

Florian M. Thieringer, Paridokht Zarean, Parichehr Zarean, Sead Abazi, Tim Joda

Navigierte digitale Implantologie

Möglichkeiten und Grenzen innovativer Technologien



INDIZES

digitale Planung, statische Navigation, Bohrschablone, dynamische Navigation, Echtzeit-Navigation, navigierte Implantologie, computerassistierte Implantologie, digitaler Workflow, dreidimensionale Behandlungsplanung, 3-D-Druck, geführte Operation, chirurgische Navigation, roboterunterstützte Chirurgie

ZUSAMMENFASSUNG

Die ideale Platzierung dentaler Implantate im Kieferknochen unter biologischen, funktionellen und ästhetischen Gesichtspunkten ist erfolgsentscheidend. Hierbei spielt vor allem die optimale prothetische Versorgung als Behandlungsziel für die Planung der exakten Implantatinsertion im Sinne einer prothetisch-chirurgischen Rückwärtsplanung (Backward-Planning), bei adäquaten Knochen- und Weichteilverhältnissen, eine wichtige Rolle. Innovative Diagnose- und 3-D-Simulationsverfahren zur Erhöhung der Sicherheit und Vorhersagegenauigkeit einer Implantation und Unterstützung im digitalen Behandlungsprozess gewinnen auch bei Routinefällen zunehmend Akzeptanz – angefangen bei „mentalen“ Navigationskonzepten mit computerbasierter Implantatpositionsplanung, über die inzwischen etablierte statische Navigation mit extern oder in der Praxis 3-D-gedruckten oder gefrästen Implantat-Bohrschablonen, bis hin zu dynamischen, präzisen Echtzeit-Navigationssystemen. Letztere Systeme erlauben intraoperativ eine dreidimensionale Orientierung der Bohrer- und Implantatposition auf Basis von digitalen Volumentomografie(DVT)- und Computertomografie(CT)-Daten und optischem Tracking. In der Evaluations- und Erprobungsphase sind gegenwärtig spannende Konzepte zur roboterunterstützten Implantatinsertion. Sie erlauben einen Blick in die mögliche Zukunft. Vor- und Nachteile der beschriebenen Workflows und Technologien werden aufgeführt und diskutiert. Möglichkeiten und Grenzen der unterschiedlichen Behandlungs- bzw. Navigationskonzepte werden erläutert, um einen umfassenden Einblick und Überblick über die aktuell und zukünftig verfügbaren Wege in der digitalen dentalen Implantologie zu gewinnen.

Manuskripteingang: 20.07.2021, Annahme: 31.08.2021

Einleitung

Die Therapie des teilbezahnten oder zahnlosen Patienten mit implantatgetragener Zahnersatz ist eine interdisziplinäre Herausforderung für das klinische Team aus zahnärztlicher Prothetik und Chirurgie, einschließlich der Zahntechnik. Die

Komplexität ist umso größer, wenn die Folgen des Zahnverlustes zu (ausgeprägten) Resorptionserscheinungen des Alveolarkamms geführt haben. Infolgedessen kommt es oftmals zu erheblichen Schwierigkeiten beim Erreichen einer optimalen dreidimensionalen (3-D-) Implantatposition¹. Die computergestützte Implantologie „Computer-

Aided Implant Surgery“ [CAIS]) wird für die Planung und Platzierung der Implantate in der optimalen, vorher festgelegten Position eingesetzt, um einen langfristigen Erfolg in Bezug auf Funktion und Ästhetik zu erzielen.

Generell betrachtet können CAIS-Systeme übergeordnet in statische und dynamische Systeme unterteilt werden, basierend auf der verwendeten Technologie und den angewandten Behandlungsprotokollen^{2,3}. In dem Fall, in dem der digitale Workflow nicht während der chirurgischen Platzierung, sondern nur während der Planung der Implantatposition verwendet wird, werden die Implantate freihändig gesetzt und der Chirurg verwendet anatomische Orientierungspunkte oder Messungen, um die vorgegebene Position zu identifizieren. Ein solches Protokoll wird in der Literatur häufig als mentale Navigation, Freihand- oder digital geplante konventionell gesetzte Implantatchirurgie bezeichnet^{4–6}. Statische CAIS-Systeme verwenden in der Regel stereolithografisch hergestellte (3-D-gedruckte) Bohrschablonen in Kombination mit speziellen chirurgischen Kits für die operative Implantatbettauflbereitung und -insertion. Im Gegensatz hierzu werden bei den dynamischen CAIS-Systemen optische Tracking-Technologien verwendet, um eine freihändige Platzierung der Implantate mit Positionsbestimmung in Echtzeit zu ermöglichen.

In Studien, in denen die Genauigkeit verschiedener CAIS-Systeme verglichen wurde, wurde die höchste Präzision bei Patienten mit einzelnen fehlenden Zähnen berichtet, gefolgt von teilbezahnten und zuletzt zahnlosen Patienten⁷. Es überrascht nicht, dass die komplett zahnlose Patientenkohorte die am wenigsten genaue Implantatpositionierung aufweist. Die Anatomie kann aufgrund des Fehlens reproduzierbarer Referenzpunkte, der häufig fortgeschrittenen Resorption des Alveolarknochens und der daraus erwachsenen chirurgischen Komplexität eine Herausforderung für die Freihandplatzierung darstellen. Herausforderungen bestehen auch für CAIS-Systeme, da das Fehlen von Zähnen die Stabilisierung der Bohrschablone erschwert und die Präzision digitaler Diagnostiken, wie des intraoralen Scannens, verringern kann. Obwohl in Studien über die Genauigkeit der Implantatposition

mit einzelnen CAIS-Systemen beim teilbezahnten Patienten berichtet wurde^{7–9}, fehlt es an vergleichenden Studien, in denen verschiedene CAIS- und Freihand-Positionierungsprotokolle innerhalb eines ähnlichen Set-ups verglichen werden.

Das Ziel dieses vergleichenden technischen Berichts ist es, verschiedene CAIS-Systeme unter Verwendung der (a) mentalen, (b) statischen und (c) dynamischen CAIS vorzustellen. Zuletzt werden Konzepte der (d) roboterassistierten Navigation bzw. Implantation präsentiert, die jedoch, zumindest gegenwärtig, noch fern der breiten Anwendung in der Praxis sind.

Computerassistierte Implantatchirurgie: CAIS

Osseointegrierte Implantate gelten inzwischen als Standard zur Rekonstruktion von Funktion und Ästhetik bei teilbezahnten oder zahnlosen Patienten^{8,10}. Komplikationen aufgrund von Implantatfehlstellungen, z. B. durch Kortikalisperforationen, Wurzelverletzungen oder Beschädigung anderer relevanter anatomischer Strukturen, sind keine Seltenheit^{11,12}. Die langfristige Erfolgsrate, insbesondere die periimplantäre Weich- und Hartgewebestabilität, wird von der Genauigkeit der dreidimensionalen Positionierung der Implantate wesentlich beeinflusst. Dazu zählen die korrekte Implantatposition, der korrekte Implantatwinkel und die korrekte Implantattiefe im Kieferknochen^{13–15} (Abb. 1)¹⁶.

Digitale dreidimensionale Bildgebung und virtuelle Behandlungsplanung

Durch die in der Zahnmedizin inzwischen etablierte digitale dreidimensionale radiologische Bildgebung ergibt sich nicht nur die Möglichkeit einer verbesserten Diagnostik, sondern auch die der Erstellung von bilddatenbasierten 3-D-Behandlungsplänen¹⁷. Columbia Scientific (Maryland, USA) führte bereits im Jahr 1988 die softwarebasierte Diagnostik und Behandlungssimulation auf Basis von Computertomografie(CT)-Daten ein. Kurz darauf ermöglichte die Softwarelösung

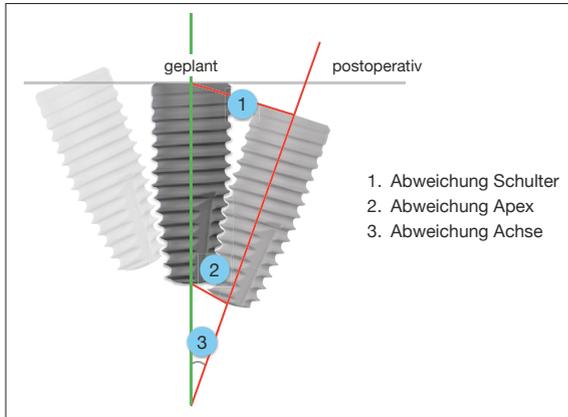


Abb. 1 Bewertung der ursprünglichen/präoperativ geplanten und tatsächlichen Position eines dentalen Implantats (Bewertungskriterien der Abweichung von 1 Implantatschulter/ „entry point“, 2 Implantatapex und 3 Implantatachse). (Quelle: modifiziert nach: Wu et al.¹⁶).

