

Tobias Nitsche, Marc Menzebach, Jörg Wiltfang

Welche Indikationen bestehen für eine dreidimensionale Röntgendiagnostik und bilddatengestützte navigierte Methoden in der dentalen Implantologie?

Systematischer Review, Konsensus-Statements und -Empfehlungen der 1. DGI-Konsensuskonferenz im September 2010, Aerzen, Deutschland



Tobias Nitsche
Dr. med.

Marc Menzebach
Dr. med. Dr. med. dent.

Jörg Wiltfang
Prof. Dr. med. Dr. med. dent.

Indizes *Dentale Implantate, Navigation, Computertomografie, digitale Volumentomografie (DVT), dreidimensionale Bildgebung*

Ziel: Das Ziel dieser Übersichtsarbeit als Grundlage für die Konsensuskonferenz war die Beantwortung der folgenden Frage: Welche Indikationen bestehen für eine dreidimensionale Röntgendiagnostik und bilddatengestützte navigierte Methoden in der dentalen Implantologie?

Material und Methoden: Es erfolgte eine unabhängige systematische Literaturrecherche unter Einbeziehung von existierenden nationalen und internationalen Leitlinien, Konsensuspapieren wissenschaftlicher Fachgesellschaften und den Literaturdatenbanken Chochrane und MEDLINE bis einschließlich 30. Juni 2010. Nachdem zu diesen Themen nur wenige randomisierte, kontrollierte Studien oder systematische, klinische Untersuchungen gefunden wurden, wurde die Suche um experimentelle Grundlagenarbeiten, Tierversuche und verwandte Themen erweitert. Ergänzende Literatur wurde auf Empfehlung von Experten, die am Konsensusprozess beteiligt waren, hinzugezogen. Im Rahmen der DGI-Konsensuskonferenz erfolgte ein strukturiertes Konsensusverfahren unter Leitung einer unabhängigen Moderatorin der AWMF. Dies führte zu folgenden klinischen Empfehlungen.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen:

- **Teil 1:** Bisher konnte keine randomisierte oder kontrollierte Studie am Menschen die Überlegenheit einer dreidimensionalen Bildgebung hinsichtlich des chirurgischen Erfolgs oder des Auftretens von Komplikationen in der Implantologie bestätigen. Der Operateur sollte sich über die damit verbundene erhöhte Strahlenbelastung, verglichen mit zweidimensionalen Aufnahmen, bewusst sein. Dies gilt besonders für junge Menschen. Möglichkeiten der Eingrenzung des Field of View und damit der Strahlenbelastung sollten genutzt werden. Das ALARA (as low as reasonably achievable)-Prinzip sollte verfolgt werden. Mögliche Indikationen zum Einsatz der dreidimensionalen Verfahren wurden formuliert.
- **Teil 2:** Die Anwendung der navigationsgestützten Implantologie erfordert chirurgische Erfahrung in der nicht-navigationsgestützten Implantologie. Der Operateur sollte zu jedem Zeitpunkt in der Lage sein den Eingriff auf konventionelle Art fortzuführen. Mögliche Indikationen zum Einsatz der navigationsgestützten Verfahren wurden formuliert.

Interessenkonflikt: Siehe Terheyden, Kopp. *Eur J Oral Implantol* 2011;4(Suppl):S67-S72.

Alle:
Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel
Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, plastische Operationen
Arnold-Heller-Str. 3,
Haus 26
24105 Kiel

Kontaktadresse:
Dr. Tobias Nitsche
E-Mail: nitsche@mkg.uni-kiel.de

■ Einleitung

Seit der Einführung der digitalen Volumentomografie (DVT) befindet sich neben der konventionellen Computertomografie (CT) ein weiteres dreidimensionales Verfahren für den zahnärztlichen Bereich in der klinischen Anwendung. Vor einer Implantatinserktion, ist die Beurteilung der knöchernen Strukturen und der benachbarten Zähne notwendig. Hierzu wird üblicherweise stufenweise vorgegangen und zunächst ein zweidimensionales Röntgenverfahren eingesetzt. Folgendes Vorgehen wird vorgeschlagen:

- Basisuntersuchung: mit einer Übersichtsdarstellung durch eine Panoramaschichtaufnahme.
- befundbezogene Untersuchungen: gezielte Abklärung eines durch die klinische oder röntgenologische Basisuntersuchung erkannten Befunds (zum Beispiel DVT).
- weiterführende Untersuchungen: Hierzu sind Überweisungen erforderlich, da es sich um Untersuchungen außerhalb der zahnmedizinischen Fachkunde handelt (zum Beispiel CT, MRT)¹.

Mit geeigneten Computerprogrammen kann anhand von dreidimensional akquirierten Bilddaten präoperativ eine virtuelle Planung der Implantatinserktion durchgeführt werden². Für die intraoperative Umsetzung stehen die direkte Instrumentennavigation oder die durch Bohrschablonen unterstützten Verfahren zur Verfügung^{3,4}. Durch die Nutzung von röntgenopaken Scanschablonen, die einer nach prothetischen Gesichtspunkten optimierten Planung entsprechen, können zusätzlich wichtige Informationen für die Planung der Implantatinserktion gewonnen werden. Diese Schablonen müssen während der dreidimensionalen Bildgebung im Patientenmund eingesetzt werden. In mehreren Studien konnte durch navigationsgestütztes Implantieren eine exaktere Positionierung der Implantate im Vergleich zur „Freihand“-Positionierung festgestellt werden^{5,6}.

In der Implantologie besteht derzeit sowohl für die Indikationsstellung einer dreidimensionalen Bildgebung als auch für die Anwendung von navigationsgestützten Verfahren eine therapeutische Unsicherheit im Hinblick auf den erhöhten Zeitbedarf, die Kosten und die Strahlenbelastung. Bei der Vorbereitung des Übersichtsartikels wurden die PRISMA-Kriterien berücksichtigt⁷.

Der Übersichtsartikel war Grundlage für die 1. DGI-Konsensuskonferenz, bei der Experten von wissenschaftlichen Fachgesellschaften und Körperschaften zusammenkamen, um klinische Empfehlungen und Leitlinien für folgende Fragen zu entwickeln:

1. Welche Indikationen bestehen für eine dreidimensionale Röntgendiagnostik in der Implantologie?
2. Welche Indikationen bestehen für eine bilddatenbasierte computerunterstützte Navigation in der Implantologie?

