

Implantatpositionierung mit dem Navigationssystem RoboDent in der Oberkieferprämolarenregion

Eine retrospektive Analyse

Ralf Luckey, Dr. med. dent. Dr. h. c., M.Sc. Implantologie

DIG – Diagnostikzentrum für Implantologie und Gesichtsästhetik

Richard-Wagner-Straße 28, 30177 Hannover, E-Mail: drlucki@t-online.de

Indizes

Implantatposition, Implantatachse, Navigationssystem, Bohrschablone

Zusammenfassung

In ungewöhnlich häufiger Anzahl fällt eine zu weit nach mesial angelegte Implantatachse in der ersten Prämolarenregion des Oberkiefers in Relation zur Eckzahnwurzel auf. Diese Fehlplatzierung, die mitunter die Eckzahnwurzelspitze gefährdet, basiert auf einer Täuschung durch eine orthograde geneigte Kronenachse des Eckzahnes, während die Wurzelachse nach distal zeigt. Dreidimensionale Diagnostik hat zu einer deutlichen Verbesserung der Planungsmöglichkeiten in der Implantologie geführt. Die genaue Kenntnis der anatomischen Situation der Oberkieferprämolarenregion erlaubt es, das vorhandene Knochenangebot ideal auszunutzen, die Notwendigkeit einer Augmentation vorher zu erkennen und anatomische Strukturen wie die Eckzahnwurzel sicherer zu schonen. Aufgrund der metrischen Genauigkeit der bildgebenden Verfahren kann die ideale Implantatposition unter Berücksichtigung individueller, anatomischer und prothetischer Erfordernisse virtuell zehntelmillimetergenau festgelegt werden. Zur intraoperativen Umsetzung von Planungen stehen neben Bohrschablonen und Navigationsverfahren auch computerunterstützt angefertigte Bohrschablonensysteme zur Verfügung. Intraoperativer Befund und postoperative Röntgenkontrolle zeigten bei der navigierten Implantation in 96,7 % der Fälle eine Übereinstimmung mit der geplanten Situation. Durch die Navigation wird eine bisher nicht erreichte Präzision in der Oberkieferprämolarenregion erzielt. Das navigierte Bohren mit RoboDent macht es möglich, die Achsenstellung in der Oberkieferprämolarenregion optimal auszurichten, die Eckzahnwurzel unter Erhaltung einer ausreichenden Gewebebrücke zu schonen und damit in Bezug auf die spätere prothetische Versorgung eine optimale Ästhetik und Funktion des implantatgetragenen Zahnersatzes sicherzustellen.

Einleitung

Die Eckzähne im Oberkiefer weisen von labial betrachtet eine gerade Kronen-Wurzel-Achse auf. Im Seitenzahnbereich differiert diese Achse aber um 20° (Abb. 1). Die Region der Eckzähne und der benachbarten ersten Prämolaren zeigt von mesial nach distal zunächst noch erhebliche Inklinationen des zahntragenden Kieferkammes, die in eine vertikale Ausrichtung nach distal wechseln¹. Die Eckzähne sind in

axialer Richtung betrachtet gegenüber dem zahntragenden Kieferkammverlauf rotiert, so dass die labiale Fläche eher nach lateral zeigt. Diese Kombination an Faktoren bedingt eine distale Lokalisation der Eckzahnwurzel in Relation zur Kronenachse². In streng lateraler orthograde Sicht zeigen sich die natürlichen Zahnachsen der Eckzähne und der ersten Prämolaren in paralleler, schräg nach distal geneigter Anordnung (Abb. 2).

