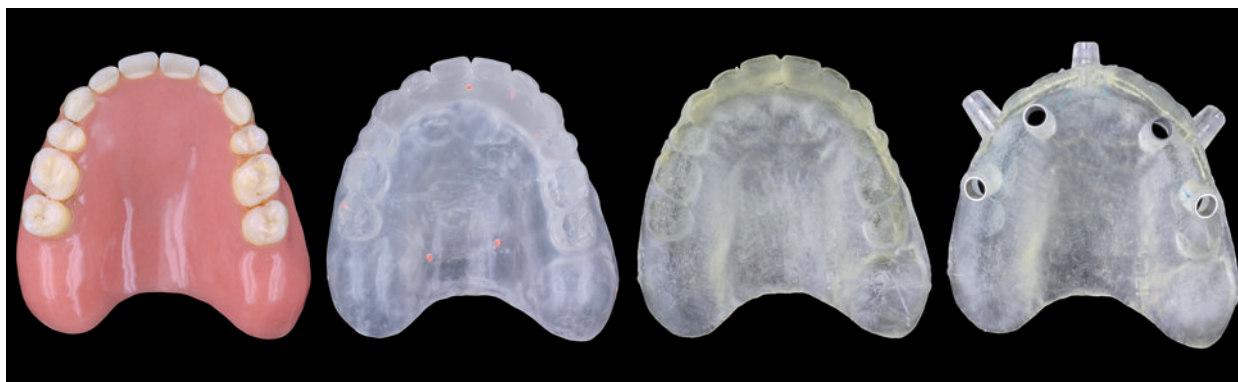


Abb. 1 Herstellung der Röntgenschiene als Duplikat der funktionell und ästhetisch korrekten Totalprothese mit eingebrachten Guttaperchamarkern. Auf Basis der eingescannten Daten kann zur genauen Artikulation des mit der Führungsschiene hergestellten Gipsmodells ein Duplikat hergestellt werden (NobelGuide).

(EAO) wie auch von der American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology (AAOMR) konventionelle Tomografien als Methode der Wahl für die meisten Implantatpatienten sahen^{10, 11}, stehen heute mit strahlenreduzierten Computertomografien und vor allem modernen digitalen Volumentomografen sehr genaue und wesentlich strahlungsärmere Geräte zur Verfügung. Einige Autoren berichten übereinstimmend, dass für die orale Implantologie klinisch relevante Strukturen wie der Nervus alveolaris inferior im Vergleich, sowohl bei konventionellen Computertomografien als auch bei Volumentomografien, gleich gut zu beurteilen sind^{12–15}. Bei Untersuchung der Strahlenbelastung der Patienten konnten Schulze et al. 2004¹⁶ nur eine absorbierte Strahlendosis bei der Untersuchung mit einem DVT von einem Drittel der Dosis eines Spiral-CTs feststellen. Die effektive Dosis eines modernen DVT-Scanners (NewTom 3G, New Tom) wird ab etwa 56,5 μ Sv beschrieben¹⁷. Im Vergleich zur konventionellen, zweidimensionalen Panoramaschichtaufnahme erzeugt ein DVT somit bei entsprechender Geräteeinstellung lediglich eine 2- bis 4-fach höhere Strahlendosis. Dies macht die moderne, dreidimensionale Bildgebung für fast alle implantatpro-

thetischen Rehabilitationen sehr attraktiv und bietet eine ideale Grundlage zur geführten Implantation.

Prothetisch ausgerichtete Implantation

Die Grundlage aller Systeme zur geführten Implantatinserion stellt das sogenannte Backwards-planning dar. Hier bildet ein am Patienten auf Funktion und Ästhetik getestetes Setup und Wax-up die Grundlage für die prothetische und chirurgische Rehabilitation. Dies bedeutet, dass als Grundlage für die Datenerfassung immer ein prothetisch suffizienter Zahnersatz zur Verfügung stehen muss^{18, 19}.

Zur klinischen Umsetzung der geplanten Implantatposition sind verschiedene Verfahren mit unterschiedlich hergestellten Schienen beschrieben worden. Die meisten Verfahren erlauben allerdings nur eine geführte Bohrung des Implantatbetts, nicht aber das gesamte Einbringen des Implantats durch eine Führungshülse. Hohe Präzision in der Übertragung kann aber nur bei der Führung der gesamten Implantatinserion (Bohrer bis Implantat) erreicht werden.



Abb. 2 Auf der Basis der Röntgenschiene wurde per Datensatz eine knochengetragene Führungsschiene hergestellt (Materialize). Zur Sichtbarkeit der Zähne im dreidimensionalen Röntgenbild müssen diese mit Bariumsulfat angereichert werden.

Stereolithografisch angefertigte Führungsschienen

Zur computergesteuerten Herstellung stereolithografischer Führungsschienen wird ein entsprechender Datensatz benötigt, der per Internet an ein Produktionszentrum versandt wird. Die Form der Führungsschiene entspricht dabei der während der Röntgendiagnostik eingescannten Oberfläche der Röntgenschiene. Diese richtet sich wiederum nach der individuellen Ausgangssituation des Patienten. Sie kann beispielsweise auf einer in Kunststoff doublierten Totalprothese bei zahnlosen Patienten (Abb. 1) oder einer auf Zähnen abgestützten, speziell angefertigten Schiene basieren. Je nach System müssen die zu ersetzenden Zähne zur Darstellung im Röntgenbild sichtbar gemacht werden (SimPlant). Hierzu können spezielle konfektionierte, röntgenopake Prothesenzähne oder vom Zahntechniker hergestellte mit Bariumsulfat angereicherte Zahnduplikate verwendet werden (Abb. 10). Zur Referenzierung der Schiene mit den Knochenstrukturen innerhalb der Software werden unterschiedliche Markersysteme verwendet. So müssen beim NobelGuide-System sechs bis neun kugelförmige Guttaperchamarkierungen in die Röntgen-

schiene eingebracht werden (Abb. 1). Das SimPlant-System orientiert sich am Abbild der röntgenopaken Zähne, sodass hier keine zusätzlichen Markierungen angebracht werden müssen. Mit den so hergestellten Röntgenschienen werden die dreidimensionalen Röntgendaten generiert. Zur besseren Visualisierung und Überprüfung der Genauigkeit während der Implantatplanung basiert die Software des NobelGuide-Verfahrens neben dem Scan des Patienten mit eingesetzter Röntgenschiene noch auf einem zweiten Scan, der nur von der Röntgenschiene angefertigt wird. Diesen zweiten Scan korreliert die Software mit den Bildern des Knochens. Hierzu nutzt sie die eingebrachten Marker.