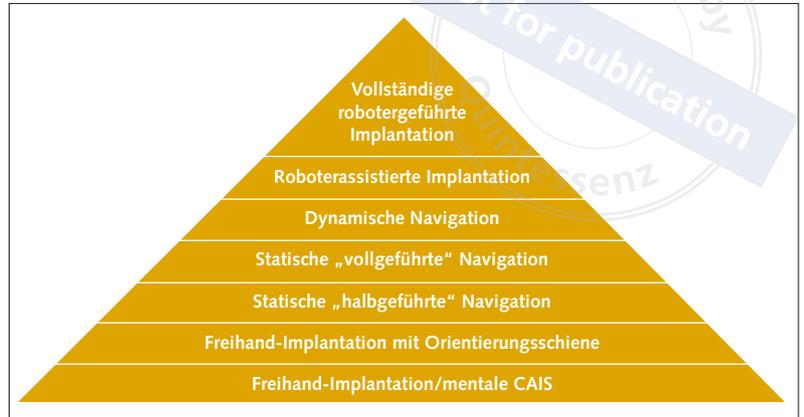


Abb. 2 Navigationskonzepte in der Implantologie von der Freihand- bzw. „mentalen“ Navigation bis zur autonomen Vollrobotik nach Genauigkeit und Verbreitungsgrad (Basis = häufige Anwendung) ohne absolute Wertung. Gerade beim direkten Vergleich der statischen und dynamischen Navigation sind noch Studien unter standardisierten Bedingungen erforderlich. CAIS: Computerassistierte Implantatchirurgie. (Quelle: PD Dr. mult. Florian M. Thieringer).

„image-Master-101“ die Darstellung von Zahnimplantaten zusammen mit radiologischen Bilddaten. Wenig später, 1993, wurde mit SimPlant (zunächst Fa. Columbia Scientific, dann Fa. Materialise, Leuven, Belgien) die Auswahl und Überblendung virtueller Implantate mit exakten Abmessungen auf CT-Bildern möglich¹⁸. Das Aufkommen der dentalen, digitalen Volumentomografie (DVT) in Kombination mit dreidimensionalen Diagnostik- und Planungstools hat zu einem großen Fortschritt in der virtuellen Behandlungsplanung geführt und die Übertragung der geplanten Implantatposition vom Computerbildschirm auf den Patienten ermöglicht¹⁹. Heutzutage existieren zahlreiche Softwareprogramme, die die virtuelle Insertion von maßstabgetreu dargestellten Implantaten in DVT- oder CT-Datensätzen von Patienten erlauben²⁰.

Methoden, die auf der computergestützten Chirurgie basieren, wurden auch zu wichtigen unterstützenden Werkzeugen des digitalen dentalen Workflows für die präoperative Implantatbehandlungsplanung, die Implantatsimulation, Implantation und Prothetik sowie die Beurteilung der postoperativen Ergebnisse^{20,21}. Seitdem wurden verschiedene Technologien und Ansätze wie computer- und robotergestützte Operationen einschließlich „Augmented Reality“-Systemen auf den Markt gebracht, um Leistungsumfang,

Genauigkeit und Sicherheit des geführten bzw. navigierten chirurgischen Eingriffs im Vergleich zu Freihandtechniken zu erhöhen^{22–25}. Alle verschiedenen Navigationskonzepte basieren auf dem Ansatz, die präoperativen digitalen räumlichen Planungsdaten auf das Operationsgebiet exakt zu übertragen²⁶.

Statische und dynamische Navigation

Die statische und die dynamische Navigation sind die Hauptkonzepte der fast ausschließlich computerbasierten Unterstützungssysteme in der Implantologie (Abb. 2). Bei beiden Konzepten ist es das Ziel, durch virtuelle Planung und Übertragung der Informationen im Operationssaal eine Abweichung vom endgültigen Behandlungsergebnis zu minimieren und eine höhere Genauigkeit zu erreichen^{20,27}. Vor allem bei komplexen Fällen, in denen präzise chirurgische Verfahren zum Schutz von anatomischen Strukturen erforderlich sind, ist die CAIS indiziert²⁰. Wichtig bei der Indikationsstellung sind die Bewertung nach den Grundprinzipien des Strahlenschutzes (ALARA: „As Low As Reasonably Achievable“) und die Berücksichtigung der höheren Behandlungskosten durch den Planungsmehraufwand im Vergleich zur Freihand-Implantation.

Tab. 1 Klassifizierung statischer Navigationskonzepte.

Schablonenunterstützung	Sichtbarkeit	Bohr- und Implantationsführung
a) Schleimhautgetragene Schablone b) Knochengetragene Schablone c) Zahngetragene Schablone	a) Geschlossene Schablonen b) Offene Schablonen	a) Vollgeführt („fully guided“, FG) b) Teilgeführt/halbgeführt („half-guided“, HG): bohrergeführt, pilot-bohrergeführt, nicht computergeführte Schablone/Positionierungsschiene

Mentale und Statische Navigation

Statische Bohrschablonen dienen zur starren Führung der Implantatbohrer während des Bohrvorgangs. Eine über die Führung hinausgehende dynamische Visualisierung der Bohrerposition im Knochen sowie der Planungsdaten oder anatomischen Strukturen ist nicht oder nur beschränkt möglich. Die Schablonen werden auf der Basis von DVT- oder CT-Daten mit überlagerten extroralen Modelloberflächenscans (analog–digital) bzw. alternativ Intraoralscans (IOS) mit entsprechender Implantatplanungssoftware modelliert. Die Herstellung der Schablonen erfolgt im CAD/CAM-Verfahren durch (additive) 3-D-Druck- oder (subtraktive) Fräsverfahren in Dentallaboren oder – zunehmend häufiger – auch in Praxislaboren. Inzwischen existieren zahlreiche Varianten von Bohrschablonen mit verschiedenen Konzepten der Bohrer- und Implantatführung.

Instrumentenkits für statische Navigation

Mit dem Ziel, die korrekte Position und Tiefe des Implantatbetts zu übertragen und intraoperativ zu kontrollieren, wurden für einige Implantatssysteme spezielle Sets/Kits und besondere (in der Regel längere) Bohrer mit physischen Stoppern und/oder Indikationslinien bzw. Tiefenmarkierungen entwickelt. Es gibt noch weitere Unterschiede zwischen den Systemen. Einige statische Schablonen können sowohl für die Bohrung als auch für die Implantatinsertion verwendet werden, während diese bei manchen Systemen vor der Implantatinsertion entfernt werden sollten^{6,26,28}. In einigen Fällen gibt es unterschiedliche Schablonen mit variablem Hülsendurchmes-

ser für einen Patienten, während bei anderen Systemen nur eine Schablone – mit abnehmbaren Hülsen oder Hülsen auf Bohrern – verwendet wird²⁹.

Einflussfaktoren auf die Genauigkeit

Die Genauigkeit dieser Bohrschablonen wird durch verschiedene Faktoren während des Herstellungsprozesses beeinflusst: radiologische Bildgebung (z. B. Bild- oder Bewegungsartefakte), Datensegmentierung, verwendete Oberflächenscans (von Modellen oder IOS), Datenregistrierung (automatisch oder manuell), softwarebasierte Planung und softwarebasiertes Design, Fräs- bzw. Druckverfahren, verwendete Materialien, Nachbearbeitung (Postprocessing), Sterilisation, unterschiedliche Bohrhülsen, intraorale Positionierung und Stabilisierung der Schablonen. Der Hauptgrund für Abweichungen findet sich jedoch meistens bei Anwendungsfehlern (z. B. Fehlpositionierung der Bohrschablone beim Eingriff) und nicht unbedingt im Herstellungsprozess^{3,30–40}. Einige wissenschaftliche Studien untersuchten auch zusätzliche Faktoren, die zur Implantatabweichung beitragen können, wie den Effekt von rechts- oder linkshändigen Chirurgen beim Einsetzen eines Implantats sowie die Abnutzung von Hülsen und Bohrern nach langer Verwendung^{6,41}.

Klassifizierung statischer Navigationskonzepte

Statische Navigationskonzepte können nach der Art der Führung, der chirurgischen Sicht, der Bohrung und der Möglichkeit der Implantatinsertion klassifiziert werden, wie in Tabelle 1 aufgeführt²⁶.

Schleimhautgetragene Bohrschablonen

Schleimhautgetragene Bohrschablonen (vollständig geführt bzw. „fully guided“) können für die statische Navigation bei lappenlosen („flapless“) Operationen bei unbezahnnten Patienten die erste Wahl sein. Ihre Stabilität kann durch die Verwendung von transmukosalen Fixierungsstiften verbessert werden. Bei teilbezahnnten Patienten kann die Stabilisierung von schleimhautgetragenen Schablonen verbessert werden, wenn diese mit zahn- oder kronengetragenen Abschnitten kombiniert werden^{6,26}. Höhere Patientenzufriedenheit aufgrund geringerer Stuhlzeit, weniger Schmerzen und Schwellungen sowie geringere Morbidität nach lappenlosen Eingriffen sind einige der Vorteile der Verwendung von schleimhautgetragenen (vollständig geführten) Bohrschablonen im Vergleich zu Implantationen mit klassischer Lappenbildung und Freilegung der ossären Implantatumgebung. In Fällen, in denen eine Knochen- oder Gewebeaugmentation erforderlich ist, haben mukosagestützte Bohrschablonen keine Indikation, es sei denn, es wird ein Tunnelzugang zur Gewebeaugmentation verwendet^{12,42–44}.