Die Zielsetzung dieser Übersichtsarbeit war es daher alle relevanten randomisierten, kontrollierten und klinischen Studien am Menschen zu identifizieren und unter Berücksichtigung der derzeit verfügbaren Literatur eine Hilfestellung bei der Indikationsstellung zu geben.

■ Methodik

■ Literaturrecherche

Die Erstellung des Konsensuspapiers „Welche Indikationen bestehen für eine dreidimensionale Röntgendiagnostik und bilddatengestützte navigierte Methoden in der dentalen Implantologie?“ beruht auf der systematischen Sichtung der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur. Dazu wurde eine unabhängige systematische Literaturrecherche bis 30. Juni 2010 durchgeführt und dabei nach bestehenden nationalen und internationalen Leitlinien, Konsensuspapieren wissenschaftlicher Fachgesellschaften sowie in den Literaturdatenbanken Cochrane Library und MEDLINE gesucht. Die Suchstrategie beinhaltete die Suchbegriffe „dental implants“ (MeSH Term) und „indication“ in Kombination mit „cone-beam computed tomography (CBCT)“, „computed tomography“, „three-dimensional“ und „navigation“. Eine Einschränkung erfolgte auf die Sprachen „Deutsch“ und „Englisch“. Da nur wenige Randomised Controlled Trials (RCTs) und andere systematische, klinische Studien zum Thema vorlagen, wurde die Recherche um Ergebnisse der Grundlagenforschung und tierexperimentelle Untersuchungen ergänzt. Bis zum Zeitpunkt der Literaturrecherche gab es keine randomisierten, kontrollierten Studien am Menschen bezüglich evi-

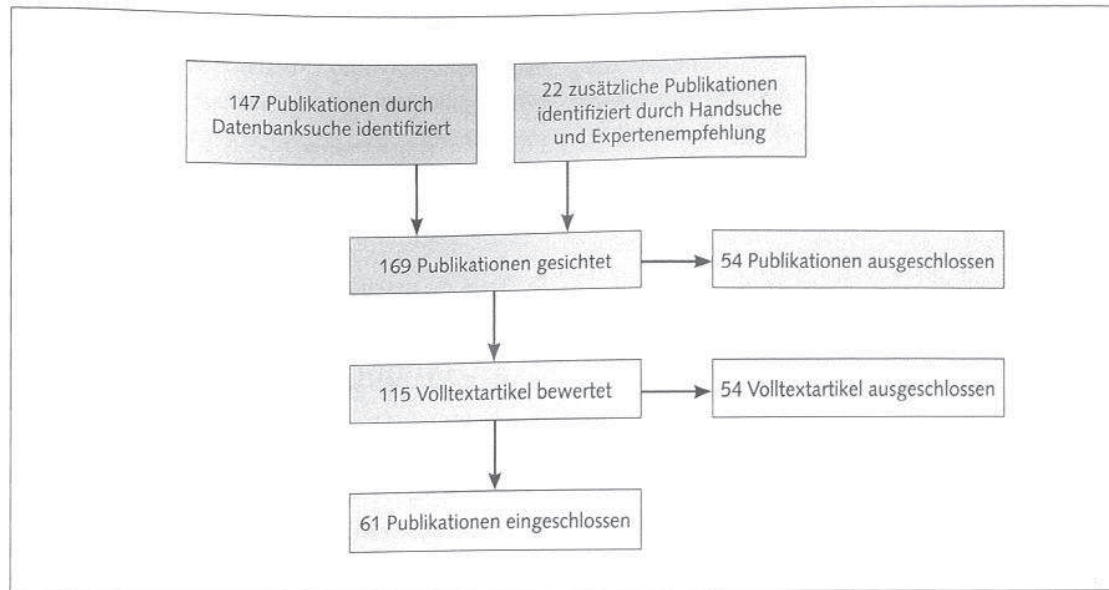


Abb. 1 Flussdiagramm der Literatursuche.

denzbasierter Indikationen für eine dreidimensionale Bildgebung und Navigation. Die Literaturrecherche wurde daher um die verwandten Themen „radiation exposure in three-dimensional imaging“ und „accuracy in navigated procedures“ erweitert. Ergänzende Literatur wurde auf Empfehlung von Experten, die am Konsensusprozess beteiligt waren, hinzugezogen.

Zuerst erfolgte die Sichtung der aufgefunden Literaturstellen anhand der Abstracts durch zwei Reviewer, um die inhaltliche Relevanz der einzelnen Publikationen zu erfassen. Nicht relevante Literaturstellen wurden zu diesem Zeitpunkt identifiziert und ausgeschlossen. Für alle Literaturstellen mit einem inhaltlichen Bezug wurde dann die Publikation als Volltext beschafft (Abb. 1).

■ Studienauswahl

Im folgenden sollen die Parameter für die Beurteilung der Literatur und Ein- beziehungsweise Ausschlusskriterien einer Publikation, nach den sogenannten PICO(S)-Kriterien beschrieben werden.

Population

Die Übersichtsarbeit enthält klinische Studien am Menschen, die mit dentalen Implantaten versorgt wurden. Es wurden keine Einschränkungen bezüglich Geschlecht, Alter, Vorerkrankungen sowie Anzahl oder Region der Implantate gemacht.

Intervention

Die Intervention war die diagnostische dreidimensionale Bildgebung und navigationsunterstützte Verfahren in der dentalen Implantologie. Bei der dreidimensionalen Bildgebung wurden CT und DVT, bei der Navigation alle navigierten oder navigationsunterstützten Verfahren berücksichtigt.

Kontrollen

Die folgenden Kontrollgruppen wären wünschenswert: Eine Gruppe, bei der Implantate nach konventioneller zweidimensionaler Röntgendiagnostik inseriert wurden. Eine Gruppe, bei der Implantate konventionell ohne navigationsunterstützte Verfahren inseriert wurden.

Outcomes

- Die Outcomeparameter wurden folgendermaßen definiert:
- Überlebensraten von Implantaten und Suprastrukturen.
- Technische und klinische Komplikationen bei Implantaten und Suprastrukturen.
- Indikationen für eine dreidimensionale Röntgendiagnostik oder Navigation.