Die so generierten Informationen der Kieferstrukturen und der Kontur der geplanten prothetischen Restauration können nun mit Hilfe spezieller Softwareprogramme (SimPlant, Procera) bearbeitet werden (Abb. 3 und 4). Der behandelnde Arzt kann die zukünftige Implantatposition anhand der abgebildeten prothetischen Restauration in Relation zu dem vorhandenen Knochenangebot festlegen. Zur Definition der gewählten Implantatposition integrieren die Softwareprogramme von den jeweiligen Herstellern angebotene Führungs-

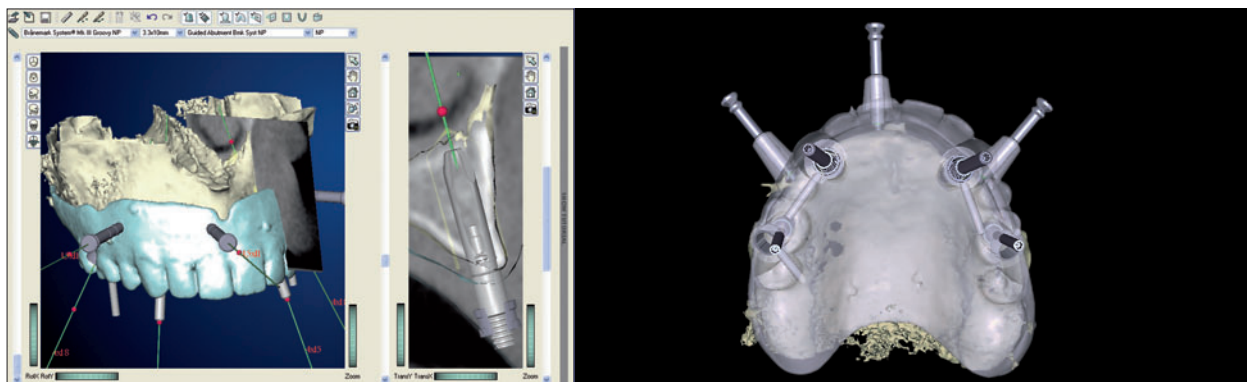


Abb. 3 In der Planungssoftware werden Implantate und die Befestigungspins dreidimensional geplant. Grundlage stellt hier die eingescannte Röntenschablone dar (Procera). Die beiden distalen Implantate wurden in einem Winkel von etwa 30° parallel zur mesialen Kieferhöhlenwand geplant, um eine bessere, weiter distal gelegene Abstützung der Prothetik zu erreichen. Eine Sinusbodenelevation kann somit vermieden werden.

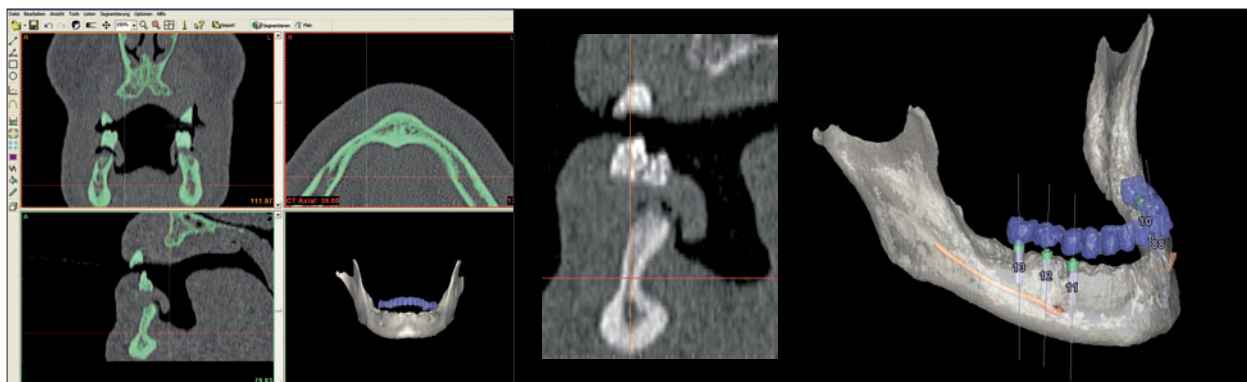


Abb. 4 Dreidimensionale Darstellung der Knochenstruktur des Unterkiefers in der SimPlant-Software (Materialise). Trotz ausreichendem vertikalem Knochenangebot können aufgrund der nur geringen anterioren Kambbreite Implantate nur mit zusätzlichen chirurgischen Maßnahmen eingebracht werden. Es konnten im posterioren Kieferanteil 6 Implantate zur späteren Aufnahme zweier Stege geplant werden.



Abb. 5 (a) Herstellung des Gipsmodells zur Vorbereitung der prothetischen Versorgung mit der NobelGuide-Schiene. Die beiden distalen Implantate sind in einem günstigen Verhältnis zur medialen Kieferhöhlenwand abgewinkelt positioniert worden. (b) Einbringen der Modelle in den Artikulator mit der Duplicate denture.

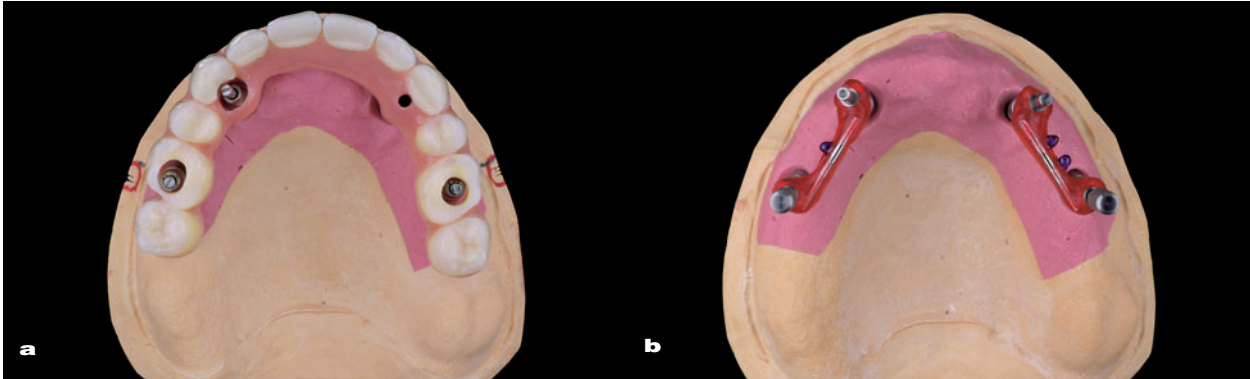


Abb. 6 Im einartikulierten Modell kann die vorhandene Totalprothese des Patienten in ein implantatgetragenes Sofortprovisorium umgewandelt werden. **(a)** Zu dessen intraoraler Positionierung nach der Implantation wurde das Abutment in regio 23 bereits in die Prothese integriert. Um die 3 verbleibenden Abutments (Multi-unit, Nobel Biocare) wurde ausreichend Raum ausgespart, um diese einfach intraoral mit Kunststoff fixieren zu können. Die Angulation der distalen Implantate wurde mit speziellen, um 30° abgewinkelten, nicht rotationsgesicherten Abutments ausgeglichen (30° Multi-unit Abutment, non engaging) (Nobel Biocare). **(b)** Um deren auf dem Modell geplante Position exakt in den klinischen Situs übertragen zu können, wurden spezielle Einbringhilfen angefertigt.

hülsen in die prospektive Führungsschiene. So können sogenannte GuidedSleeves (NobelBiocare) für die entsprechenden Implantatdurchmesser der meisten Implantatsysteme von NobelBiocare gewählt werden. Das SafeSystem (Materialise) integriert ebenfalls spezielle Führungshülsen, die eine geführte Implantatinsertion durch die chirurgische Schiene erlauben (Abb. 12). Je nach System kann die Schiene auf dem Weichgewebe oder dem Restgebiss (NobelGuide, SafeSystem) abgestützt werden. Um eine sichere Positionierung der chirurgischen Schiene während der Operation zu erreichen, bietet NobelGuide die Möglichkeit, im Knochen verankerte, repositionierbare Pins zu verwenden. Beim SimPlant-System ist zusätzlich eine Abstützung direkt auf dem eröffneten Alveolarknochen wählbar. Dies ist vor allem bei stark atrophierten Kiefern von Vorteil, bei denen eine Befestigung der Schiene mittels steckbarer Pins nicht möglich ist (Abb. 1 bis 14).