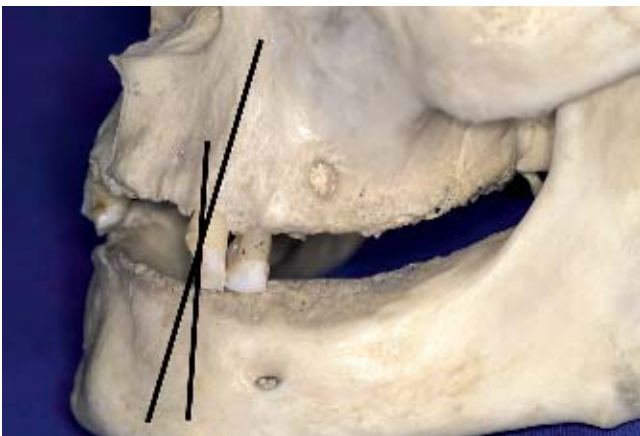


Abb. 1 Anatomisches Schädelmodell mit eingezeichneter Kronen- und Wurzelachse des Eckzahnes im Oberkiefer in Relation zur Alveole des ersten Prämolaren

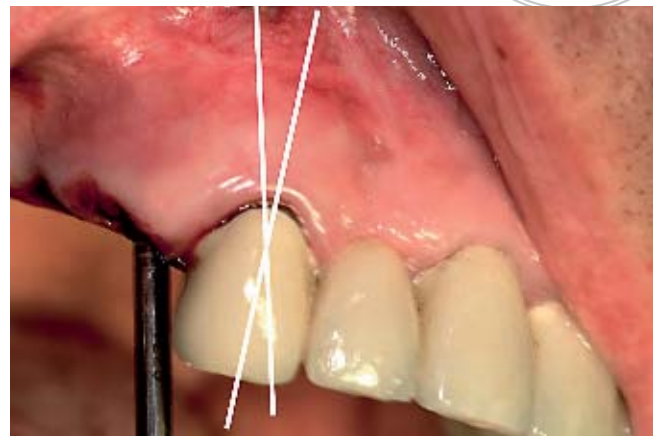


Abb. 2 Messlehre in klinischer Relation zum endständigen Eckzahn. Wurzel- und Kronenachsen sind markiert

Dentale Implantate werden zur Verankerung von Zahnprothesen oder von Einzelzähnen in Form von künstlichen Zahnwurzeln im Unter- oder Oberkiefer eines Patienten verwendet. Hierzu werden die in der Regel zylinderförmigen, konischen oder wurzelförmigen Implantate in entsprechende Implantatbettbohrungen komplementärer Geometrie inseriert. Die Implantatbettbohrungen müssen zuvor unter Lokalanästhesie in den betreffenden Kiefer eingebracht und ggf. für einen Gewindesitz des Implantates mit einem zum Implantat korrespondierenden Innengewinde versehen werden. Die korrekte Führung der Implantatbettbohrung innerhalb des Patientenkiefers ist von größter Bedeutung und verlangt insbesondere eine exakte Kenntnis der Kieferanatomie sowie die Beachtung der funktionellen und ästhetischen Anforderungen des von dem Patienten benötigten Zahnersatzes.

In ungewöhnlich häufiger Anzahl fällt bei der Versorgung der Regio 14 oder 24 im Oberkiefer bei inserierten Implantaten durch verschiedenste Operateure eine oft krasse Fehlanordnung der inserierten Implantate auf. Die Implantatpfeiler liegen mit ihrer Achse in Relation zum Eckzahn häufig zu schräg nach mesial, so dass die Spitze des Implantatpfeilers zu nah an die Eckzahnwurzelspitze reicht oder sie sogar traumatisiert (Abb. 3). Bei einer derartigen Häufigkeit kann kein Zufallseffekt zugrunde liegen, sondern es gilt, die Gründe für diese offenbar häufige Fehlplatzierung zu finden und zu analysieren.

Bei der Implantatinserierung unter optischer Kontrolle und auch gerade bei Verwendung von zahntechnisch hergestellten Bohrschablonen sind die Kronenachsen die Basis für die geplanten Implantatkörperachsen. Die Wurzelachsen entziehen sich der direkten Kontrolle bei der operativen Ausführung des Knochenlagerschaftes. Durch die besonde-

ren Teilaspekte der Eckzahn- und Kieferkammanatomie entsteht leicht ein optischer Täuschungseffekt, der dann, allein orientiert an den Kronenachsen, zu einer Fehlposition der Implantatachse führt.