Studiendesign

Einschlusskriterien waren: Randomisierte, kontrollierte klinische Studien oder mindestens ein vergleichendes Studiendesign oder nationale oder internationale Leitlinien oder Konsensuspapiere.

■ Ausschlusskriterien

Die Hauptausschlusskriterien waren: ungültiges Studiendesign.

Die relevante Literatur wurde in einem Literaturverwaltungsprogramm (End Note X3, Thomson Reuters) verwaltet und die Volltextartikel in digitalem Format vorbereitet, um bei der Konsensuskonferenz einen schnellen Zugriff zu haben.

Das vorbereitete Konsensuspapier wurde im Rahmen der 1. Wissenschaftlichen DGI-Konsensuskonferenz in Aersen bei Hameln vom 29. bis 30. September 2010 präsentiert. Auf der Konsensuskonferenz wurde entschieden, dass der Entwurf weit genug fortgeschritten war, um mit einem strukturierten Konsensusprozess (nominaler Gruppenprozess) in der Arbeitsgruppe, die von einer unabhängigen Moderatorin geleitet wurde, zu beginnen und im Rahmen der gesamten Konferenz verabschiedet zu werden.

■ Ergebnisse

■ Literaturrecherche

Die Literatursuche ergab 61 Publikationen zu den oben dargestellten Inhalten (s. Abb. 1). Zum Zeitpunkt der Literaturrecherche gab es keine randomisierten, kontrollierten Studien am Menschen zu den Indikationen der dreidimensionalen Bildgebung oder navigierter Verfahren in der dentalen Implantologie. Insgesamt konnten 5 Konsensuspapiere nationaler und internationaler Fachgesellschaften gefunden werden, die als Basis des auf der Konsensuskonferenz entwickelten Konsensuspapiers dienten⁸⁻¹². Alle diese Konsensuspapiere waren Expertenmeinungen und die dort vorgeschlagenen Indikationen stützten sich nicht auf randomisierte, kontrollierte oder vergleichende Studien.

Aufgrund ihres logischen Charakters und günstigen Ergebnissen hinsichtlich Präzision, postoperativer Schmerzen und vermeidbarer Komplikationen waren die Experten jedoch in der Lage Indikationen bei der Konsensuskonferenz zu formulieren.

■ Teil 1: Indikationen zur implantologischen 3-D-Röntgendiagnostik

■ Vorteile von dreidimensionalen Schnittbildverfahren

Dreidimensionale Aufnahmetechniken sind bei komplexen chirurgischen Eingriffen herkömmlichen zweidimensionalen Verfahren überlegen. Dabei kann eine Darstellung von anatomischen Strukturen durch Schnittebenen in allen Raumrichtungen erfolgen. Durch die räumliche Zuordnung der Befunde ohne Dimensionsverlust, auch in ihrer Lage zu benachbarten Strukturen, wird eine detailgetreue und genaue metrische Analyse überhaupt erst möglich. Das vorhandene Knochenangebot, die Knochenstruktur und der Augmentationsbedarf können dreidimensional exakt beurteilt werden^{13,14}. Ein weiterer Vorteil ist die überlagerungsfreie Darstellung¹⁵. Für in der Implantologie typische lineare Messstrecken wurden hierbei maximale relative Fehler zwischen 3 % und 8 % ermittelt¹⁶.

■ Digitale Volumentomografie

Bei der digitalen Volumentomografie (DVT) handelt es sich um eine digitale Aufnahmetechnik, bei der durch eine einmalige Rotation der Röntgenröhre um den stationären Patienten mit einem kegelförmigen Strahlenbündel eine große Zahl Projektionsaufnahmen erzeugt wird. Aus den Projektionsaufnahmen kann unmittelbar ein Volumendatensatz erzeugt werden, der sich dann als Schnittbilder in allen Raumrichtungen darstellen lässt. Die derzeit kommerziell erhältlichen Geräte unterscheiden sich hinsichtlich des Aufnahmevermögens, der Detektortechnologie, der Patientenposition (sitzend, liegend, stehend), der Aufnahmezeit und der räumlichen Auflösung¹⁷.

Konstruktionsbedingt eignen sich DVT-Geräte nur sehr eingeschränkt zur Weichgewebediagnostik. Sie

erfüllen allerdings alle Anforderungen an die Hartgewebediagnostik im Mund-, Kiefer- und Gesichtsbereich¹⁸. Bei ausreichend großer Abbildungsgröße kann eine DVT alle notwendigen radiologischen Fragestellungen vor einer Implantation beantworten.

■ Computertomografie

Die Computertomografie ist ein schnittbildgebendes Verfahren, bei dem Querschnitte des zu untersuchenden Objekts erzeugt werden. Durch multiplanare Rekonstruktion aus den primären Schichten lassen sich beliebig 2- und 3-dimensionale Bildrekonstruktionen erzeugen¹⁹.

Mit der Computertomografie ist eine Visualisierung von Hart- und Weichgeweben möglich. Aufgrund der heute möglichen raschen Untersuchungszeiten mit Multislice-CT-Systemen ist heute eine Darstellung des Kiefer- und Gesichtsbereichs in Submillimeterauflösung bis zu 0,3 mm innerhalb weniger Sekunden möglich. Die Strahlenbelastung variiert je nach Untersuchungsprotokoll und Gerät.

■ Bildqualität

Die Bildqualität weist bei beiden Gerätegruppen eine hohe Variationsbreite auf. Für die DVT gibt es derzeit keine Standardprotokolle zur Überprüfung der Bildqualität, wie sie für die konventionelle CT existieren. Diese sollten für den klinischen Einsatz der DVT entwickelt werden¹².

Systembedingt zeigt die DVT im Vergleich zur CT ein erhöhtes Hintergrundrauschen bei gleichzeitiger Kontrastverminderung. Dagegen ist die Artefaktbildung im Grenzbereich zu metallischen Strukturen bei der DVT reduziert. Derzeit kann hinsichtlich der Bildqualität keinem der beiden bildgebenden Verfahren der Vorzug gegeben werden. Eine Überlegenheit eines Verfahrens im Rahmen der Implantologie ist noch nicht belegt.

■ Strahlenexposition

Bei der Beurteilung der Strahlenbelastung verschiedener bildgebender Verfahren sollte immer die effektive Dosis in der Einheit Sievert (Sv beziehungsweise μSv) – berechnet nach den aktuellen ICRP-Gewichtungsfaktoren – angegeben werden^{20,21}.