Um vor Beginn der Operation eine prothetische Restauration anzufertigen, kann mit Hilfe der chirurgischen Schiene und speziell-

ler Teile ein Gipsmodell mit den geplanten Implantaten angefertigt werden (NobelGuide). Zur exakten Artikulation dieses Modells kann die angefertigte chirurgische Schiene angewandt werden. Zusätzlich kann die Produktion eines stereolithografischen Abbildes der auf dem prothetischen Wax-up basierenden Röntgenschiene geordert werden (DuplicateDenture) (Abb. 3). Dies kann notwendig sein, wenn eine exakte Positionierung der chirurgischen Schiene nicht möglich ist.

Der fertiggestellte Datensatz der Schiene mit den integrierten, chirurgischen Führungselementen wird zur Herstellung per Datenleitung in ein Produktionszentrum versandt. Das Ausgangsmaterial zur Fertigung der Schienen ist flüssiger Kunststoff, der durch einen Laserstrahl hochpräzise in Schichten auspolymerisiert wird. Die Stereolithografie (3D Systems) basiert demnach auf einer Kombination aus computerunterstütztem Design, Polymerchemie und Belichtungssystem. Ein feiner Laserstrahl schreibt die Kontur des jeweiligen Querschnitts auf die Oberfläche des Harzbades und erzeugt örtlich so die notwen-

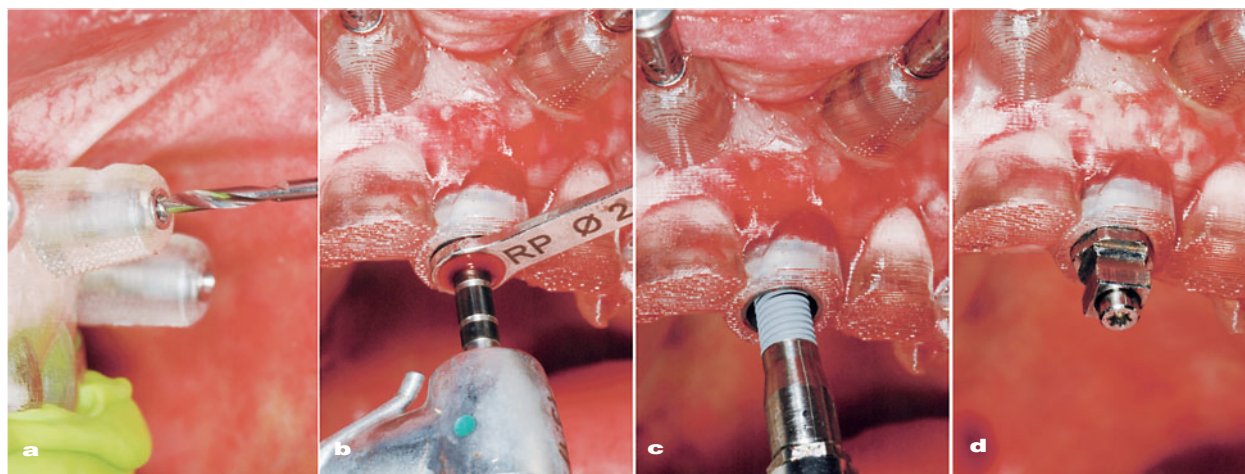


Abb. 7 Chirurgisches Vorgehen während der Implantatinserterion durch die NobelGuide-Schiene. Nach der Fixation der Schiene in Okklusion mit Anchor-Pins wird die für alle Bohrer durch auswechselbare Hülzen geführte Knochenaufbereitung durchgeführt (**a und b**). Das Implantat wird transgingival durch die Schiene mit speziellen Einbringpfosten mit Tiefenanschlag eingebracht (**c und d**).



Abb. 8 (a) Intraorale Situation des Patienten vor und unmittelbar nach der transgingivalen Insertion von 4 Implantaten und Sofortbelastung des Provisoriums (b).



Abb. 9 Postoperative Röntgenkontrolle.

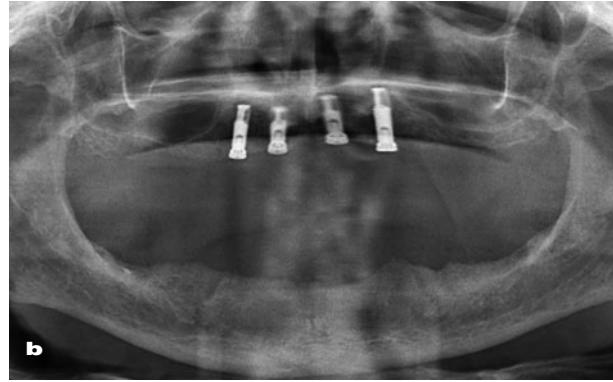
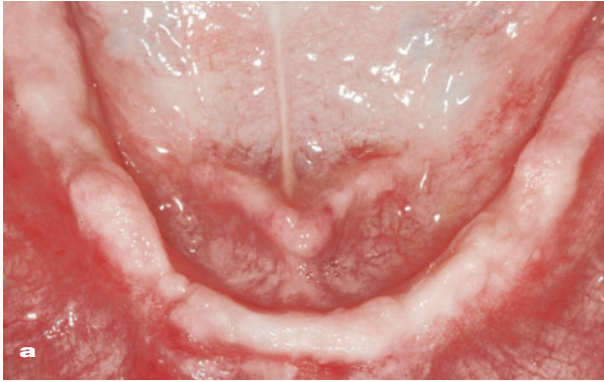


Abb. 10 Intraorale und radiologische Situation des 73-jährigen Patienten vor Versorgung des Unterkiefers. Die zweidimensionale Aufnahme suggeriert ein suffizientes Knochenangebot zur interforaminalen Implantatinserion. **(a)** Intraorale Ansicht. **(b)** Orthopantomogramm.