Knochengestützte Schablonen

Knochengestützte Schablonen sind bei anatomisch komplexen Situationen und der Indikation für eine Knochenaugmentation indiziert. Obwohl dieser Zugang häufig eine direkte Sicht auf den Knochen und anatomische Orientierungspunkte ermöglicht, ist die Patientenzufriedenheit, im Vergleich zu Implantationen mit in der Regel weniger invasiven Zugängen bei schleimhaut- oder zahngestützten Schablonen, aufgrund der höheren Morbidität, der Schwellungen und Schmerzen, des Analgetikaverbrauchs und der längeren Behandlungszeit geringer^{42–44}. Bei der Planung von Zugangswegen und Schablonendesign sollte berücksichtigt werden, dass ein freipräparierter Mukoperiostlappen die Genauigkeit der Führungstabilität einer Implantatschablone verringern kann⁴⁵.

Zahngetragene Schablonen

Diese Art von Schablonen werden bei teilbezahnnten Patienten eingesetzt: Verbliebene Zähne/Kronen dienen als zuverlässige Auflage zur Stabilisierung der Bohrschablonen. Alternativ können bei spärlicher Bezahnung und geplanten Extraktionen auch vorübergehende Implantate und Verankerungsstifte als Schablonenanker eingesetzt und die Implantation mehrstufig statisch navigiert durchgeführt werden²⁶. Zahngetragene Schablonen bieten eine höhere Stabilität und Genauigkeit bei der Implantation als schleimhaut- oder knochengestützte Schablonen. Bei der Planung dieser Schablonen ist es wichtig, das operative Vorgehen und Lappendesign mit zu berücksichtigen, da die Weichgewebe ggf. mit der Bohrschablone interferieren können und damit den Eingriff erschweren.

„Sichtbarkeit“ bei Schablonen – offen oder geschlossen

Differenzieren in Bezug auf die „Sichtbarkeit“ durch Guide-Systeme lassen sich zwei Arten von Schablonen: offene und geschlossene Systeme. Geschlossene Schablonen werden häufig bei vollständig geführten („fully guided“) Operationen verwendet. Bohrer und Implantate gleiten vollständig durch die präzise anliegende Schablone (bzw. Bohrhülse) und sollen so eine mögliche Fehlpositionierung der Implantate verhindern. Andererseits kann bei der Bohrung Kühlflüssigkeit vom Knochen abgeschirmt werden. Damit besteht die Gefahr der Erhöhung der Knochentemperatur und Beeinträchtigung des Heilungsprozesses. Offene Schablonensysteme mit freiem Zugang/Fenster (meist von der bukkalen Seite) bieten die Möglichkeit der ausreichenden Kühlung bei direkter visueller Kontrolle während des Bohrens. Zudem besteht die Möglichkeit zur Positionskorrektur des Implantats noch während der Aufbereitung des Bohrstollens. Ein Nachteil kann jedoch die Zunahme von Positionierungsfehlern sein⁴⁶.

„Fully guided“ – vollständig geführt

Je nach Art der Bohrung und der Implantatplatzierung werden statische Führungen in drei Kategorien

eingeteilt, einschließlich der vollständig geführten („fully guided“, FG) und halb geführten (HG). Beim FG-Konzept wird die gesamte Aufbereitung des Implantatstollens geführt. Einige Studien konnten zeigen, dass der FG-Ansatz die höchste Genauigkeit bei der Übertragung der präoperativen Planung in den Operationsbereich aufweist. Allerdings bietet das FG-Konzept kaum Möglichkeiten, den Behandlungsplan während des Eingriffs noch zu ändern. Daher wird empfohlen, vor Anwendung zunächst Erfahrung im Bereich der 3-D-Planung zu sammeln⁴⁷. Ein weiterer Nachteil sind die relativ hohen Herstellungskosten der FG-Schablonen, vor allem im Vergleich zur Freihandtechnik⁴⁸.

„Half-guided“ – halbgeführt

Die halbgeführte oder teilgeführte Implantatchirurgie beinhaltet verschiedene Planungs- und Schablonenkonzepte („Halbschablonen“) und deckt nicht immer alle chirurgischen Schritte bei der Knochenbohrung ab²⁶. Bei der pilotbohrergeführten („First-drill“-) Bohrung, wird die Halbschablone bei der ersten Bohrung zur Orientierung eingesetzt und für die nächsten Bohrungen wieder entfernt. Die Möglichkeit von Änderungen in der Knochenbohrung nach der ersten Bohrung ist einer der Vorteile dieser Technik. Andererseits ist die Erfahrung des Chirurgen erforderlich, da hier die endgültige Positionierung des Implantats freihändig (FH) erfolgt^{47,49}.

Nicht computergeführt

Die nicht computergeführte Methode ist eine weitere Art der teilgeführten Implantatchirurgie mit Positionierungsschienen, die im Vergleich zu computergeführten Techniken wie Bohren und Pilotbohren sowie FG eine geringere Genauigkeit und Stabilität aufweist^{47,50,51}.

Mentalgeführte Implantation

Die mentalgeführte („brain-guided“) oder Freihand(FH)-Technik ohne Verwendung von Schablonen oder Geräten weist die geringste Genauigkeit (bei größter chirurgischer Sicht) im

Vergleich zu allen anderen Navigationskonzepten in der Implantatchirurgie auf. Auf der anderen Seite fallen bei diesem häufig eingesetzten Verfahren keine zusätzlichen Kosten an. Der Erfolg bei der Implantatinserion ist von der chirurgischen Erfahrung abhängig, erfordert jedoch keine Kenntnisse im Bereich der digitalen Operationsplanung und der CAD/CAM-Verfahren.

Dynamische Navigation mit Echtzeit-Navigationssystemen

Die intraoperative Navigation erlaubt, vergleichbar mit den inzwischen in nahezu jedem Auto integrierten Straßen-Navigationsgeräten, die Echtzeitdarstellung der exakten Position eines Instrumentes oder Pointers (Auto) in Bezug zu einem radiologischen Datensatz und/oder anatomischen 3-D-Planungsdaten (Landkarte). In Disziplinen, wie der Neurochirurgie, HNO oder Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, werden chirurgische Navigationssysteme inzwischen standardmäßig und mit wachsender Frequenz eingesetzt. Die intraoperative Navigation erhöht die Sicherheit bei operativen Eingriffen und erlaubt nicht nur die exakte Umsetzung der präoperativ auf Basis von radiologischen Bilddaten durchgeführten virtuellen Planung, sondern auch die dynamische intraoperative Orientierung. Bei Bedarf kann, je nach intraoperativem Verlauf, der Plan auch noch während der Operation geändert werden. Dies ist mit statischen Schablonen nahezu unmöglich und ein entscheidender Vorteil der dynamischen Navigation gegenüber statischen Konzepten.

Implantologische Navigationssysteme als Vertreter der dynamischen computergestützten Chirurgie (d-CAIS) ermöglichen wie ihre „großen Geschwister“ aus den neurochirurgischen Operationssälen die Echtzeitdarstellung von Instrumenten, Bohrer und von Implantaten während der Implantatbettauflbereitung und der Insertion eines Implantats über die gesamte Dauer eines chirurgischen Eingriffs. Präoperativ rekonstruierte 3-D-Bilder werden räumlich und geometrisch korrekt auf dem aktuellen DVT-Datensatz des Patienten eingeblendet²⁰.



Abb. 3a bis e Komponenten eines dynamischen Navigationssystems (Denacam, Fa. mininavident): a) am Handstück angebrachtes stereoskopisches Navigationssystem, b) Touchscreen (links im Bild) für Echtzeit-3-D-Visualisierung und multiplanare Darstellung der Bohrerposition/Rechnerbasis, c) Bildschirminhalt, Echtzeitdarstellung der Bohrerposition in 3-D-Darstellung, zusätzlich Fadenkreuz als „Zielvorrichtung“ sowie dynamische Angabe der Angulation/Positionsabweichung und Tiefenbohrung, d) klassische statische 3-D-gedruckte Bohrschablone (für die dynamische Navigation nicht nötig), zahngetragener Marker-Tray und Registrierwerkzeug für die dynamische Navigation, e) Registrierung des Pilotbohrers.

Voraussetzung für die dynamische Navigation ist die Verbindung von optischen Markern oder Fiducialpunkten mit den Patienten und Instrumenten (Abb. 3, Abb. 4a und b) sowie ein Kamerasystem, das diese „Fiducials“ optisch erfasst (Abb. 3a und e). Unter den verschiedenen Fiducialmarkern, einschließlich knochenfester, zahn- oder schleimhautgetragener Markerschienen (Tray mit Marker siehe Abb. 3d und 4), haben knochenverankerte/verschraubte Fiducials eine höhere Genauigkeit, während zahn- oder schleimhautgetragene Schienen deformieren und Abweichungen erzeugen können⁵².

Mehrere Studien haben gezeigt, dass geführte Operationen besonders in kritischen Situationen von Vorteil sein können, wenn wichtige anatomische Strukturen (z. B. Sinus, Nerv) gefährdet sind und eine Tiefenkontrolle erforderlich ist^{7,18,53}. Da Tiefenabweichungen nicht selten sind, wird ein Sicherheitsabstand von mindestens zwei Millimetern (mm) empfohlen, besonders in der Nähe von wichtigen anatomischen Strukturen²⁰.