Für die Computertomografie werden in der Literatur effektive Dosen von 180 μSv bis 2100 μSv angegeben^{12,20,22,23}.

Die effektive Dosis aktuell zugelassener DVT-Geräte liegt zwischen 11 μSv und 674 μSv ^{12,20,23}. Zahlreiche weitere Studien belegen, dass bei für implantologische Fragestellungen typischen Scanprotokollen effektive Dosen von 11 μSv bis 96,2 μSv nachzuweisen sind^{22,24–26}. Selbst bei Einstellung eines großen Field of View (FoV) liegen die effektiven Dosen geeigneter Geräte unter 82 μSv ^{20,22}. Wenn eine computergestützte Planung von Implantaten auf der Basis dreidimensionaler Röntgenverfahren erfolgt, sollte daher in der Regel eine DVT durchgeführt werden⁸.

Für digitale Panoramaschichtaufnahmen wurden nach ICRP 2007 in Abhängigkeit des verwendeten Geräts effektive Dosen von 2,7 μSv bis 24,5 μSv gemessen^{12,27}. Die effektiven Dosen für einen Zahnfilmstatus liegen zwischen 34,9 μSv und 388 μSv und für ein seitliches Fernröntgenbild bei 5,6 μSv ²⁷.

Bei jeder Röntgenuntersuchung gilt das ALARA (as low as reasonably achievable)-Prinzip²⁸. Das heißt, dass die Anwendung mit der für die Fragestellung geringst möglichen Strahlendosis bei gleichzeitig suffizienter Abbildungsqualität zu erfolgen hat.

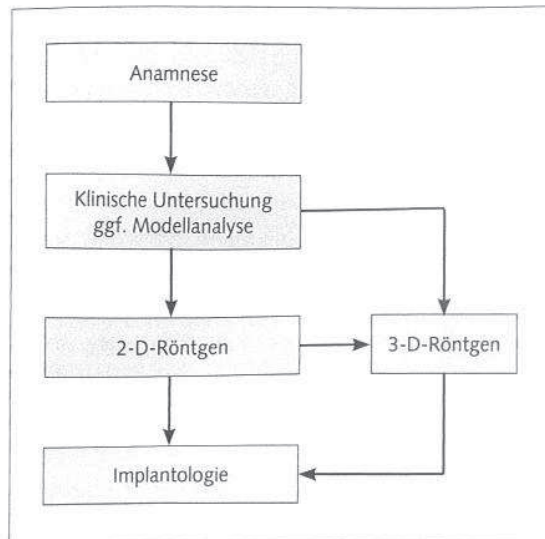
Kinder und Jugendliche weisen ein erheblich höheres Risiko von Folgeschäden nach einer Exposition mit ionisierender Strahlung auf, weswegen bei ihnen eine besonders sorgfältige Nutzen-Risiko Abwägung zu erfolgen hat²⁹.

Für die dreidimensionale Röntgenbildgebung soll das der Indikation entsprechende Verfahren mit der geringsten Strahlenbelastung gewählt werden²⁰. Bei der Wahl eines DVT soll das, entsprechend der Fragestellung, kleinstmögliche Field of View (FoV, Aufnahmevolumen) verwendet werden und eine adäquate Ortsauflösung gewählt werden, die zu einer möglichst geringen Strahlenexposition führen.

■ Rechtliche Grundlagen

Grundsätzlich gilt, dass eine rechtfertigende Indikation für jede Röntgenaufnahme bestehen muss³⁰. Die rechtfertigende Indikation darf nur von Personen gestellt werden, die als Ärzte oder Zahnärzte approbiert und im Besitz der erforderlichen Fachkunde

Abb. 2 Mögliche Wege zum Einsatz bildgebender Verfahren in der Implantologie.



sind. Darüber hinaus muss der die rechtfertigende Indikation stellende Arzt den Patienten vor Ort persönlich untersuchen können. Jede diagnostische Fragestellung ist dabei mit der geringst möglichen Dosis zu bearbeiten. Die Röntgenverordnung gibt vor, dass die „medizinische Strahlenexposition [...] einen hinreichenden Nutzen erbringen muss, wobei ihr Gesamtpotenzial an diagnostischem [...] Nutzen [...] abzuwägen ist gegenüber der von der Strahlenexposition möglicherweise verursachten Schädigung des Einzelnen“³⁰. Unabhängig von Dosisaspekten muss jedoch unter primärer Berücksichtigung des Nutzens für den Patienten in Diagnostik, Therapieplanung und Therapiekontrolle das geeignete Verfahren für eine angemessene diagnostische Bewertung gewählt werden.

■ Klinische Empfehlungen der Konsensuskonferenz

Vor jeder Implantatinserterion ist eine ausreichende radiologische Diagnostik des Implantatbetts erforderlich. Diese sollte eine qualitative und quantitative Beurteilung des Knochenangebots ermöglichen sowie die angrenzenden anatomischen Strukturen darstellen^{1,14}.

Eine Indikation für dreidimensionale bildgebende Verfahren kann bereits primär nach Anamnese und klinischer Untersuchung, bei einer deutlichen anatomischen Abweichung von der Norm bestehen.

Weitere Indikationen können nach orientierender zweidimensionaler Diagnostik bestehen, wenn eine detaillierte räumliche Beurteilung der anatomischen Strukturen und der pathologischen Veränderungen im Zahn-, Mund- und Kieferbereich notwendig ist (Abb. 2). Lassen sich die erforderlichen Informationen für Diagnostik, Therapieentscheidung sowie in speziellen Fällen für Verlaufskontrollen aus der klassischen zweidimensionalen Bildgebung nicht gewinnen, kann ebenfalls eine dreidimensionale Diagnostik erforderlich sein. Die dreidimensionale Bildgebung bietet Vorteile bei der Vermeidung von Verletzungen wichtiger anatomischer Strukturen¹⁰.

Unter einer evidenzbasierten Bewertung bleibt der klinische Nutzen, der durch die dreidimensionale Bildgebung erhaltenen Mehrinformation, auf das implantologische Behandlungsergebnis jedoch ungeklärt. Zum Zeitpunkt der Konsensuskonferenz existierten keine randomisierten oder kontrollierten Studien am Menschen, die den Nutzen einer dreidimensionalen Diagnostik hinsichtlich der Qualität des Operationsergebnisses und/oder der Häufigkeit von Komplikationen belegen.