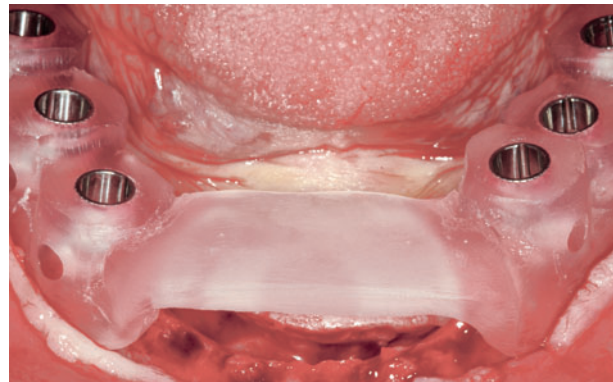
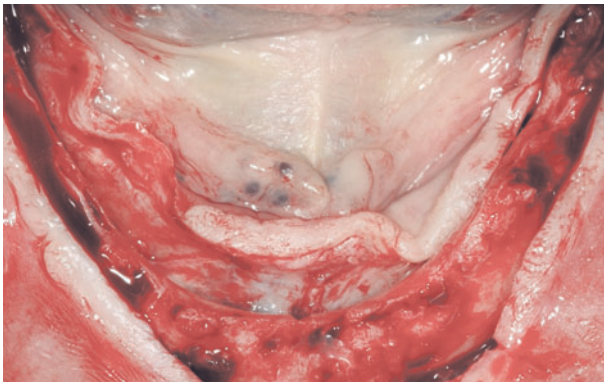
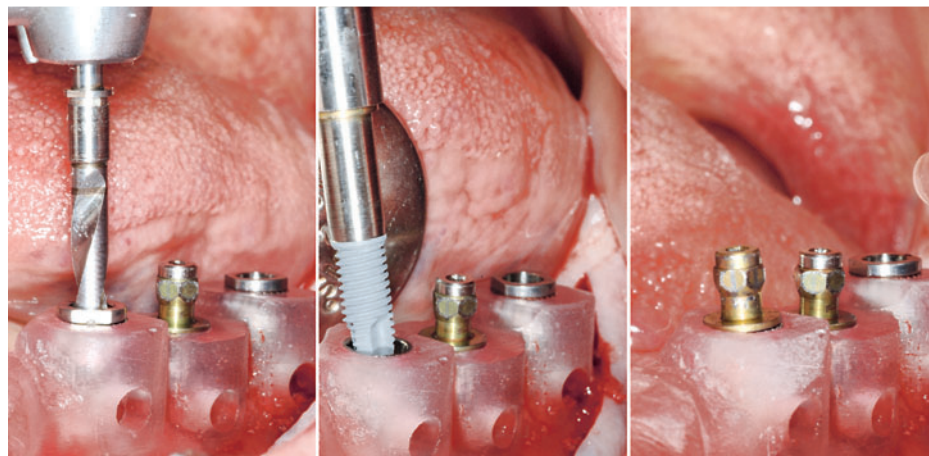


Abb. 11 Intraorale Situation nach Darstellung der knöchernen Strukturen und dem Eingliedern der knochengetragenen Führungsschiene. Aufgrund der guten Passung der Schiene konnte auf eine zusätzliche Befestigung mit Osteosyntheseschrauben verzichtet werden.

Abb. 12 Nach dem Einsetzen einer zusätzlichen Führungshülse kann die erste Bohrung mit Hilfe eines speziellen Kombinationsbohrers durchgeführt werden. Die Implantate werden mit speziellen Einbringern dreidimensional fixiert.



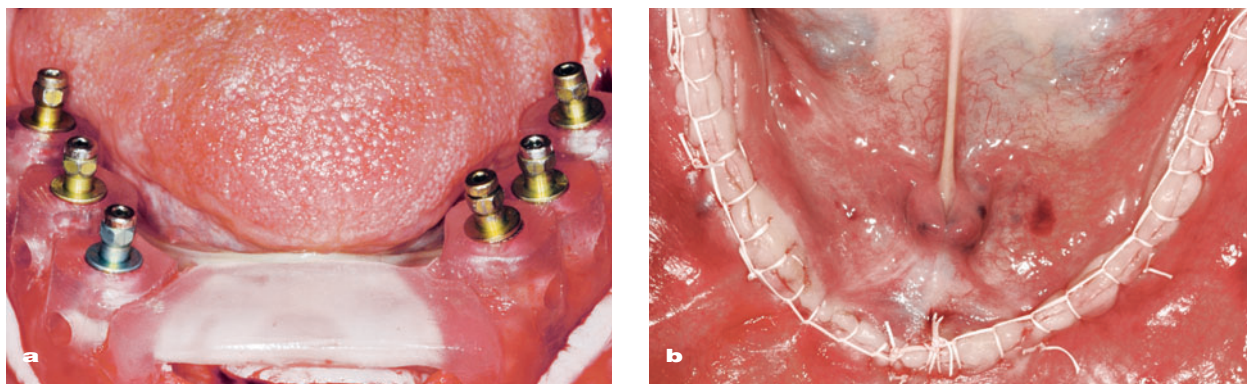


Abb. 13 Intraorale Ansicht nach Insertion aller 6 Implantate **(a)** und Nahtverschluss **(b)**.

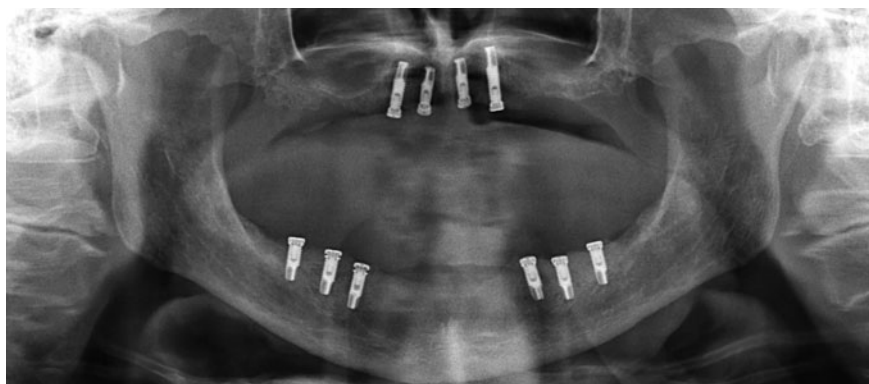


Abb. 14 Postoperative Röntgenkontrolle.

dige kritische Energiedichte und folglich die nötigen Verfestigungen. Anschließend erfolgt die Generierung der nächsten Schicht²⁰.

Die stereolithografische Herstellung derartiger Führungsschienen zeichnet sich dadurch aus, dass alle wesentlichen Prozesse in einem angebotenen, geschlossenen System stattfinden.

Mechanisch angefertigte Führungsschienen

Neben der oben beschriebenen stereolithografischen Neuanfertigung von Führungsschienen auf der Basis eingescannter Röntgenschienen können diese auch mit speziellen Positionierungssystemen wie dem Med3D-System vom Zahntechniker modifiziert und

durch den Einbau entsprechender Führungshülsen in chirurgische Schienen umgewandelt werden²¹ (Abb. 15 bis 24). Anhand der ermittelten Daten aus der Softwareanalyse werden die Schienen mit Hilfe eines Positionierungshexapod (Schick Dental) mit Führungshülsen passend zu dem geplanten Implantatsystem bestückt. Die sechs Füße des Hexapod werden anhand eines digital erstellten Bohrplans einzeln für die jeweilige Hülse justiert. Nach der Ausrichtung werden Bohrungen für die Aufnahme der chirurgischen Hülsen durchgeführt. Hierbei wird neben der dreidimensionalen Ausrichtung des Bohrers auch der virtuell ermittelte Tiefenanschlag für die Implantation berücksichtigt. Die Hülsen können mit Autopolymerisat fixiert werden.



Abb. 15 Röntgenschiene, die auf Basis des diagnostischen Set-up hergestellt wurde. Der eingebaute Steckbaustein wird zur Referenzierung der Software mit dem Datensatz sowie zum Einbringen der Führungshülsen benötigt (Med3D). Zudem werden im Bereich der geplanten Implantationen in regio 35 und 46 zwei Markierungen aus Guttapercha angebracht, die zur Überprüfung des radiologischen Datensatzes dienen.