Wird die Bohrachse Regio 14 oder 24 parallel zur Kronenachse des Eckzahnes angelegt, was auch passiert, wenn der Bohrschablone nur nach der Kronenachse des Eckzahnes angefertigt wurde, trifft die Bohrung auf die Wurzelspitze des Eckzahnes. Tastet man manuell vor dem Anlegen der Achse mit der Bohreinheit die Wurzelspitze des Eckzahnes und bildet eine optische Achse von der Kronenspitze des Eckzahnes zum ertasteten Wurzelspitzenpunkt, ergibt sich eine neue Ausrichtung des Bohrers. Diese neue Achse verläuft mehr oder weniger schräg zur Kronenachse des Eckzahnes, und man stellt dann Divergenzen von über 20° fest.

In der Regel blickt der Operateur von lateral oben auf den Operationssitus. Hierbei wird er beim Anlegen einer Achsausrichtung für ein Implantatlager Regio 14 oder 24 leicht getäuscht. Die Kronenachse des Eckzahnes darf nicht als alleiniges Kriterium zur Parallelitätsfindung herangezogen werden. Dieser Umstand ist besonders bei Verwendung von Bohrschablonen zu berücksichtigen.

Ein weiteres Problem ist die fehlende Sicht auf den Operationssitus bei eingesetzter Schiene. Das heißt, man kann oft nicht unter direkter Sicht kontrollieren, ob die Bohrposition exakt ist und damit Achsenverschiebungen stattfinden. Die Kontrolle über die Achse der Eckzahnwurzel erhält man über eine manuelle Palpation der Wurzelspitze, die sich in der Regel durch die vestibuläre Lokalisation gut erfühlen lässt. Folgt der Operateur der neuen optischen Achse von der Kronenachse zur Wurzelspitze des Eckzahnes, ist eine korrekte parallele Achsengestaltung der Implantatkörperausrichtung Regio 14 oder 24 zu erzielen.

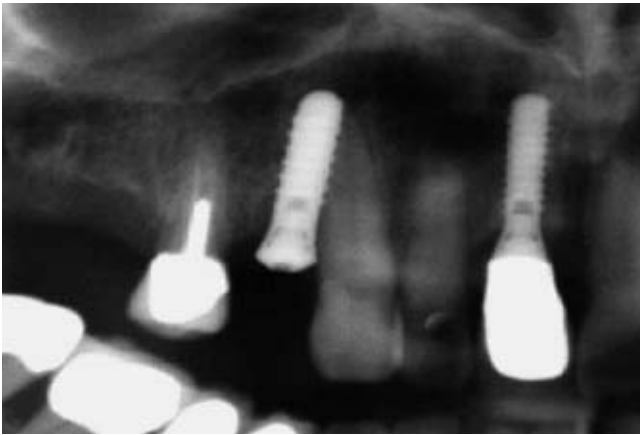


Abb. 3 Ungünstige Achsengestaltung Regio 14. Die Implantatachse ist parallel zur Kronenachse des jeweiligen Eckzahnes ausgerichtet, berücksichtigt aber nicht dessen Wurzelachse. Die Gewebebrücken sind kritisch eng, die Wurzelspitze könnte traumatisiert sein