In Tabelle 1 sind die im Rahmen der Konsensuskonferenz erarbeiteten möglichen Indikationen für eine implantologische 3-D-Röntgendiagnostik dargestellt.

■ Indikationseinschränkungen

Relative Kontraindikationen für eine dreidimensionale Röntgendiagnostik können durch eine Schwangerschaft bestehen.

Der Operateur sollte sich über die damit verbundene erhöhte Strahlenbelastung, verglichen mit zweidimensionalen Aufnahmen, bewusst sein. Dies gilt insbesondere für junge Menschen. Möglichkeiten der Eingrenzung des Field of View und damit der Strahlenbelastung sollten genutzt werden. Das ALARA(as low as reasonably achievable)-Prinzip sollte verfolgt werden.

Technische Limitationen können ebenfalls zu einer Indikationseinschränkung führen. So ist zum Beispiel eine Diagnostik der unmittelbaren periimplantären Umgebung aufgrund von Artefakten im DVT und der CT nur eingeschränkt möglich^{31,32}.

Tab. 1 Mögliche Indikationen für eine implantologische dreidimensionale Röntgendiagnostik.

Mögliche Indikationen für eine implantologische 3-D-Röntgendiagnostik	Beispiele
Deutliche anatomische Abweichungen in der sagittalen und/oder transversalen und/oder vertikalen Ebene in Form und/oder Kieferrelation	Reduziertes transversales Knochenangebot, untersichgehende Alveolarfortsatzbereiche, extreme Atrophie im Unterkieferseitenzahnbereich, Kieferhöhlesepten
Bei zweifelhaftem Erfolg nach Augmentation	
Unsichere Darstellung anatomisch wichtiger Nachbarstrukturen in der 2-D-Diagnostik, wenn mit der 3-D-Diagnostik eine Klärung zu erwarten ist	Keine klare Abgrenzung des Mandibularkanals oder der Nachbarzähne
In konventioneller Diagnostik aufgefallene pathologische Veränderungen mit weitergehendem Klärungsbedarf	Vor allem Zysten, Neoplasien, odontogene Prozesse, Osteopathien
Vorerkrankungen oder Voroperationen der Kieferhöhle mit möglichem Einfluss auf die Implantatversorgung im Oberkieferseitenzahnbereich	Sinusitiden
Spezielle chirurgische und/oder prothetische Therapiekonzepte	Sofortversorgung, navigationsgestützte Implantologie, komplexe interdisziplinäre Therapiekonzepte
Vor allem Komplikation nach Implantation oder Augmentation	Nervverletzung, Nachbarzahnwurzelverletzung

■ Teil 2: Indikationen für navigationsunterstützte Verfahren in der Implantologie

Dreidimensionale Bilddaten können für eine computerunterstützte Implantatplanung genutzt werden. Diese hilft dem Behandler unter Berücksichtigung der prothetischen Planung und der anatomischen Gegebenheiten eine optimale Implantatposition zu finden³³. Auf der Basis dreidimensionaler Bilddaten können Implantate (Typ, Durchmesser, Länge), Augmentationen und Zahnersatzrestaurationen softwarebasiert simuliert, beurteilt und gegebenenfalls präfabriziert werden. Die Bilddaten können für diagnostische Fragestellungen genutzt werden. Zusätzlich können diese zur Herstellung einer exakten, prothetisch orientierten Bohrschablone für die Implantation unter bestmöglicher Ausnutzung des Knochenangebots verwendet werden. Zudem können Defizite im vorhandenen Gewebeangebot detektiert und die Notwendigkeit von Augmentationen, Distractionen und implantatbettvorbereitenden Maßnahmen vorausschauend erkannt und entsprechende Maßnahmen geplant werden. Weiterhin ist eine Bewertung alternativer Therapieoptionen möglich.

■ Virtuelle Planung

Die virtuelle Planung der Implantatinserterion wird auf der Basis der präoperativ akquirierten 3-D-Bilddaten durchgeführt. Aus diesen Bilddaten werden die benötigten Ansichten für die Planung errechnet. Neben der Panoramaansicht werden aus den Bilddaten Querschnitte des Alveolarkamms sowie ein virtuelles oder reelles dreidimensionales Modell der Zahnhartsubstanzen und der knöchernen Strukturen dargestellt. Für die virtuelle Planung stehen Implantatdatenbanken zur Verfügung, die Implantate verschiedener Hersteller enthalten. Nach Auswahl von Hersteller, Typ, Durchmesser und Implantatlänge können die Implantate virtuell am Computer inseriert werden. Durch Entwicklung neuer Software-Tools mit optimierten Ansichten des Implantatlaggers konnte die virtuelle Planung von Implantaten erleichtert und der Zeitaufwand reduziert werden³⁴.

Die Planungsdaten können gespeichert und exportiert werden. Anhand dieser Planungsdaten können durch verschiedene Techniken Bohrschablonen hergestellt werden, in denen alle Informationen der virtuellen Planung codiert sind (statische Navigation). Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung der Planungsdaten für die direkte Instrumentennavigation (dynamische Navigation). Bei der Anwendung dieser Techniken muss sich der Behandler über die Genauigkeit des verwendeten Planungs- und Übertragungsverfahrens vergewissern³⁵.

■ Dynamische Navigation

Die Grundlage für die dynamische Navigation ist ein dreidimensionaler Bilddatensatz der Körperregion, in der operiert werden soll. Im Rahmen der dentalen Implantologie sollte der Patient während der Bilddatenerhebung eine starre, dental getragene Schiene tragen, die mit Referenzmarkern versehen ist.

Intraoperativ können anhand der Referenzmarker und markierter Operationsinstrumente Instrumentenbewegungen in Echtzeit auf einem Monitor verfolgt werden. Dieses Verfahren ist mittlerweile etabliert und wird von vielen verschiedenen operativen Fachdisziplinen angewandt³⁶. Vergleichende Untersuchungen liegen bisher überwiegend *in vitro* vor. Übereinstimmend konnte dabei eine hohe Präzision festgestellt werden^{37–39}.

Die Anwendung von dynamischen Navigationssystemen geht mit mehreren Datentransformationen einher, die jedes Mal mit sich addierenden Fehlern verbunden sein können. Der Operateur sollte sich dessen bewusst sein⁴⁰.