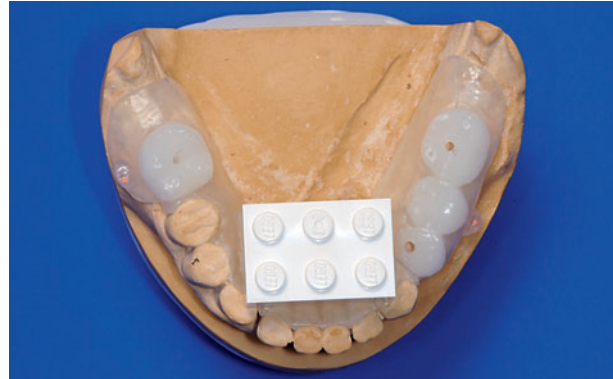
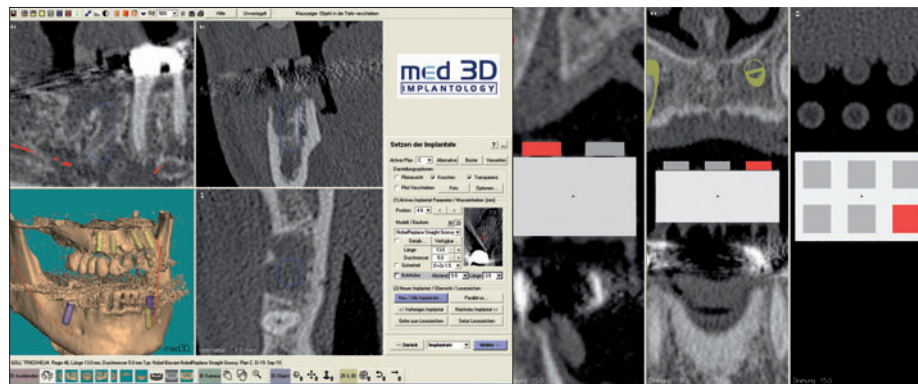


Abb. 16 Nachdem der in die Software integrierte virtuelle Steckbaustein mit dem gescannten Stein zur Referenzierung der Software in Übereinstimmung gebracht wurde, können Implantate anhand der sich abbildenden prothetischen Restauration in der Software herstellerunabhängig dreidimensional geplant werden (Med 3D).



Um bei diesem System die virtuelle Planung an den Kiefersegmenten in ein räumliches Verhältnis zur Kunststoffschiene und später in den Hexapod umsetzen zu können, wird ein Steckbaustein (Lego) zur Referenzierung in die Schiene integriert. Die digitale Aufnahme mit dem abgebildeten Baustein wird mit einem Orientierungsraster in der Software in Deckung gebracht. Dies stellt die Kalibrierung des Systems dar, die später eine Ausgangsposition und Gleichschaltung des Hexapod mit der chirurgischen Schiene ermöglicht. Hervorzuheben ist hier die Kontrollmöglichkeit der Röntgenaufnahme und der Hülsenpositionierung: Zwei in die Röntgenschiene eingebrachte Guttaperchamarkierungen müssen durch von der Software

ermittelte Einstellungen mit dem eingespannten Instrument räumlich exakt getroffen werden und beschreiben so die Genauigkeit der dreidimensionalen Aufnahmen im Verhältnis zum Steckbaustein. Nach Befestigung der Führungshülsen können Zahntechniker und Zahnarzt zudem an einem dazu angefertigten Ausdruck kontrollieren, ob die Hülsen korrekt positioniert worden sind.

Die Herstellung derartiger Schienen durch den Zahntechniker zeichnet sich dadurch aus, dass die wesentlichen Prozesse in einem für alle Anbieter offenen System stattfinden. Sie sind nur von denen vom Hersteller angebotenen Platzierungssystemen zum Einbau in Schienen sowie von den verfügbaren chirurgischen Materialkomponenten abhängig.

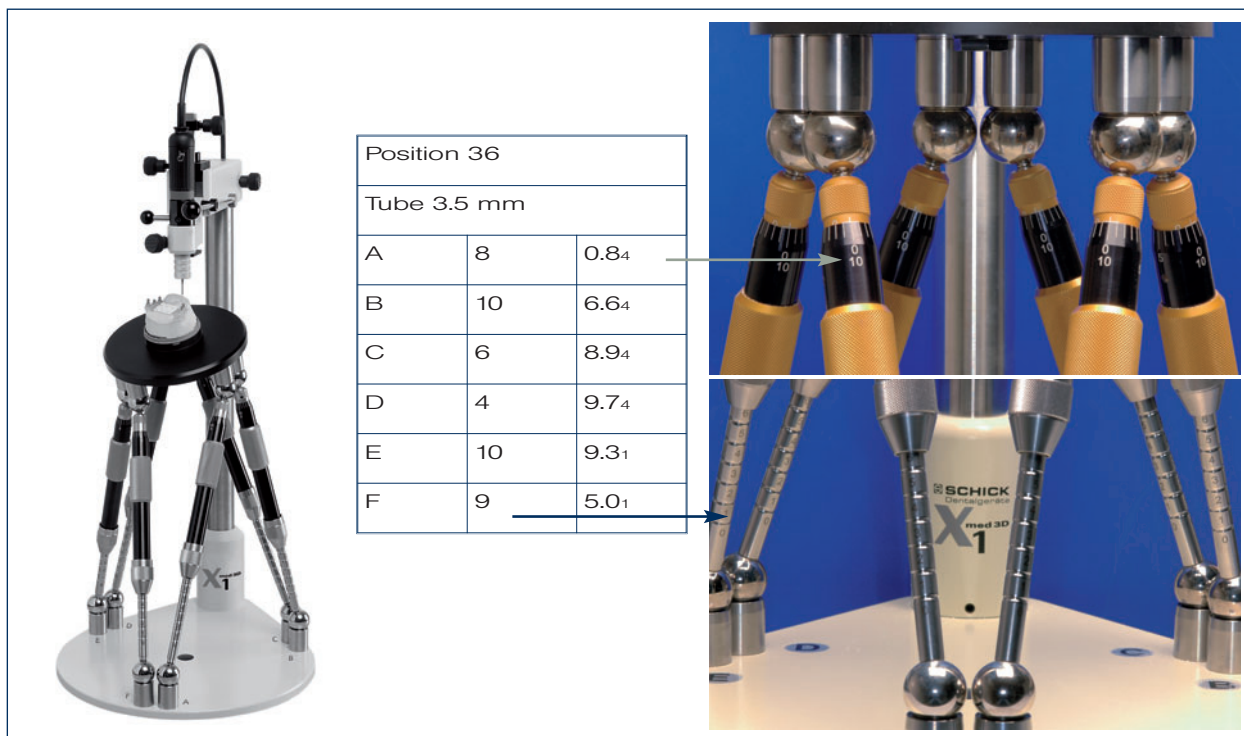


Abb. 17 Die durch die Software ermittelten Daten werden vom Zahntechniker auf den Hexapod-Positionierer übertragen (X1, Schick Dental). Hierbei werden sowohl die Implantatachsen als auch die Tiefe der Implantatposition berücksichtigt.