Darüber hinaus könnten geführte dynamische Operationen ein nützlicher Ansatz bei minimalinvasiven lappenlosen („flapless“) Implantatoperationen sein, bei begrenztem interdentalen Raum,

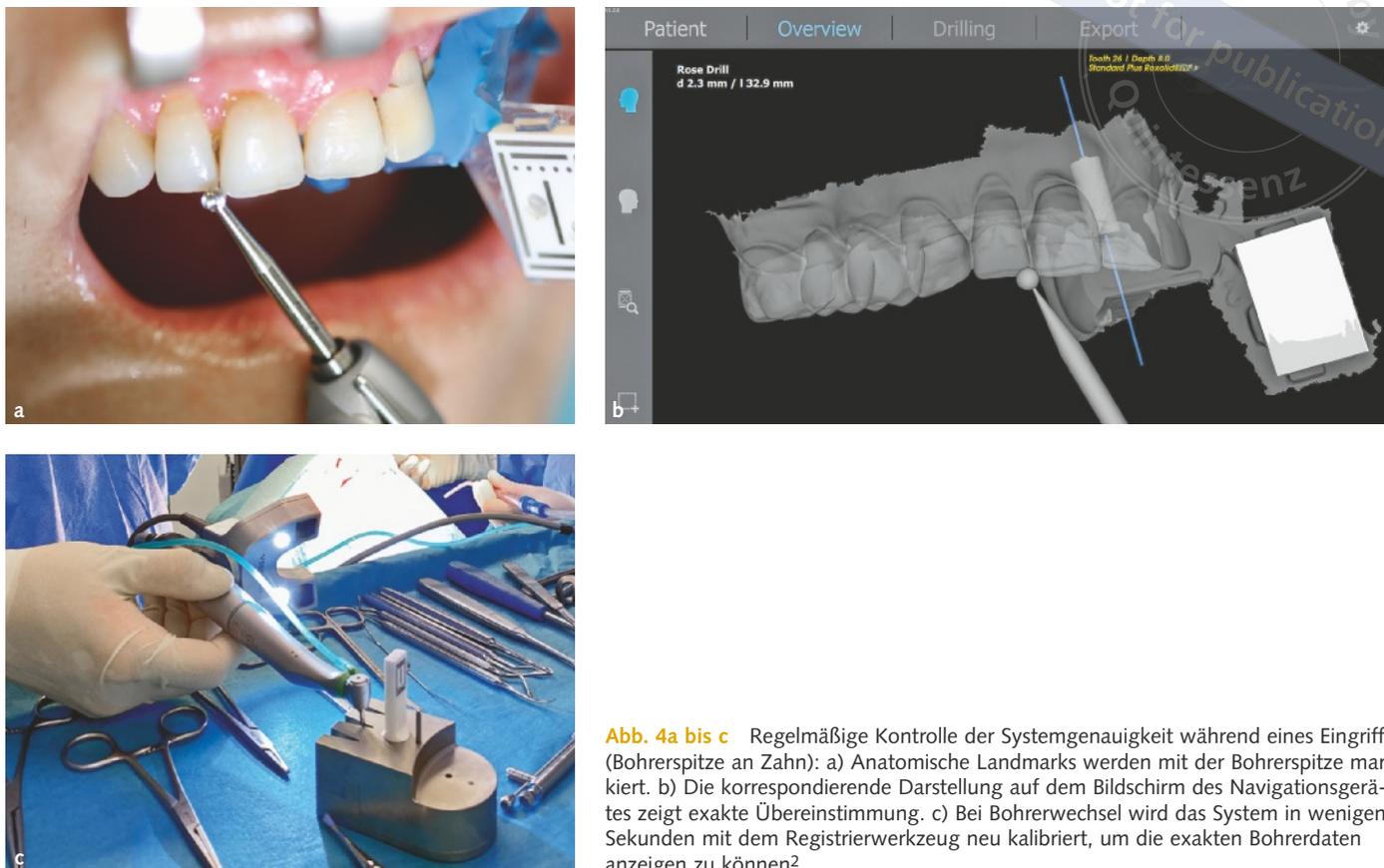


Abb. 4a bis c Regelmäßige Kontrolle der Systemgenauigkeit während eines Eingriffs (Bohrerspitze an Zahn): a) Anatomische Landmarks werden mit der Bohrerspitze markiert. b) Die korrespondierende Darstellung auf dem Bildschirm des Navigationsgerätes zeigt exakte Übereinstimmung. c) Bei Bohrerwechsel wird das System in wenigen Sekunden mit dem Registrierwerkzeug neu kalibriert, um die exakten Bohrerdaten anzeigen zu können².

wo die Verwendung einer statischen Führung nicht möglich ist, sowie in Situationen, in denen die Angulation und die Nähe des Implantats zu den benachbarten Zähnen eine höhere Genauigkeit erfordern, weil das herausragende Merkmal der dynamischen Navigation im Vergleich zur halbgeführten statischen und Freihandmethode die höhere Genauigkeit der Angulation unter den eingesetzten Implantaten ist^{28,54}.

Im Vergleich zur statischen Schablone zeigte sich hierbei auch eine signifikant höhere Genauigkeit in Bezug auf Eintrittspunkt und Apex des Implantats². Die dynamische Navigation wird auch in einigen Fällen empfohlen, in denen aufgrund der eingeschränkten Mundöffnung oder aus ähnlichen Gründen die direkte Visualisierung nicht möglich ist. Ein weiterer Vorteil der dynamischen Navigationssoftware ist die Möglichkeit, parallele Implantate zu inserieren und den Behandlungsplan während des Eingriffs zu modifizieren^{28,51,54}. Auf der anderen Seite sind die Lernkurve, die

hohen Kosten der Navigationssysteme, der Fehler des Systems, der die räumliche Beziehung zwischen Patient und Referenzpunkt beeinträchtigen könnte, und in der Folge ein möglicher Fehler bei der Einführungsstelle einige der Nachteile dieser Art der Navigationsoperation^{51,55,56}.

Darüber hinaus werden chirurgische Navigationssysteme über einen Bildschirm bereitgestellt, der sich nicht in unmittelbarer Nähe des Operationsgebiets befindet (Abb. 5), und es ist erforderlich, die Aufmerksamkeit während der dynamischen Navigation zwischen dem Bildschirm und dem Operationsgebiet zu wechseln, um die visuellen Navigationsinformationen an das Operationsgebiet anzupassen. Die Aufrechterhaltung einer guten Hand-Augen-Koordination kann zu einer Unterbrechung der chirurgischen Verfahren führen⁵⁷, und die Bewegungen der chirurgischen Instrumente können gedreht, vergrößert oder gespiegelt werden, während sie auf dem Bildschirm angezeigt werden. Dies sind einige der Nachteile

des dynamischen Navigationssystems⁵⁷. Obwohl die ersten Ergebnisse von Studien zur Genauigkeit der dynamischen Navigation bei Zahnimplantat-Operationen sehr erfolgsversprechend sind, besteht Bedarf an weiteren standardisierten Untersuchungen, um diese in der Implantologie noch relativ neue Technologie im Vergleich zu Freihand- und statisch geführten Operationen zu evaluieren^{26,27}. In-vitro-Studien können im Vergleich zu klinischen Studien eine höhere Genauigkeit bei der Navigation erzielen. „Laborbedingungen“ bei Modelloperationen erlauben meist einen besseren Zugang und eine breitere Visualisierung und weisen keine Einschränkungen durch Blut, Speichel oder Patientenbewegung auf².

In einer von Engkawong et al. veröffentlichten Arbeit mit randomisiertem, prospektivem Studiendesign wurden freihandgeführte, dynamisch (d-CAIS) und statisch (s-CAIS) navigierte Implantatfälle an einem Kollektiv von 90 Probanden untersucht. In Bezug auf postoperative Schmerzen, Schwellungsgrad, Einnahme von Schmerzmitteln und Patientenzufriedenheit konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden⁵⁵.

Klinischer Fall einer dynamischen Navigation (d-CAIS)

Der klinische Fall zeigt ein Step-by-step-Protokoll der Planung und dynamischen Navigation im komplett digitalen Workflow.