■ Statische Navigation

Bei der statischen Navigation wird ein dreidimensionaler Bilddatensatz benötigt und mit einer virtuellen Planungssoftware die Implantatposition und -ausrichtung festgelegt. Auf der Basis der dreidimensionalen Planung werden durch verschiedene Techniken, zum Beispiel der Stereolithografie oder durch computergesteuerte Fräsen, Bohrschablonen hergestellt^{4,41,42}.

Die Bohrschablonen werden intraoperativ auf der Restbezahnung, provisorischen Implantaten, der Schleimhaut oder dem Alveolarknochen mit unterschiedlicher Präzision getragen. Schablonen, die auf der Restbezahnung oder beispielweise auf provisorischen Implantaten abgestützt sind, ermöglichen eine exaktere Übertragung als schleimhaut- oder knochengetragene Schablonen⁴³. Die sichere reproduzierbare Positionierung der Röntgen- und Führungsschablone ist dabei eine Grundvoraussetzung.

Die Implantatbettauflage sowie die Implantatinserterion erfolgt durch die computergestützt hergestellte Bohrschablone, in der Posi-

tion, Angulation und Tiefe codiert sind. *In vitro* konnte dabei eine Abweichung von weniger als 0,5 mm von der geplanten Implantatposition festgestellt werden⁴⁴.

Bei der transgingivalen, schablonengestützten Implantatinserterion konnte eine Reduktion postoperativer Schmerzen und ein reduzierter Analgetikaverbrauch festgestellt werden^{43,45,46}.

■ Präzision

Bisherige Untersuchungen beziehen sich überwiegend auf *in vitro* Modelle, die übereinstimmend auf eine hohe Präzision schließen lassen⁴⁷.

Für schablonengestützte Verfahren sind in experimentellen Studien Abweichungen der Implantatspitze von bis zu 2,5 mm und Abweichungen der Implantatachse von bis zu 7,9 Grad bekannt⁴⁸.

Verfahren der direkten Instrumentennavigation werden mit bis zu 1,5 mm Abweichung an der Implantatspitze und 4,2 Grad an der Implantatachse angegeben^{35,49–53}.

In vivo Untersuchungen sind hierzu nur wenige vorhanden. Bisherige Analysen, basierend auf einer geringen Fallzahl, geben maximale Abweichungen von bis zu 4,7 mm linear und 9,8 Grad in Achsrichtung an^{54,55}.

In vergleichenden Untersuchungen navigierter Verfahren mit der Freihandmethode konnte eine signifikant höhere Präzision der navigierten Verfahren festgestellt werden^{6,56,57}. Die Präzision beider Navigationsverfahren (statisch und dynamisch) unterscheidet sich nicht signifikant⁴⁸.

Auch bei Patienten nach ablativer Tumorchirurgie und schwierigen anatomischen Bedingungen konnten gute Resultate mit einer Abweichung von bis zu 3,5 mm und einer Winkelabweichung von bis zu 6,4 Grad erzielt werden⁵⁸.

Ungenauigkeiten und Abweichungen können darüber hinaus bei jedem diagnostischen und therapeutischen Behandlungsschritt entstehen, sodass in Summation große Abweichungen von der geplanten Position des Implantats mit der Gefahr der Verletzung anatomischer Nachbarstrukturen möglich sind.

Tab. 2 Mögliche Indikationen für eine navigationsunterstützte Implantatinserterion.

Mögliche Indikationen für eine navigationsunterstützte Implantatinserterion	Beispiele
Unterstützung von minimal invasiven Techniken der Implantatinserterion vor allem bei Patienten mit besonderen Risiken	Erhöhte Blutungsneigung, Immunkompromitierung, Vermeidung von Augmentationen
Zustand nach komplexer Kieferrekonstruktion	Patienten nach ablativer Tumorchirurgie
Unterstützung der Umsetzung einer schwierigen prothetischen Zielsetzung	Patienten nach ablativer Tumorchirurgie, Zygoma-implantate ⁶¹
Besondere Konzepte	Sofortversorgung mit präfabriziertem Zahnersatz, Vermeidung von Augmentationen

■ Klinische Empfehlungen der Konsensuskonferenz

Die Anwendung der navigationsgestützten Implantologie ist an Erfahrungen im Bereich der nicht navigationsgestützten Implantologie gebunden. Der Operateur sollte im Rahmen der Operation zu jeder Zeit in der Lage sein, die Implantatinserterion konventionell durchzuführen. Die navigationsgestützte Implantologie schließt einen klassischen offenen Zugang durch eine Lappenpräparation nicht aus.

Mögliche Indikationen einer navigationsgestützten Implantatinserterion in Verbindung mit minimal invasiven chirurgischen Verfahren ohne Lappenpräparation können bei Patienten mit einer erhöhten Blutungsneigung (angeboren oder erworben) sowie lokalen oder systemischen Gesundheitseinschränkungen aufgrund der geringeren Invasivität von transgingivalen, schablonengestützten Verfahren bestehen⁵⁹.

Weiterhin kann bei Patienten nach komplexer Kieferrekonstruktion, zum Beispiel mit mikrochirurgischen Transplantaten, nach ablativer Tumorchirurgie oder posttraumatisch eine Indikation bestehen.

Darüber hinaus ist durch den Einsatz von computerunterstützten navigierten Verfahren eine verbesserte Präfabrizierung von Abutments und prothetischem Zahnersatz möglich⁶⁰. Besondere Konzepte (zum Beispiel Zygomaimplantate) stellen eine weitere mögliche Indikation dar⁶¹. In Tabelle 2 sind die im Rahmen der Konsensuskonferenz erarbeiteten möglichen Indikationen für eine navigationsunterstützte Implantatinserterion dargestellt.

■ Indikationseinschränkung

Da eine dreidimensionale Röntgendiagnostik Voraussetzung für die computergestützte Navigation

ist, gelten dieselben Einschränkungen wie in Teil 1 (s. S.56). Relative Kontraindikationen für eine navigationsunterstützte Implantatinserterion können bei nicht ausreichender Mundöffnung bestehen.

■ Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Ina Kopp für die Moderation der Konsensuskonferenz sowie bei den Mitgliedern der Arbeitsgruppe. Für die graphische Unterstützung danken wir Andreas Reinhardt und für die Literaturrecherche Judith Schmid und Matthias Neuschl.