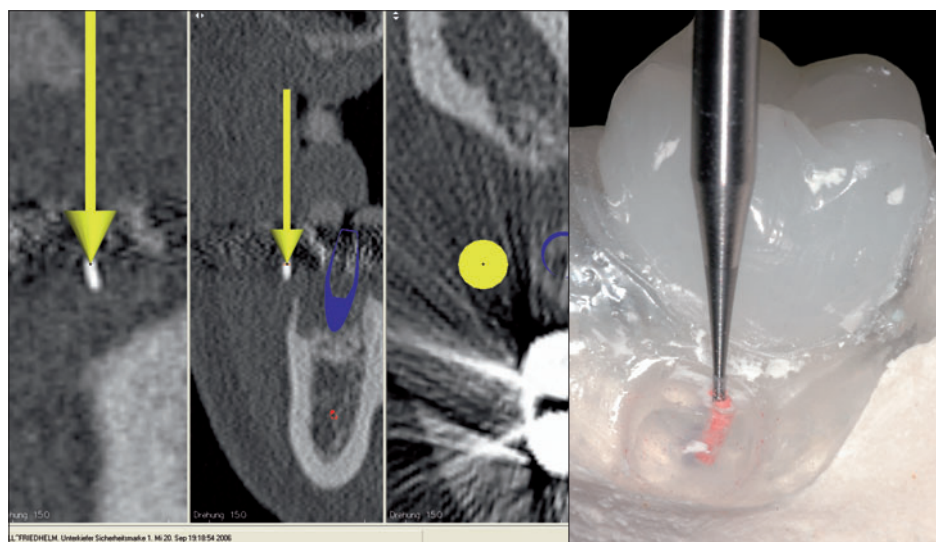


Abb. 18 Zur Überprüfung der Genauigkeit des Datensatzes muss der Hexapod präzise ausgerichtet und die an der Kontrollmarkierung zuvor am Bildschirm festgelegte Stelle exakt in der Schiene getroffen werden. Dies ist ein wichtiger Kontrollmechanismus, mit dem die Genauigkeit des Systems sicher überprüft werden kann.

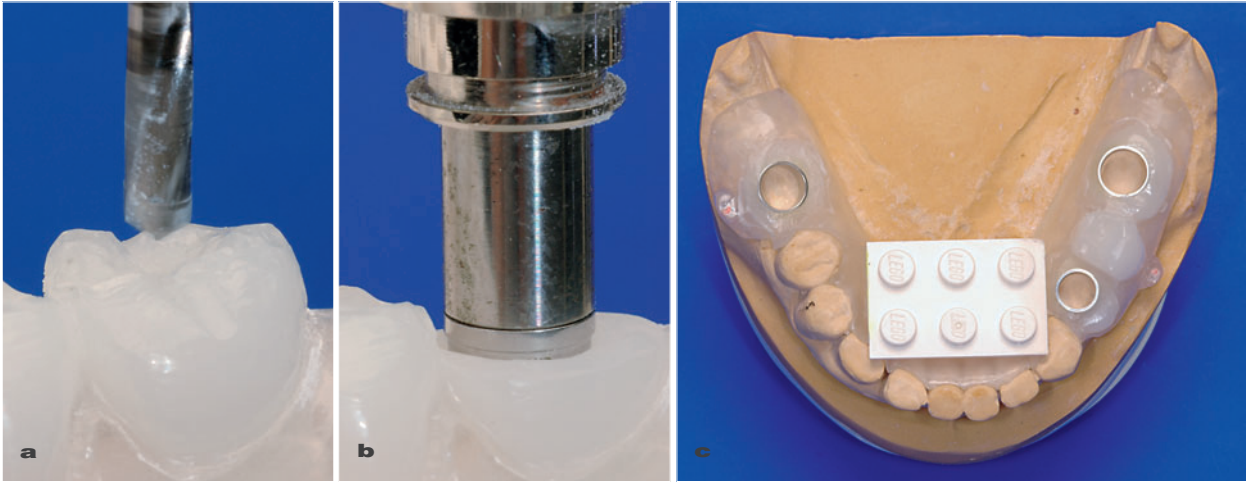


Abb. 19 Nach den Angaben der Software können mit Hilfe des Hexapod-Positionierers die von den jeweiligen Implantatherstellern angebotenen Führungshülsen (hier GuidedSleeves, NobelBiocare) mit Kaltpolymerisat eingegliedert werden (**a und b**). Die so modifizierte Röntgenschiene kann nun als chirurgische Führungsschiene benutzt werden (**c**). Ein Zahnersatz kann auf dem Arbeitsmodell vorbereitet werden.

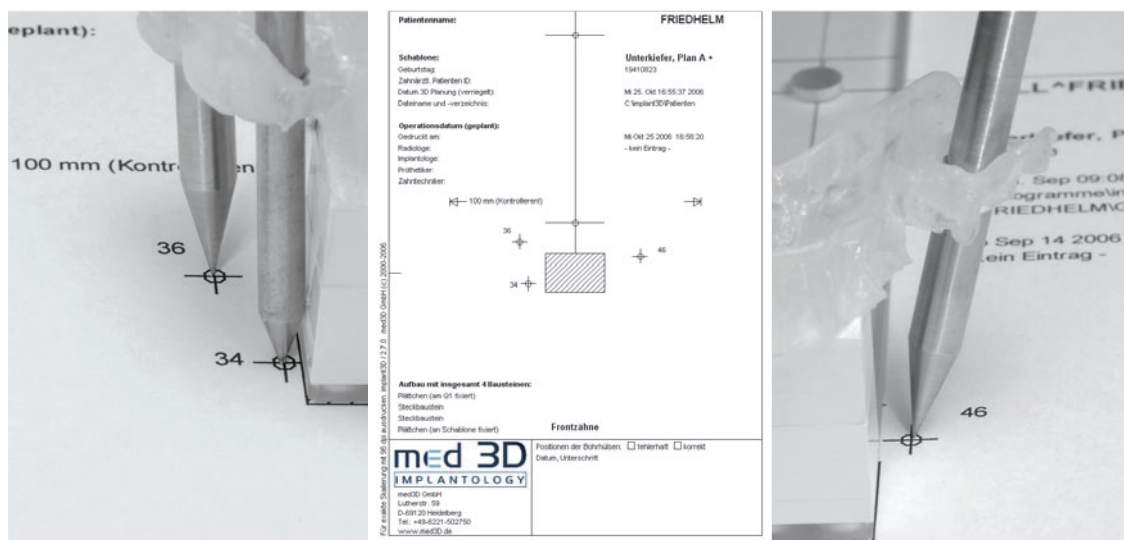


Abb. 20 Zur Überprüfung der Genauigkeit der gesetzten Hülsen wird die Schiene über den Steckbaustein/Referenzmarker an einer definierten Stelle über einem Computerausdruck fixiert. Spezielle Metallstifte müssen das Zentrum der gedruckten Markierung des jeweiligen Implantats treffen. Somit können Positionierungsfehler durch den Zahntechniker ausgeschlossen werden.



Abb. 21 (a) Die intraorale Situation 8 Wochen nach Exzision des unteren rechten ersten Molars (b) und nach Eingliedern der Führungsschiene vor der Implantation.