Eine 60-jährige weibliche Patientin stellte sich für die Implantation bei Freundsituation in der „Federation Dentaire Internationale“ (FDI)-Position 26 an der Klinik vor. Eine 25 Jahre alte Brücke, getragen auf den Pfeilerzähnen 22, 23 und 25, mit einem Flieger 26 musste entfernt werden. Die neue Planung beinhaltete eine Einzelzahnversorgung mit einem Implantat in Regio 26 und eine neue Brücke, getragen auf den Zahn Pfeilern 22, 23 und 25. Während der Planung zeigte sich ein ausgeprägter Knochenverlust durch fehlende funktionelle Belastung im Bereich der Frendlücke in Regio 26. Eine Sinusbodenelevation wurde durch die Patientin abgelehnt, sodass wir uns bei ausgeprägter Kieferkammatrophy und beengten anatomi-

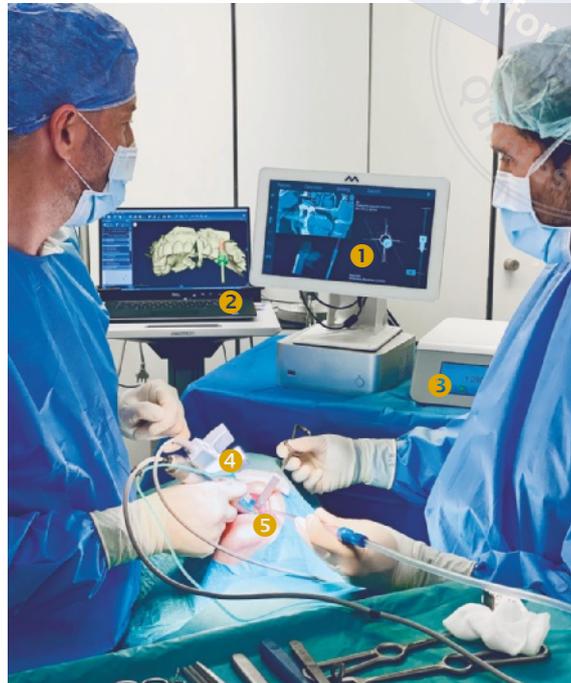


Abb. 5 Dynamisches Navigationssystem während der Implantation. Der Chirurg sieht in Echtzeit Positionsabweichungen, Winkelabweichungen und Bohrtiefe, auch in Relation zu den radiologischen Bilddaten/Planungsdaten. In der Nähe von kritischen anatomischen Strukturen wird gewarnt. (1: Touch-Display des Navigationssystems, 2: 3-D-Planungsdaten/Planungslaptop, 3: chirurgisches Bohrsystem, 4: stereoskopische Kameraeinheit am Implantatwinkelstück, 5: Target/Fiducial, zahnetragen).

mischen Verhältnissen bei eingeschränkter Mundöffnung für eine dynamische navigierte Operation entschieden. Es ist besonders darauf hinzuweisen, dass ein 2-mm-Sicherheitsabstand zu anatomisch relevanten Strukturen eingehalten werden muss. Ferner muss die Patientin aufgeklärt werden, dass die Gefahr einer Perforation im Bereich des Nasenbodens und/oder des Sinus maxillaris besteht.

Das dynamische CAIS-Behandlungsprotokoll beinhaltete drei Schritte (Abb. 6).

Schritt 1: Digitale Datenerfassung

Neben der klinischen Befunderhebung und Diagnostik wurden für die Digitalisierung der individuellen Patientensituation ein DVT angefertigt sowie ein Intraoralscan (IOS, Fa. Trios3, 3Shape, Kopenhagen, Dänemark) durchgeführt. Bei dem IOS wurde der für das Navigationssystem (Denacam, Fa. mininavident, Liestal, Schweiz) spezifische Tray mit Marker (Denatray/Denemark, Fa. mini-

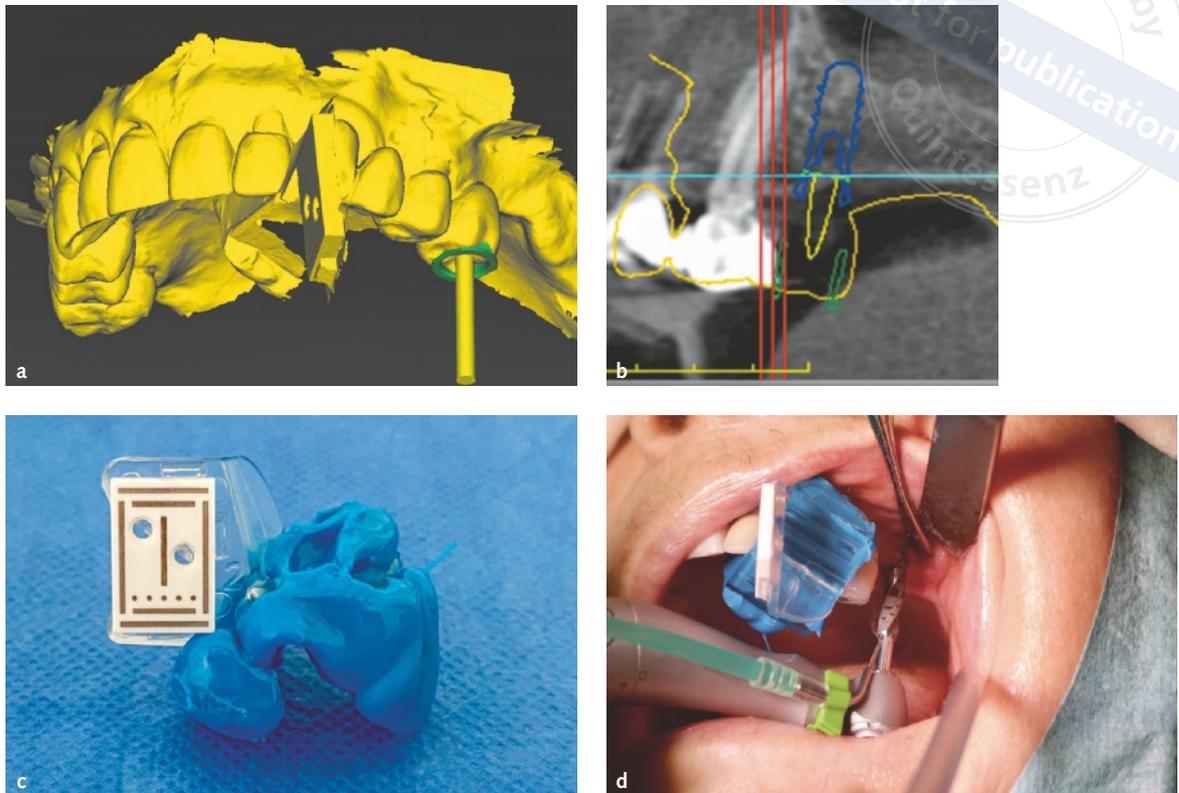


Abb. 6a bis d Prothetisch orientierte Rückwärtsplanung bei geplantem Einzelzahnersatz an 26: a) eingeblendeter Scan des Marker-Trays, b) Darstellung der geplanten Implantatposition im Verhältnis zum Nachbarzahn 25 und Sinus maxillaris, c) Marker-Tray mit optischem Target, d) Situation im Patientenmund bei der navigierten Aufbereitung des Implantatbetts.

navident) im Patientenmund für die spätere räumliche Überlagerung von DVT und Oberflächenscan (Registrierung) erfasst. Konventionelle zahntechnische Modelle oder eine Röntgenschablone werden in diesem Workflow nicht benötigt.

Schritt 2: Virtuelle Implantatplanung

Die Planung erfolgte basierend auf dem DVT-Datensatz und einem enoraler Scan des Oberkiefers und des Markers des dynamischen Navigationssystems. Die „Digital Imaging and Communications in Medicine“ (DICOM)-Dateien vom DVT und die „Standard Tessellation Language“ (STL)-Datei des enoralen Scans wurden in die virtuelle Implantatplanungssoftware eingelesen (coDiagnostiX, Fa. Dental Wings, Montreal, Kanada). Beide Datensätze wurden mittels Triangulations-Algorithmus übereinander gelagert. Die optimale 3-D-Implantatpositionierung wurde entsprechend des Set-ups des enoralen Scans geplant.

Die abgeschlossene Planung wurde schließlich über einen USB-Datenträger ins dynamische Navigationssystem importiert.

Schritt 3: Dynamisch navigierte Implantatinsertion

Vor der Implantatinsertion wurde der Flieger 26 der alten Brücke abgetrennt und entfernt. Der Marker des dynamischen Navigationssystems wurde am Oberkiefer zahngetragen befestigt aufgesetzt (Abb. 6d). Nach erfolgter Registrierung des Winkelstücks und des Bohrers mit einem Registrierwerkzeug (Denareg, Fa. mininavident) (s. Abb. 4c), erfolgte die Überprüfung der Genauigkeit an den Inzisiven der Patientin (s. Abb. 4a und b). Unter Lokalanästhesie erfolgten die minimalinvasive Präparation eines Mukoperiostlappens und die dynamisch navigierte Aufbereitung des Implantatbetts unter kontinuierlichem Monitoring von Bohrerposition, -angulation und -tiefe.