■ Literatur

- Hassfeld S, Rother U. Röntgendiagnostik in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. Diagnose, Röntgenbefund, abgestuftes röntgendiagnostisches Untersuchungsspektrum, Schnittbilddiagnostik. MKG-Chirurg 2008;1:137–147.
- Verstreken K, Van Cleynenbreugel J, Marchal G, Naert I, Suetens P, van Steenberghe D. Computer-assisted planning of oral implant surgery: a three-dimensional approach. Int J Oral Maxillofac Implants 1996;11:806–810.
- Schermeier O, Lueth T, Glagau J, Szymanski D, Tita R, Hildebrand D, Klein M, Nelson K, Bier J. Automatic patient registration in computer assisted maxillofacial surgery. Stud Health Technol Inform 2002;85:461–467.
- Voitik AJ. CT data and its CAD and CAM utility in implant planning: part I. J Oral Implantol 2002;28:302–303.
- Widmann G, Bale RJ. Accuracy in computer-aided implant surgery – a review. Int J Oral Maxillofac Implants 2006;21:305–313.
- Hoffmann J, Westendorff C, Gomez-Roman G, Reinert S. Accuracy of navigation-guided socket drilling before implant installation compared to the conventional free-hand method in a synthetic edentulous lower jaw model. Clin Oral Implants Res 2005;16:609–614.
- Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. BMJ 2009;339:b2535.

8. Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund-, Kieferheilkunde (DGZMK). Leitlinie: Dentale Volumentomographie. 2009, http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/083-005_S1_Dentale_Volumentomographie_04-2009_12-2012.pdf.
9. Deutsche Gesellschaft für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. Konsensuspapier Indikationen zur Schnittbilddiagnostik in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie (CT/DVT). MKG-Chirurg 2008;1:148–151.
10. Bundesverband der implantologisch tätigen Zahnärzte in Europa/European Association of Dental Implantologists (BDIZ EDI). Leitfaden Dreidimensionale Bildgebung in der Implantologie. 2009, <http://www.bdiz.de/service/oav10/Grafik/jh09042927-1.pdf>.
11. Harris D, Buser D, Dula K, Grondahl K, Haris D, Jacobs R, Lekholm U, Nakielnny R, van Steenberghe D, van der Stelt P, European Association for Osseointegration. E.A.O. 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. SEDENTEXCT project. RADIATION PROTECTION: CONE BEAM CT FOR DENTAL AND MAXILLOFACIAL RADIOLOGY. Provisional guidelines (v1.1 May 2009). 2009; www.sedentext.eu.
13. Mengel R, Kruse B, Flores-de-Jacoby L. Digital volume tomography in the diagnosis of peri-implant defects: an in vitro study on native pig mandibles. J Periodontol 2006;77:1234–1241.
14. Tyndall DA, Rathore S. Cone-beam CT diagnostic applications: caries, periodontal bone assessment, and endodontic applications. Dent Clin North Am 2008;52:825–841, vii.
15. Mischkowski RA, Pulsfort R, Ritter L, Neugebauer J, Brochhausen HG, Kerve E, Zoller JE. Geometric accuracy of a newly developed cone-beam device for maxillofacial imaging. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2007;104:551–559.
16. Suomalainen A, Vehmas T, Kortessniemi M, Robinson S, Peltola J. Accuracy of linear measurements using dental cone beam and conventional multislice computed tomography. Dentomaxillofac Radiol 2008;37:10–17.
17. Howerton WB, Jr., Mora MA. Advancements in digital imaging: what is new and on the horizon? J Am Dent Assoc 2008;139(Suppl):205–245.
18. Ziegler CM, Woertche R, Brief J, Hassfeld S. Clinical indications for digital volume tomography in oral and maxillofacial surgery. Dentomaxillofac Radiol 2002;31:126–130.
19. Weinberg LA. CT scan as a radiologic data base for optimum implant orientation. J Prosthet Dent 1993;69:381–385.
20. Ludlow JB, Ivanovic M. Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2008;106:106–114.
21. Valentin J. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 103. Ann ICRP 2007;1–332.
22. Loubele M, Bogaerts R, Van Dijk E, Pauwels R, Vanheusden S, Suetens P, Marchal G, Sanderink G, Jacobs R. Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. Eur J Radiol 2009;71:461–468.
23. Suomalainen A, Kiljunen T, Kaser Y, Peltola J, Kortessniemi M. Dosimetry and image quality of four dental cone beam computed tomography scanners compared with multislice computed tomography scanners. Dentomaxillofac Radiol 2009;38:367–378.
24. Lofthag-Hansen S, Thilander-Klang A, Ekestubbe A, Helmrot E, Grondahl K. Calculating effective dose on a cone beam computed tomography device: 3D Accuitomo and 3D Accuitomo FPD. Dentomaxillofac Radiol 2008;37:72–79.
25. Hirsch E, Wolf U, Heinicke F, Silva MA. Dosimetry of the cone beam computed tomography Veraviewepocs 3D compared with the 3D Accuitomo in different fields of view. Dentomaxillofac Radiol 2008;37:268–273.
26. Roberts JA, Drage NA, Davies J, Thomas DW. Effective dose from cone beam CT examinations in dentistry. Br J Radiol 2009;82:35–40.
27. Ludlow JB, Davies-Ludlow LE, White SC. Patient risk related to common dental radiographic examinations: the impact of 2007 International Commission on Radiological Protection recommendations regarding dose calculation. J Am Dent Assoc 2008;139:1237–1243.
28. Farman AG. ALARA still applies. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2005;100:395–397.
29. Horner K, Rushton V, Tsiklakis K, Hirschmann PN, van der Stelt PF, Glenney AM, Velders XL, Pavitt S. European guidelines on radiation protection in dental radiology; the safe use of radiographs in dental practice. European Commission, Directorate-General for Energy and Transport: Radiation Protection; 2004.
30. Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung – RöV) vom 30.04.2003. http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/r_v_1987/gesamt.pdf.
31. Draenert FG, Coppenrath E, Herzog P, Müller S, Müller-Lisse UG. Beam hardening artefacts occur in dental implant scans with the NewTom cone beam CT but not with the dental 4-row multidetector CT. Dentomaxillofac Radiol 2007;36:198–203.
32. Schulze RK, Berndt D, d'Hoedt B. On cone-beam computed tomography artifacts induced by titanium implants. Clin Oral Implants Res 2010;21:100–107.
33. Neugebauer J, Ritter L, Mischkowski R, Zoller JE. Three-dimensional diagnostics, planning and implementation in implantology. Int J Comput Dent 2006;9:307–319.
34. Chiarelli T, Lamma E, Sansoni T. A fully 3D work context for oral implant planning and simulation. Int J Comput Assist Radiol Surg 2010;5:57–67.
35. Van Assche N, van Steenberghe D, Guerrero ME, Hirsch E, Schutyser F, Quirynen M, Jacobs R. Accuracy of implant placement based on pre-surgical planning of three-dimensional cone-beam images: a pilot study. J Clin Periodontol 2007;34:816–821.
36. Siessegger M, Mischkowski RA, Schneider BT, Krug B, Klesper B, Zoller JE. Image guided surgical navigation for removal of foreign bodies in the head and neck. J Craniomaxillofac Surg 2001;29:321–325.
37. Zheng G, Gu L, Wu Z, Huang Y, Kang L. The implementation of an integrated computer-aided system for dental implantology. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2008;2008:58–61.
38. Kramer FJ, Baethge C, Swennen G, Rosahl S. Navigated vs. conventional implant insertion for maxillary single tooth replacement. Clin Oral Implants Res 2005;16:60–68.
39. Gaggl A, Schultes G, Karcher H. Navigational precision of drilling tools preventing damage to the mandibular canal. J Craniomaxillofac Surg 2001;29:271–275.
40. Widmann G, Stoffner R, Bale R. Errors and error management in image-guided craniomaxillofacial surgery. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2009;107:701–715.
41. Fortin T, Champlébois G, Bianchi S, Buatois H, Coudert JL. Precision of transfer of preoperative planning for oral implants based on cone-beam CT-scan images through a robotic drilling machine. Clin Oral Implants Res 2002;13:651–656.
42. Patel N. Integrating three-dimensional digital technologies for comprehensive implant dentistry. J Am Dent Assoc 2010;141(Suppl 2):205–245.
43. Neugebauer J, Stachulla G, Ritter L, Dreiseidler T, Mischkowski RA, Kerve E, Zoller JE. Computer-aided manufacturing technologies for guided implant placement. Expert Rev Med Devices 2010;7:113–129.