Abb. 22 (a) Die Implantate wurden durch die Führungshülsen inseriert. Zum Erhalt der attached Gingiva wurde vor der Insertion des Implantats im Bereich des rechten unteren Molars ein kleiner Mukoperiostlappen gebildet. (b) Die Implantate am linken ersten Prämolare und ersten Molar wurden transgingival inseriert.

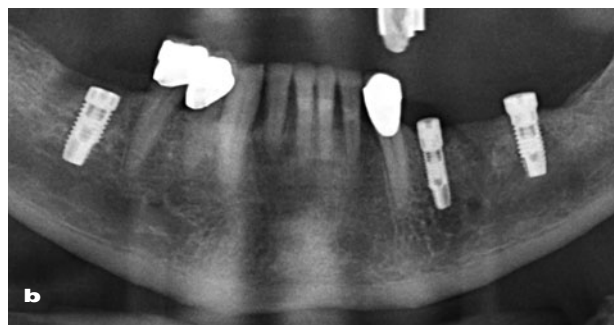
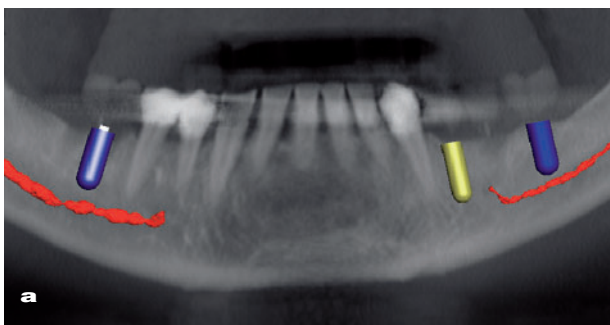


Abb. 23 (a) Präoperative Planung auf der Panoramarekonstruktion der Med3D-Software und (b) postoperative Röntgenkontrolle.



Abb. 24 Intraorale Ansicht der provisorischen Restauration 6 Wochen nach der Insertion.

Diskussion

Ein zentraler Aspekt zur Beurteilung der beschriebenen Systeme zur geführten Navigation ist die Frage danach, wie genau die Umsetzung der Behandlungsplanung vom Computermonitor in die klinische Implantatposition ist.

Die ermittelte Genauigkeit sowohl statischer wie auch dynamischer Systeme wird mit etwa 0,5 bis 1,5 mm angegeben und kann Tabelle 2 und 3 entnommen werden. Der Gesamtfehler ist hier abhängig von der Qualität der radiologischen Daten, von der Lagestabilität der Führungsschiene und von sonstigen mechanischen Fehlern wie dem Passungsspiel der Bohrerführung. Auch eine harte Knochenqualität kann zu

einer abweichenden Positionierung der Implantatposition führen. Die angegebenen Genauigkeitsdaten sind zudem meist In-vitro-Messungen, die durch die beschriebenen Faktoren im klinischen Alltag erheblich beeinflusst werden können. Entscheidend sind daher im System integrierte Kontrollmechanismen, die die zu erwartende klinische Genauigkeit ersichtlich machen. Nur so kann die Sicherheit der präzisen dreidimensionalen Positionierung garantiert werden. Zur klinischen Anwendung wird daher bei allen Systemen ein Sicherheitsabstand von 1,5 bis 2 mm empfohlen.

Beim Vergleich der Systeme wird ersichtlich, dass bei gleicher beschriebener Genau-



Tabelle 2 Genauigkeit dynamischer, infrarotbasierter Navigationssysteme

Studie	Genauigkeit (Bereich)	Untersuchung	In vitro/in vivo
Schneider et al. 2001 ²¹	0,68 mm	Image fusion	In vitro
Brief et al. 2003 ²³	0,7–1,1 mm	Image fusion	In vitro
Schermeier et al. 2002 ²⁴	0,08 mm	Digitale Messschieber	In vitro
Wanschitz et al. 2002 ²⁵	0,0–1,44 mm	Image fusion	In vitro
Wagner et al. 2003 ²⁶	0,0–3,4 mm	Image fusion	In vitro
Brief et al. 2005 ²⁷	0,6–0,94 mm	Image fusion	In vitro

Tabelle 3 Genauigkeit statischer, schienengeführter Navigationssysteme

Studie	Genauigkeit (Bereich)	Untersuchung	In vitro/in vivo
Besimo et al. 2001 ²⁸	0,3–0,6 mm	Image fusion	In vitro
Naitoh et al. 2000 ²⁹	0,3–0,6 mm	Fräse	In vitro
van Steenberghe et al. 2002 ³⁰	0,3–1,0 mm	Image fusion	In vitro
Sarment et al. 2003 ³¹	0,5–1,0 mm	Image fusion	In vitro

igkeit dynamische, optische Navigationsverfahren in der oralen Implantologie ein unvorteilhaftes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen. Sie können jedoch in einem weiten Feld vor allem der kranio-maxillofazialen Chirurgie, wie beispielsweise zur kontrollierten Repositionierung luxierter Knochensegmente oder zur selektiven Tumorsektion, eingesetzt werden. Eine wichtige Behandlungsoption, die nur beim Einsatz von schienengestützten Systemen möglich wird, ist die präoperative Fertigung von provisorischem oder auch definitivem Zahnersatz zur sofortigen Versorgung des Patienten nach der Implantation. Der Zahntechniker kann bereits vor der Operation mit der chirurgischen Führungsschiene die Implantate in Form von Modellanalogen im Gipsmodell integrieren und eine entsprechende prothetische Versorgung bis zum Einsetzen der Implantate am Patienten vorbereiten. Hierdurch wird die Behandlungszeit des Patienten erheblich verkürzt.

Im Vergleich der erhältlichen Schienensysteme können im Labor unter Zuhilfenahme eines Hexapod-Positioniertischs produzierte Schienen günstiger hergestellt werden als vergleichbare, stereolithografisch generierte Schienen, da hier nur ein Umbau der bei allen Systemen benötigten Röntgenschiene stattfindet. Vor allem für den teilbezahnten Patienten kann – bei ausreichender Verankerungsmöglichkeit – der Einsatz einer solchen vom Labor gefertigten Führungsschiene empfohlen werden. Weitere Vorteile sind die hohe Genauigkeit der vom Zahntechniker gefertigten Schienengestaltung sowie die beschriebene Genauigkeitskontrolle. Stereolithografisch hergestellte Schienen können dagegen vor allem beim zahnlosen Patienten ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen. Die digital gefertigten Schienen erlauben eine exakte Positionierung der Schiene auf der Schleimhaut mittels steckbarer Befestigungspins (NobelGuide) oder direkt auf dem atrophierten Knochen (SimPlant).



Für den Patienten ergeben sich durch eine geführte Implantation weitere Vorteile: Der Eingriff kann aufgrund der präoperativen Planung und ihrer intraoperativen Umsetzung minimalinvasiv gehalten werden. Im Falle eines ausreichenden Knochenangebots sowie einer suffizienten Weichgewebssituation kann bei exakt geführter Implantatinserterion sogar gänzlich auf eine Lappenbildung verzichtet werden (lappenloser Eingriff), ohne die notwendige Operationssicherheit bezüglich der dreidimensionalen Implantatposition zu verlieren. Augmentationen können vermieden oder, falls notwendig, exakt präoperativ geplant werden, wodurch postoperative Beschwerden und Komplikationen vermieden werden können. Weiterhin kann ein – auf der Grundlage der in der Diagnostik festgelegten Implantatposition – gefertigter Zahnersatz unmittelbar nach der Implantation eingegliedert werden.