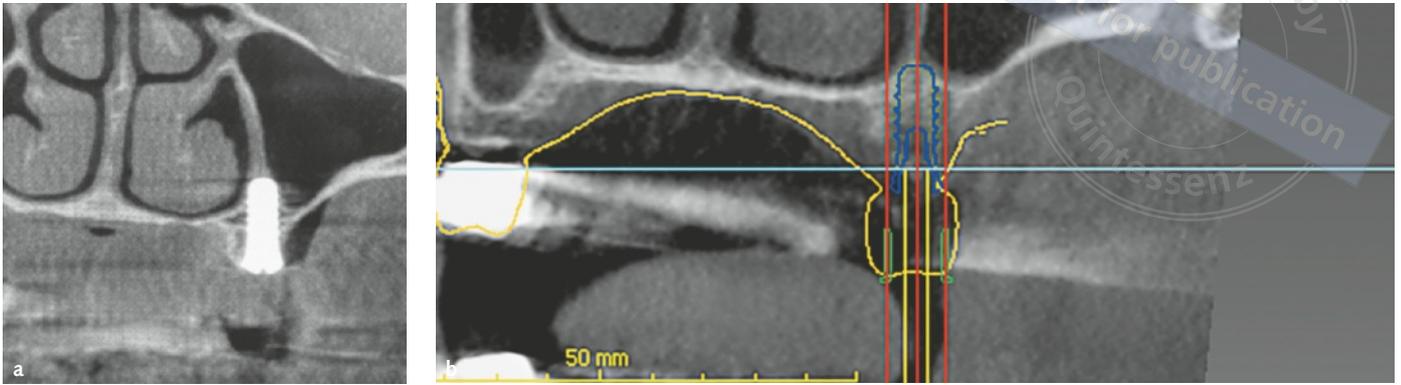


Abb. 7a und b a) Die koronare Darstellung der postoperativen Bildgebung zeigt die korrekte Position des Implantats Regio 26 bei geringer Restknochenhöhe des Alveolarfortsatzes. b) Entsprechende präoperative Planungsdaten mit 8-mm-Implantat (blau); intraoperativ wurde der Wechsel auf ein 10-mm-Implantat (Straumann TL RN 4.1 x 10 mm) beschlossen.

Die Platzierung des Implantats erfolgte aus freier Hand (Straumann SP RN 4,1 x 8 mm, Fa. Straumann, Basel, Schweiz). Da initial nur eine ungenügende Primärstabilität bei limitiertem Knochenangebot erzielt werden konnte, wurde ein 2 mm längeres Implantat inseriert (Straumann SP RN 4,1 x 10 mm). Auf diese Weise konnte eine gute Implantat-Primärstabilität erreicht werden.

Die postoperative klinische Situation und Bildgebung zeigen die korrekte prothetische 3-D-Position des Implantats entsprechend der präoperativen Planung (Abb. 7).

Roboterassistierte Navigation, Implantation und Osteotomien

Die Zahl der medizinischen Anwendungen im Bereich der roboterassistierten Chirurgie nimmt kontinuierlich zu und zeigt, dass die Medizinrobotik ein enormes Potenzial für die Zukunft hat. Die Technologie hat ihren Ursprung in der Pionierarbeit der National Aeronautics and Space Administration (NASA), deren Wissenschaftler Mitte der 1980er Jahre den Grundstein der ferngesteuerten Roboterchirurgie legten⁵⁶.

Das Roboter-Dentalimplantatsystem Yomi (Fa. Neocis, Florida, USA) wurde 2017 von der US-amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) für erste implantologische Indikationen zugelassen. Die Funktionsweise dieses Systems basiert auf einem roboterarmgesteuerten, jedoch

chirurgenkontrollierten Implantologiehandstück, das während des Eingriffs mit haptischem Feedback unterstützt⁵⁷. Es handelt sich nicht um einen autonom agierenden, d. h. selbstständig operierenden Roboter, sondern um ein Unterstützungssystem, das die Chirurgie mit dem Handstück und den Implantatbohrer in die vorab mit der Implantatplanungssoftware definierte Position führt. Yomi steuert während der Implantation die Tiefe, Angulation und Position für die Implantatbohrung. Ein Vorteil dieses Robotersystems ist, wie bei der dynamischen Navigation, die Möglichkeit, chirurgische Pläne während eines Eingriffs zu ändern. Darüber hinaus ist durch die schablonenfreie Behandlung ein effizientes minimalinvasives Vorgehen mithilfe der haptischen Technologie möglich¹⁰. Das Fehlen einer statischen Bohrschablone im Operationsgebiet ermöglicht einen optimalen Zugang, vergleichbar mit der Freihand-Implantation, bei ausreichender Sicht und Kühlung während der Bohrung⁵⁷. Erhaltene Präzision sowie eine höhere Wirksamkeit und Stabilität sind weitere Vorteile roboterassistierter Operationen, besonders in komplexen Fällen, bei denen auch Ermüdung des Chirurgen und menschliche Fehler Einfluss auf das Ergebnis haben können⁵⁶. Nachteile dieser Technologie sind sicherlich ein hoher Anschaffungspreis, aktuell noch längere Operationszeiten, die erforderlichen Kenntnisse und Fähigkeiten, einschließlich psychomotorischer Fähigkeiten sowie der Fähigkeiten zur Operationsplanung und Steuerung der Roboter-Konsole^{58–60}.



Abb. 8 Der autonom agierende Laser-Operationsroboter CARLO kann die virtuelle Planung von Osteotomien mit hoher Genauigkeit am Patienten umsetzen. (Bildquelle: Universitätsspital Basel).

Ein weiterer Schritt nach vorne in der Medizintechnik sind selbstständig agierende Operationsroboter. Ende 2017 stellte Zhao das weltweit erste autonome robotergestützte System zur Zahnimplantation, das „Autonomous Dental Implant Robotic System“ (ADIR), vor. ADIR wurde in einem In-vivo-Tierversuch evaluiert und zeigte dabei eine sehr hohe Umsetzungsgenauigkeit bei der Implantation und signifikant bessere Ergebnisse als bei der Vergleichsgruppe, die mit Schablonen und dem „fully guided“ Protokoll operiert wurde⁶¹. ADIR hat die Fähigkeit, sich während des Implantateingriffs kontinuierlich und automatisch anzupassen, ohne dass ein Chirurg eingreifen müsste. Ein bereits für die Knochenosteotomie im Oberkieferbereich an Menschen zugelassener Roboter ist CARLO, ein Akronym für „Cold Ablation, Robot-guided Laser Ostetome“ (Fa. Advanced Osteotomy Tools/AOT, Basel, Schweiz). Dieser Roboter kann selbstständig Knochen mit einem Er:YAG-Laser (ohne thermische Schäden) schneiden und dabei am Computer geplante Schnittgeometrien hochpräzise auf den Menschen übertragen^{62,63} (Abb. 8).

Die Einsatzmöglichkeiten von CARLO für implantologische Indikationen sind noch eingeschränkt. Der sehr hohe Anschaffungspreis des Systems und der Planungs- und Materialaufwand für Operationen sind Hindernisse für den Routi-

neinsatz in der dentalen Implantologie. Weitere Studien sind für beide vorgestellte Robotersysteme erforderlich, um die Machbarkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit in der klinischen Praxis zu bewerten. Trotzdem zeigt die Entwicklung der Medizintechnik das Potenzial derartiger Technologien für die Zukunft. Sehr interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Kombination von innovativen, zunehmend auch für die Zahnheilkunde relevanten Technologien wie der künstlichen Intelligenz („Artificial Intelligence“, AI) mit der Roboterchirurgie für autonome, robotergestützte Operationen^{24,25,56,64,65}.

Fazit

Dieser vergleichende technische Bericht soll eine aktuelle Übersicht der entsprechenden Systeme bieten. Für den Praktiker ist es schwierig, sich zwischen den verschiedenen Systemen und Anwendungen zurechtzufinden. Ferner ist eine Umstellung auf vollnavigierte Systeme auch mit erhöhtem Investment verbunden. Es muss darüber hinaus mit einer zeitlichen Lernkurve gerechnet werden.

Aktuell wird noch ein überwiegender Anteil von Implantationen in Freihandtechnik und/oder durch statische Navigation (Voll-/Halbschablone) durchgeführt²⁶. Das volle Potenzial der 3-D-digitalen bildgebenden Verfahren, der computerassistierten Operationsplanung und der Durchführung von Operationen mit statischen oder dynamischen Navigationssystemen entfaltet sich erst in der sinnvollen Kombination dieser innovativen Technologien. Sie erlauben im Vergleich zu traditionellen „mentalen“ Behandlungskonzepten eine bisher kaum erreichbare Genauigkeit bei der Umsetzung der präoperativen Planung im Patientenmund. Hierbei muss beachtet werden, dass eine radiologische 3-D-Bilddiagnostik erforderlich ist. Sowohl der Kosten-Nutzen-Aufwand als auch die erhöhte Strahlenexposition müssen individuell von Fall zu Fall abgewogen und gemeinsam mit den Patienten diskutiert werden.

Mehrere wissenschaftliche Studien konnten bereits zeigen, dass die dynamische Navigationschirurgie im Vergleich zu traditionellen statischen

Schablonen entweder vergleichbare oder in manchen Fällen sogar höhere Genauigkeit aufweist. Hierbei darf jedoch nicht vergessen werden, dass die Vergleichsstudien meist nicht mit der gleichen Methodik durchgeführt wurden. Daher sind für die Zukunft weitere Studien mit standardisiertem Aufbau erforderlich, um einen zuverlässigen und exakten Vergleich zwischen verschiedenen Formen von computer- oder robotergestützten Eingriffen durchführen zu können^{66,67}.

Interessenskonflikt

Die Autoren erklären, dass die Arbeit in Abwesenheit jeglicher kommerzieller oder finanzieller Beziehungen durchgeführt wurde, die als potenzieller Interessenkonflikt ausgelegt werden könnten.