44. Dreiseidler T, Mischkowski RA, Neugebauer J, Ritter L, Zoller JE. Comparison of cone-beam imaging with orthopantomography and computerized tomography for assessment in presurgical implant dentistry. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2009;24:216–225.
45. Fortin T, Bosson JL, Isidori M, Blanchet E. Effect of flapless surgery on pain experienced in implant placement using an image-guided system. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2006;21:298–304.
46. Nkenke E, Eitner S, Radespiel-Troger M, Vairaktaris E, Neukam FW, Fenner M. Patient-centred outcomes comparing transmaxillary implant placement with an open approach in the maxilla: a prospective, non-randomized pilot study. *Clin Oral Implants Res* 2007;18:197–203.
47. Horwitz J, Zuabi O, Machtei EE. Accuracy of a computerized tomography-guided template-assisted implant placement system: an in vitro study. *Clin Oral Implants Res* 2009;20:1156–1162.
48. Ruppini J, Popovic A, Strauss M, Spuntrup E, Steiner A, Stoll C. Evaluation of the accuracy of three different computer-aided surgery systems in dental implantology: optical tracking vs. stereolithographic splint systems. *Clin Oral Implants Res* 2008;19:709–716.
49. Hoffmann J, Westendorff C, Schneider M, Reinert S. Accuracy assessment of image-guided implant surgery: an experimental study. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2005;20:382–386.
50. 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 Implants* 2008;23:1123–1127.
51. Casap N, Wexler A, Eliashar R. Computerized navigation for surgery of the lower jaw: comparison of 2 navigation systems. *J Oral Maxillofac Surg* 2008;66:1467–1475.
52. Ozan O, Turkyilmaz I, Ersoy AE, McGlumphy EA, Rosentiel SF. Clinical accuracy of 3 different types of computerized tomography-derived stereolithographic surgical guides in implant placement. *J Oral Maxillofac Surg* 2009;67:394–401.
53. Brief J, Edinger D, Hassfeld S, Eggers G. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res* 2005;16:495–501.
54. Di Giacomo GA, Cury PR, de Araujo NS, Sendyk WR, Sendyk CL. Clinical application of stereolithographic surgical guides for implant placement: preliminary results. *J Periodontol* 2005;76:503–507.
55. Nickenig HJ, Wichmann M, Hamel J, Schlegel KA, Eitner S. Evaluation of the difference in accuracy between implant placement by virtual planning data and surgical guide templates versus the conventional free-hand method – a combined in vivo - in vitro technique using cone-beam CT (Part II). *J Craniomaxillofac Surg* 2010;38:488–493.
56. Sarment DP, Sukovic P, Clinthorne N. Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003;18:571–577.
57. Nickenig HJ, Eitner S. An alternative method to match planned and achieved positions of implants, after virtual planning using cone-beam CT data and surgical guide templates – a method reducing patient radiation exposure (part I). *J Craniomaxillofac Surg* 2010;38:436–440.
58. Wagner A, Wanschitz F, Birkfellner W, et al. Computer-aided placement of endosseous oral implants in patients after ablative tumour surgery: assessment of accuracy. *Clin Oral Implants Res* 2003;14:340–348.
59. Nickenig HJ, Wichmann M, Schlegel KA, Nkenke E, Eitner S. Radiographic evaluation of marginal bone levels during healing period, adjacent to parallel-screw cylinder implants inserted in the posterior zone of the jaws, placed with flapless surgery. *Clin Oral Implants Res* 2010;21: 1386–1393.
60. Meyer U, Wiesmann HP, Runte C, Fillies T, Meier N, Lueth T, Joos U. Evaluation of accuracy of insertion of dental implants and prosthetic treatment by computer-aided navigation in minipigs. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2003;41:102–108.
61. Watzinger F, Birkfellner W, Wanschitz F, Ziya F, Wagner A, Kremser J, Kainberger F, Huber K, Bergmann H, Ewers R. Placement of endosteal implants in the zygoma after maxillectomy: a Cadaver study using surgical navigation. *Plast Reconstr Surg* 2001;107:659–667.