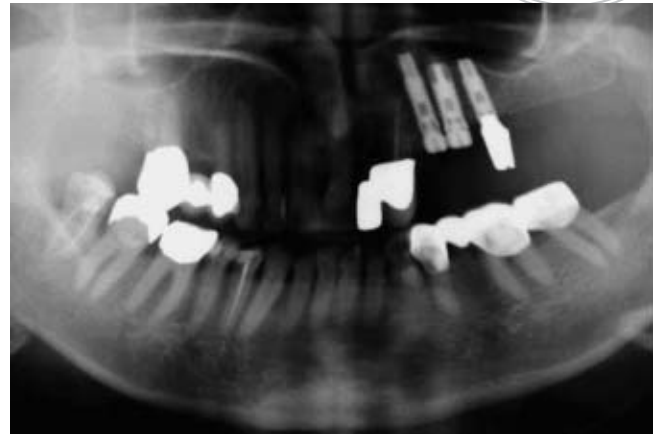


Abb. 4 Ungünstige Achsengestaltung bei Freundsituation Regio 24 bis 27. Die Implantatachse 24 ist parallel zur Kronenachse ausgerichtet, berücksichtigt aber nicht die Wurzelachse des Eckzahnes. Die Implantate 25 und 26 wurden aufgrund der Implantatfehlstellung Regio 24 ebenfalls falsch positioniert

Noch wesentlich schwerer gestaltet sich die Ermittlung der optischen Achse, wenn distale Referenzpunkte fehlen, das heißt bei Freundsituationen ab Regio 14 oder 24. Zusätzlich erschwert dann der Wandel in der Inklinationsachse die korrekte Neigung zur Gegenbezahnung. Gleichzeitig müssen ausreichende interdentale Abstände eingehalten werden, um intakte Gewebebrücken zu den Nachbarstrukturen zu erhalten.

Diese Schwierigkeiten bei der Einbringung der Implantatbettbohrungen machen es notwendig, sich mehr oder weniger aufwändiger technischer Hilfsmittel zu bedienen. Zur Einbringung der Implantatbettbohrungen in den Kiefer des Patienten greift man in der Regel häufig auf Bohrschablonen zurück, welche vor dem Eingriff angefertigt werden und eine zur Oberfläche des zu behandelnden Patientenkiefers im Wesentlichen komplementäre Geometrie aufweisen (Abb. 4).

Die Aufgabe des vorliegenden Beitrages ist es, die Genauigkeit der computerassistierten Implantation gegenüber der bohrschablonegeführten Implantation anhand von postoperativen Röntgenkontrollen zu untersuchen.

Material und Methoden

Im Zeitraum von Januar 2003 bis Juli 2004 wurden bei 116 Patienten 304 Implantate in der Oberkieferprämolarenregion zwischen Regio 14 und 17 sowie Regio 24 und 27 mittels intraoperativer Instrumentennavigation (Navigationssystem RoboDent, Fa. RoboDent, Berlin) inseriert. Von diesen 304 Implantaten entfielen 16 auf die Schaltlücke 14 und 14 auf die Schaltlücke 24. Auf die zwei fehlende Zähne umfassende Schaltlücke 14 bis 15 entfielen 30 und auf die Schaltlücke

24 bis 25 20 Implantate. In den großen Schaltlücken wurden in Regio 14 bis 16 24 und in Regio 24 bis 26 36 Implantate inseriert. Die Frendlücken von Regio 14 bis 17 wurden mit 84 Implantaten und die Freundsituationen von Regio 24 bis 27 mit 80 Implantaten versorgt.

Der Behandlungsablauf der navigierten Implantationen gliedert sich in

1. orientierende klinische und radiologische Diagnostik (OPG),
2. Modellanalyse und prothetisches Wax-up,
3. Anfertigung einer Navigationsschiene (zu ersetzende Zähne röntgenopak),
4. dreidimensionale bildgebende Diagnostik mit Navigationsschiene,
5. Datenexport nach DICOM,
6. virtuelle Implantatplanung und
7. navigierte Operation.

Die sichere, schaukelfreie Fixierung der Navigationsschiene im Mund der Patienten erfolgte über die noch vorhandene Restbezahnung. Zur radiologischen Visualisierung der zu ersetzenden Zähne wurden radiopake Prothesenzähne (Fa. Ivoclar Vivadent, Ellwangen) verwendet.