Literatur

- Henry PJ. A review of guidelines for implant rehabilitation of the edentulous maxilla. *J Prosthet Dent* 2002;87, 281–288.
- Jung RE, Schneider D, Ganeles J, Wismeijer D, Zwahlen M, Hämmerle CH et al. Computer technology applications in surgical implant dentistry: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Implant* 2009;24(Suppl):92–109.
- Tahmaseb A, Wismeijer D, Coucke W, Derksen W. Computer Technology Applications in Surgical Implant Dentistry: A Systematic Review. *Int J Oral Maxillofac Implant* 2014;29:25–42.
- Gillot L, Cannas B, Friberg B, Vrielinck L, Rohner D, Pettersson A. Accuracy of virtually planned and conventionally placed implants in edentulous cadaver maxillae and mandibles: A preliminary report. *J Prosthet Dent* 2014;112:798–804.
- Vercruyssen M, Coucke W, Naert I, Jacobs R, Teughels W, Quirynen M. Depth and lateral deviations in guided implant surgery: an RCT comparing guided surgery with mental navigation or the use of a pilot-drill template. *Clin Oral Implan Res* 2015;26:1315–1320.
- Vercruyssen M, Cox C, Coucke W, Naert I, Jacobs R, Quirynen M. A randomized clinical trial comparing guided implant surgery (bone- or mucosa-supported) with mental navigation or the use of a pilot-drill template. *J Clin Periodontol* 2014;41:717–723.
- Block M, Emery R, Lank K, Ryan J. Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation. *Int J Oral Maxillofac Implant* 2017;32:92–99.
- Kaewsiri D, Panmekiate S, Subbalekha K, Mattheos N, Pimkhaokham A. The accuracy of static vs. dynamic computer-assisted implant surgery in single tooth space: A randomized controlled trial. *Clin Oral Implan Res* 2019;30:505–514.
- Kiatkroekkrai P, Takolpuckdee C, Subbalekha K, Mattheos N, Pimkhaokham A. Accuracy of implant position when placed using static computer-assisted implant surgical guides manufactured with two different optical scanning techniques: a randomized clinical trial. *Int J Oral Max Surg* 2020;49:377–383.
- Jung RE, Pjetursson BE, Glauser R, Zembic A, Zwahlen M, Lang NP. A systematic review of the 5-year survival and complication rates of implant-supported single crowns. *Clin Oral Implan Res* 2008;19:119–130.
- Herklotz I, Beuer F, Kunz A, Hildebrand D. Navigation in implantology. *Int J Comput Dent* 2017;20:9–19.
- Ansan V, Karabuda CZ, Mumcu E, Özdemir T. Implant Positioning Errors in Freehand and Computer-Aided Placement Methods: A Single-Blind Clinical Comparative Study. *Int J Oral Maxillofac Implant* 2013;28:190–204.
- Fortin T, Champeboux G, Bianchi S, Buatois H, Coudert J. Precision of transfer of preoperative planning for oral implants based on cone-beam CT-scan images through a robotic drilling machine. *Clin Oral Implan Res* 2002;13:651–656.
- Monaco C, Arena A, Corsaletti L, Santomauro V, Venezia P, Cavalcanti R et al. 2D/3D accuracies of implant position after guided surgery using different surgical protocols: A retrospective study. *J Prosthodont Res* 2020;64:424–430.
- Buser D, Martin W, Belser U. C. Optimizing esthetics for implant restorations in the anterior maxilla: anatomic and surgical considerations. *Int J Oral Maxillofac Implant* 2004;19(Suppl):43–61.
- Wu D, Zhou L, Yang J, Zhang B, Lin Y, Chen J et al. Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guide for dental implant placement. *Int J Implant Dent* 2020;6:78.
- Zhou W, Liu Z, Song L, Kuo C, Shafer DM. Clinical Factors Affecting the Accuracy of Guided Implant Surgery—A Systematic Review and Meta-analysis. *J Evid Based Dent Pract* 2018;18:28–40.
- D'haese J, Ackhurst J, Wismeijer D, Bruyn HD, Tahmaseb A. Current state of the art of computer-guided implant surgery. *Periodontol* 2000 2017;73:121–133.
- Loubele M, Bogaerts R, Van Dijck E, Pauwels R, Vanheusden S, Suetens P et al. Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *Eur J Radiol* 2009;71:461–468.
- Jorba-García A, Figueiredo R, Gonzalez-Barnadas A, Camps-Font O, Valmaseda-Castellon E. Accuracy and the role of experience in dynamic computer guided dental implant surgery: An in-vitro study. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 2019;24:e76–e83.
- Qin C, Cao Z, Fan S, Wu Y, Sun Y, Politis C. An oral and maxillofacial navigation system for implant placement with automatic identification of fiducial points. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2019;14:281–289.
- Cheng K, Kan TS, Liu YF, Zhu WD, Zhu FD, Wang WB et al. Accuracy of dental implant surgery with robotic position feedback and registration algorithm: An in-vitro study. *Comput Biol Med* 2021;129:104153.
- Üstek GK, Şimşek HO. Three-dimensional Accuracy of Angled Dental Implant Placement: A Comparison Study of the Dynamic Navigation System and Free-hand Method. *Meandros Medical Dent J* 2021;22:119–128.
- Joda T, Yeung AWK, Hung K, Zitzmann NU, Bornstein MM. Disruptive Innovation in Dentistry: What It Is and What Could Be Next. *J Dent Res* 2021;100:448–453.
- Joda T, Gallucci GO, Wismeijer D, Zitzmann NU. Augmented and virtual reality in dental medicine: A systematic review. *Comput Biol Med* 2019;108:93–100.
- 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.

27. Wei SM, Zhu Y, Wei JX, Zhang CN, Shi JY, Lai HC. Accuracy of dynamic navigation in implant surgery: A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implan Res* 2021;32:383–393.
28. Block MS, Emery RW. Static or Dynamic Navigation for Implant Placement—Choosing the Method of Guidance. *J Oral Maxil Surg* 2016;74:269–277.
29. Koop R, Vercruyssen M, Vermeulen K, Quirynen M. Tolerance within the sleeve inserts of different surgical guides for guided implant surgery. *Clin Oral Implan Res* 2013;24:630–634.
30. Gjelvold B, Mahmood DJH, Wennerberg A. Accuracy of surgical guides from 2 different desktop 3D printers for computed tomography-guided surgery. *J Prosthet Dent* 2019;121:498–503.
31. Henprasert P, Dawson DV, El-Kerdani T, Song X, Couse-Queiruga E, Holloway JA. Comparison of the Accuracy of Implant Position Using Surgical Guides Fabricated by Additive and Subtractive Techniques. *J Prosthodont* 2020;29:534–541.
32. Pieralli S, Spies BC, Hromadnik V, Nicic R, Beuer F, Wesemann C. How Accurate Is Oral Implant Installation Using Surgical Guides Printed from a Degradable and Steam-Sterilized Biopolymer? *J Clin Medicine* 2020;9:2322.
33. Liang Y, Yuan S, Huan J, Zhang Y, Fang C, Li J. In Vitro Experimental Study of the Effect of Adjusting the Guide Sleeve Height and Using a Visual Direction-Indicating Guide on Implantation Accuracy. *J Oral Maxil Surg* 2019;77:2259–2268.
34. Tallarico M, Martinolli M, Kim Y, Cocchi F, Meloni SM, Alushi A et al. Accuracy of Computer-Assisted Template-Based Implant Placement Using Two Different Surgical Templates Designed with or without Metallic Sleeves: A Randomized Controlled Trial. *Dent J* 2019;7:41.
35. Sommacal B, Savic M, Filippi A, Kühl S, Thieringer F. Evaluation of Two 3D Printers for Guided Implant Surgery. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2018;33:743–746.
36. Sharma N, Cao S, Msallem B, Kunz C, Brantner P, Honigmann P et al. Effects of Steam Sterilization on 3D Printed Biocompatible Resin Materials for Surgical Guides—An Accuracy Assessment Study. *J Clin Med* 2020;9:1506.
37. Flügge T, Derksen W, Te Poel J, Hassan B, Nelson K, Wismeijer D. Registration of cone beam computed tomography data and intraoral surface scans – A prerequisite for guided implant surgery with CAD/CAM drilling guides. *Clin Oral Implan Res* 2017;28:1113–1118.
38. Horwitz J, Zuabi O, Machtei EE. Accuracy of a computerized tomography-guided template-assisted implant placement system: an in vitro study. *Clin Oral Implan Res* 2009;20:1156–1162.
39. Pozzi A, Tallarico M, Marchetti M, Scarfò B, Esposito M. Computer-guided versus free-hand placement of immediately loaded dental implants: 1-year post-loading results of a multicentre randomised controlled trial. *Eur J Oral Implantol* 2014;7:229–242.
40. Amorfini L, Migliorati M, Drago S, Silvestrini-Biavati A. Immediately Loaded Implants in Rehabilitation of the Maxilla: A Two-Year Randomized Clinical Trial of Guided Surgery versus Standard Procedure. *Clin Implant Dent R* 2017;19:280–295.
41. Vercruyssen M, Laat AD, Coucke W, Quirynen M. An RCT comparing patient-centred outcome variables of guided surgery (bone or mucosa supported) with conventional implant placement. *J Clin Periodontol* 2014;41:724–732.
42. Arsan V, Karabuda CZ, Özdemir T. Implant surgery using bone- and mucosa-supported stereolithographic guides in totally edentulous jaws: surgical and post-operative outcomes of computer-aided vs. standard techniques. *Clin Oral Implan Res* 2010;21:980–988.
43. Liu Y, Wu J, Zhang J, Peng W, Liao W. Numerical and Experimental Analyses on the Temperature Distribution in the Dental Implant Preparation Area when Using a Surgical Guide. *J Prosthodont* 2018;27:42–51.
44. Younes F, Cosyn J, De Bruyckere T, Cleymaet R, Bouckaert E, Eghbali A. A randomized controlled study on the accuracy of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. *J Clin Periodontol* 2018;45:721–732.
45. Ravidà A, Barootchi S, Tattan M, Saleh MHA, Gargallo-Albiol J, Wang HL. Clinical outcomes and cost effectiveness of computer-guided versus conventional implant-retained hybrid prostheses: A long-term retrospective analysis of treatment protocols. *J Periodontol* 2018;89:1015–1024.
46. Kühl S, Zürcher S, Mahid T, Müller-Gerbl M, Filippi A, Cattin P. Accuracy of full guided vs. half-guided implant surgery. *Clin Oral Implan Res* 2013;24:763–769.
47. Noharet R, Pettersson A, Bourgeois D. Accuracy of implant placement in the posterior maxilla as related to 2 types of surgical guides: A pilot study in the human cadaver. *J Prosthet Dent* 2014;11:526–532.
48. Block MS, Emery RW, Cullum DR, Sheikh A. Implant Placement Is More Accurate Using Dynamic Navigation. *J Oral Maxil Surg* 2017;75:1377–1386.
49. Wang F, Bornstein MM, Hung K, Fan S, Chen X, Huang W et al. Application of Real-Time Surgical Navigation for Zygomatic Implant Insertion in Patients With Severely Atrophic Maxilla. *J Oral Maxil Surg* 2018;7:80–87.
50. Ewers R, Schicho K, Untd G, Wanschitz F, Truppe M, Seemann R et al. Basic research and 12 years of clinical experience in computer-assisted navigation technology: a review. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2005;34:1–8.
51. Elian N, Jalbout ZN, Classi AJ, Wexler A, Sarment D, Tarnow DP. Precision of flapless implant placement using real-time surgical navigation: a case series. *Int J Oral Maxillofac Implant* 2008;23:1123–1127.
52. Kramer F, Baethge C, Swennen G, Rosahl S. Navigated vs. conventional implant insertion for maxillary single tooth replacement. *Clin Oral Implan Res* 2005;16:60–68.
53. Somogyi-Ganss E, Holmes HI, Jokstad A. Accuracy of a novel prototype dynamic computer-assisted surgery system. *Clin Oral Implan Res* 2015;26:882–890.
54. Liao H, Inomata T, Sakuma I, Dohi T. 3-D Augmented Reality for MRI-Guided Surgery Using Integral Videography Autostereoscopic Image Overlay. *Ieee T Bio-med Eng* 2010;57:1476–1486.
55. Engkawong S, Mattheos N, Pisarnaturakit PP, Pimkhaokham A, Subbalekha K. Comparing patient-reported outcomes and experiences among static, dynamic computer-aided, and conventional freehand dental implant placement: A randomized clinical trial. *Clin Implant Dent R* 2021. [Epub ahead of print].
56. Wu Y, Wang F, Fan S, Chow JK-F. Robotics in Dental Implantology. *Oral Maxil Surg Clin* 2019;31:513–518.
57. Mozer P. Accuracy and Deviation Analysis of Static and Robotic Guided Implant Surgery: A Case Study. *Int J Oral Maxillofac Implant* 2020;35:e86–e90.
58. Tranchart H, Ceribelli C, Ferretti S, Dagher I, Patriti A. Traditional versus Robot-Assisted Full Laparoscopic Liver Resection: A Matched-Pair Comparative Study. *World J Surg* 2014;38:2904–2909.
59. Liu M, Curet M. A Review of Training Research and Virtual Reality Simulators for the da Vinci Surgical System. *Teach Learn Med* 2015;27:12–26.