Schlussfolgerungen

Die 3D-geführte Implantatchirurgie verbessert die Qualität nicht nur des chirurgischen Eingriffs, sondern auch die des prothetischen Ergebnisses und ermöglicht eine im Vergleich zur konservativen Chirurgie sehr sichere und im Ergebnis voraussagbare Rehabilitation des Patienten.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn ZTM W. Wörner, Zahntechnik Wörner GmbH, Freiburg, Herrn Dr. M. Knauf, Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Uniklinik Freiburg und Herrn Dr. D. Schulze, Leiter Sektion Röntgen, Abteilung für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Uniklinik Freiburg, für deren Unterstützung zu diesem Beitrag.

Literatur

1. Rosenfeld AL, Mandelaris GA, Tarieu PB. Prosthetically directed implant placement using computer software to ensure precise placement and predictable prosthetic outcomes. Part 2: Rapid-prototype medical modelling and stereolithographic drilling guides requiring bone exposure. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2006;26:347–353.
2. Rosenfeld AL, Mandelaris GA, Tarieu PB. Prosthetically directed implant placement using computer software to ensure precise placement and predictable prosthetic outcomes. Part 3: Stereolithographic drilling guides that do not require bone exposure and the immediate delivery of teeth. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2006;26:493–499.
3. Sarment DP, Al-Shammari K, Kazor CE. Stereolithographic surgical templates for placement of dental implants in complex cases. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2003;23:287–295.
4. Van Steenberghe D, Glauser R, Blomback U, et al. A computed tomographic scan-derived customized surgical template and fixed prosthesis for flapless surgery and immediate loading of implants in fully edentulous maxillae: A prospective multicenter study. *Clin Implant Dent Relat Res* 2005;7 Suppl 1:S111–120.
5. Kielhorn J, Schnellbacher K. Treatment planning and immediate restorations: A team approach challenge. *Zahntech Mag* 2005;9:178–192.
6. Köttgen R, Bolz W, Wachtel H, Zuhr O, Hürzeler M: Vermeidung von Augmentation durch Navigation—Eine Fallpräsentation. *Implantologie* 2005;13:397–405.
7. Mischkowski RA, Zinser MJ, Neugebauer J, Kübler AC, Zöller JE. Comparison of static and dynamic computer-assisted guidance methods in implantology. *Int J Comput Dent* 2006;9:23–35.
8. Widmann G, Bale RJ. Accuracy in computer-aided implant surgery—A review. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2006;21:305–313.
9. Hassfeld S, Brief J, Stein W, et al. Navigationsverfahren in der Implantologie—Stand der Technik und Perspektiven. *Implantologie* 2000;4:373–390.



10. Tyndall DA, Brooks SL. Selection criteria for dental implant site imaging: A position paper of the American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Path Oral Radiol Endod* 2000;89:630–637.
11. Harris D, Buser D, Dula K, et al. EAO guidelines for the use of diagnostic imaging in implant dentistry. A consensus workshop organized by the European Association for Osseointegration in Trinity College Dublin. *Clin Oral Implants Res* 2002;13:566–570.
12. Hirsch E, Graf HL, Hemprich A. Comparative investigation of image quality of three different x-ray procedures. *Dentomaxillofac Radiol* 2003;32:201–211.
13. Guerrero ME, Jacobs R, Loubele M, Schutyser F, Suetens P, van Steenberghe D. State-of-the-art on cone beam CT imaging for preoperative planning of implant placement. *Clin Oral Investig* 2006;10:1–7.
14. Misch KA, Yi ES, Sarment DP. Accuracy of cone beam computed tomography for periodontal defect measurements. *J Periodontol* 2006;77:1261–1266.
15. Hilgers ML, Scarfe WC, Scheetz JP, Farman AG. Accuracy of linear temporomandibular joint measurements with cone beam computed tomography and digital cephalometric radiography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005;128:803–811.
16. Schulze D, Heiland M, Thurmann H, Adam G. Radiation exposure during midfacial imaging using 4- and 16-slice computed tomography, cone beam computed tomography systems and conventional radiography. *Dentomaxillofac Radiol* 2004;33:83–86.
17. Ludlow JB, Davies-Ludlow LE, Brooks SL, Howerton WB. Dosimetry of 3 CBCT devices for oral and maxillofacial radiology: CB Mercuray, NewTom 3G and i-CAT. *Dentomaxillofac Radiol* 2006;35:219–226.
18. Garber, DA. The esthetic dental implant: Letting restoration be the guide. *J Oral Implantol* 1996;22:45–50.
19. Widman G, Bale RJ. Accuracy in computer-aided implant surgery—A review. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2006;21:305–313.
20. Witkowski S, Lange R. Stereolithographie als generatives Verfahren in der Zahntechnik. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2003;113:869–878.
21. Schneider M, Eckelt U, Lauer G, Hietschold V. Frameless intraoperative navigation and referencing in maxillofacial surgery—Advantages and limitations. In: Lemke HU, Vannier MW, Inamura K, et al (eds). *CARS 2001: Computer Assisted Radiology and Surgery*. New York: Elsevier, 2001:726–732.
22. Brief J, Hassfeld S, Sonnenfeld U. Computer-guided insertion of dental implants—A clinical evaluation. In: Lemke HU, Vannier MW, Inamura K, et al (eds). *CARS 2001: Computer Assisted Radiology and Surgery*. New York: Elsevier, 2001:739–747.
23. Schermeier O, Luath T, Cho C, Hildebrand D, Klein M, Nelson K. The precision of the Robodent system—An in-vitro study. In: Lemke HU, Vannier MW, Inamura K, et al (eds). *CARS 2002: Computer Assisted Radiology and Surgery*. Berlin: Springer, 2002:947–952.
24. Wanschitz F, Birkfellner W, Watzinger F, et al. Evaluation of accuracy of computer-aided intraoperative positioning of endosseous oral implants in the edentulous mandible. *Clin Oral Implants Res* 2002;13:59–64.
25. Wagner A, Wanschitz F, Birkfellner W, et al. Computer-aided placement of endosseous oral implants in patients after ablative tumor surgery: Assessment of accuracy. *Clin Oral Implants Res* 2003;14:340–348.
26. Brief J, Edinger D, Hassfeld S, Eggers G. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res* 2005;16:495–501.
27. Besimo CE, Lambrecht JT, Guindy JS. Accuracy of implant treatment planning utilizing template-guided reformatted computed tomography. *Dentomaxillofac Radiol* 2000;29:46–51.
28. Naitoh M, Aiji E, Okumura S, Ohsaki C, Kurita K, Ishigami T. Can implants be correctly angulated based on surgical templates used for osseointegrated dental implants? *Clin Oral Implants Res* 2000;11:409–414.
29. van Steenberghe D, Naert I, Andersson M, Brajnovic I, van Cleynenbreugel J, Suetens P. A custom template and definitive prosthesis allowing immediate implant loading in the maxilla: A clinical report. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2002;17:663–670.
30. Sarment DP, Sukovic P, Clinthorne N. Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003;18:571–577.