60. Angus AA, Sahi SL, McIntosh BB. Learning curve and early clinical outcomes for a robotic surgery novice performing robotic single site cholecystectomy. *Int J Medical Robotics Comput Assisted Surg* 2014;10:203–207.
61. Bai SZ, Ren N, Feng ZH, Xie R, Dong Y, Li ZW. [Animal experiment on the accuracy of the Autonomous Dental Implant Robotic System]. *Chin J Stomatology* 2021;56:170–174.
62. Holzinger D, Ureel M, Wilken T, Müller AA, Schicho K, Millesi G et al. First-in-man application of a cold ablation robot guided laser osteotome in midface osteotomies. *J Cranio Maxill Surg* 2021;49:531–537.
63. Ureel M, Augello M, Holzinger D, Wilken T, Berg BI, Zeilhofer HF et al. Cold Ablation Robot-Guided Laser Osteotome (CARLO®): From Bench to Bedside. *J Clin Medicine* 2021;10:450.
64. Bornstein MM. Current trends in dentomaxillofacial research – what is just hype, what has potential impact? *Dentomaxillofac Rad* 2021;50:20219004.
65. Benitez BK, Ureel M, Thieringer FM, Kunz C. Informationsschrift Koordinierter Sanitätsdienst (KSD). Informationsschrift über den Koordinierten Sanitätsdienst (KSD) in der Schweiz 2019;37:10–18.
66. Wittneben J, Wismeijer D, Brägger U, Joda T, Abou-Ayash S. Patient-reported outcome measures focusing on aesthetics of implant- and tooth-supported fixed dental prostheses: A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implan Res* 2018;29:224–240.
67. Joda T, Derksen W, Wittneben JG, Kuehl S. Static computer-aided implant surgery (s-CAIS) analysing patient-reported outcome measures (PROMs), economics and surgical complications: A systematic review. *Clin Oral Implan Res* 2018;29:359–373.

Navigated digital implantology

Possibilities and limitations of innovative technologies

KEY WORDS

digital planning, static navigation, surgical guide, dynamic navigation, real-time navigation, navigated implantology, computer-assisted implantology, digital workflow, 3D treatment planning, 3D printing, guided surgery, surgical navigation, robot-assisted surgery

ABSTRACT

In dental implantology, the optimal insertion of implants in the jaw bone is crucial for success from a biologic, functional, and esthetic perspective. In this context, the optimal prosthetic restorations play an essential role as a treatment goal for planning the exact implant placement in terms of prosthetic-surgical backward planning. Innovative diagnostic and planning procedures to increase the safety and predictive accuracy of an implant procedure and support in the digital treatment process are also gaining increasing acceptance in routine cases, from “mental” navigation concepts with computer-based implant planning to the already established static navigation with surgical implant guides 3D printed either externally or in practice, to dynamic, precise real-time navigation systems. The latter systems allow 3D orientation of the drill and implant position based on DVT and CT data and optical tracking during implant placement. Exciting concepts for robot-assisted implant placement are currently in the evaluation and testing phase and provide a glimpse into the (possible) future. The advantages and disadvantages of the described workflows and technologies are listed and discussed. Possibilities and limitations of the different treatment or navigation concepts are explained to gain a comprehensive insight and overview of the current and future opportunities available in digital dental implantology.



Florian M. Thieringer

Florian M. Thieringer

PD Dr. mult., MHBA

Paridokht Zarean

Dr. med. dent. (IR)

Parichehr Zarean

Dr. med. dent. (IR)

Sead Abazi

Dr. med., Dr. med. dent.

Alle:

Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
Universitätsspital Basel
Spitalstraße 21
4031 Basel, Schweiz

und

Medical Additive Manufacturing Research Group
(Swiss MAM)
Department of Biomedical Engineering
Universität Basel
4123 Allschwil, Schweiz

Tim Joda

Prof. Dr. med. dent., M.Sc., PhD, MBA
Klinik für Rekonstruktive Zahnmedizin
Universitäres Zentrum für Zahnmedizin Basel
Mattenstrasse 40
4058 Basel, Schweiz

Korrespondenzadresse:

PD Dr. mult. Florian M. Thieringer, E-Mail: Florian.Thieringer@usb.ch



**IDS
2021**

Wir sind dabei – informieren Sie sich
vom **22. bis 25.09.2021:**

Innovationshalle 2.2 | Stand A 30 + B 31

**MIT SAFEWATER IHRE TRINK-
WASSERHYGIENE ENDLICH
SICHER UND ZUVERLÄSSIG
AUFSTELLEN.**



**SICHERN SIE SICH
IHRE SAMMELTASSE!**

**BLUE
SAFETY**

Die Wasserexperten

**Jetzt profitieren:
Für SAFEWATER 4.2
entscheiden und
einen neuen Apple
iMac 24" geschenkt
bekommen.***



Vereinbaren Sie Ihren **persönlichen,
kostenfreien Beratungstermin
für die Praxis oder Ihren Messebesuch:**

Fon **00800 88 55 22 88**

WhatsApp **0171 991 00 18**

www.bluesafety.com/Sommerangebot

*Neukunden erhalten bei Vertragsschluss: 1x Apple iMac, 256 GB, 8 GB, 24".
Auslieferung könnte sich verzögern. Nähere Bedingungen und finale Spezi-
fikationen finden Sie beim Angebot. Das Angebot endet am 30.09.2021.