Die Akquise der dreidimensionalen Bilddaten erfolgte mit einem vierzeiligen Spiral-Computertomographen (Somatom, Fa. Siemens, München). Aus diesen Rohdaten wurden Axiale in 1-mm-Schichten parallel zur Okklusionsebene und somit annähernd senkrecht zur prospektiven Implantatachse generiert. Der Datenexport erfolgte nach DICOM-Standard und die virtuelle Implantatplanung mit dem RoboDent-Planungsmodul (Abb. 5). Die Ausrichtung der Implantate bezüglich Dimension, Insertionsposition und Angulation wurde unter



Abb. 5
Navigationssystem
RoboDent



Abb. 6 Navigierte Implantation mit Tracker am Winkelstück

besonderer Berücksichtigung der anatomischen Besonderheiten in der Oberkieferprämolarenregion durchgeführt.

Bei der verwendeten passiven Instrumentennavigation nach dem Verfahren der Firma RoboDent erfasst ein Kamerasystem in Echtzeit über optische Marker die Relativposition von Winkelstück und Patientenkiefer. Diese wird am Bildschirm visualisiert und ermöglicht so dem Behandler die Führung des Instruments und die Implantation gemäß der Planung¹⁸. Die Implantatauswahl erfolgt aus einer Datenbank, in welche die Original-Fräsdaten der Firma 3i Implant Innovations (Palm Beach Gardens, USA) eingespielt wurden. Die Planungssoftware enthält die exakte Größe der hier verwendeten Osseotite-Implantate mit einem Durchmesser von 3,75 mm und einer Länge von 13 mm oder 15 mm.

Ein optischer Sensor vermisst intra operationem hochpräzise die Lage von Patient und Winkelstück. Das Verfahren basiert auf Infrarotlicht, das an kleinen, leichten und ergonomisch angebrachten Reflektorkörpern am Winkelstück und am Patienten gespiegelt wird (Abb. 6). Intra operationem wird die Abweichung zwischen Instrument und geplanter Achse mit einer Genauigkeit im Zehntelmillimeterbereich angezeigt und bei Bedarf dokumentiert. Um das Instrument in die geplante Zielachse zu führen, wird die Behandlungssituation an einem Hauptmonitor sowie an einem schwenkbaren Minidisplays dargestellt. Dieses Minidisplays lässt sich direkt neben dem Patientenmund anordnen, so dass die Situation durch eine geringe Änderung des Blickwinkels erfasst wird. Der operative Eingriff kann ohne Störungen wie durch Akkomodationsleistungen des Auges oder Kopfbewegungen durchgeführt werden.

Während der eigentlichen Operation ist keinerlei Systembedienung erforderlich. Das Navigationssystem erkennt automatisch die Länge des eingespannten Bohrers und identifiziert selbstständig das gerade zu bohrende Implantat. Auch die Zuordnung zu den medizinischen Bilddaten und die für eine hohe Präzision erforderliche Kalibrierung des Systems, die so genannte Registrierung, erfolgen vollkommen automatisch.

Bei der Röntgenaufnahme trägt der Patient eine individuelle Aufbisschiene, die auch den Zahnbefund im Gegenkiefer wiedergibt. Die digitalen Röntgendaten werden vom Radiologen im so genannten Format Dicom 3.0 auf einer CD-ROM gespeichert und in das Navigationssystem eingelesen. Mit der Planungssoftware kann die exakte Position des zu setzenden Implantates unter Berücksichtigung des Gegenkiefers und der vorhandenen Bezahnung festgelegt werden. Auf der Basis dieser Planung errechnet das Navigationssystem ein dreidimensionales Modell des Patientenkiefers und zeichnet in dieses Modell automatisch die Achsen der zu setzenden Implantate ein. Damit ist die präoperative Planung abgeschlossen, und die eigentliche Operation kann beginnen.

Bei der Operation trägt der Patient erneut die individuelle Aufbisschiene, an der jetzt zusätzlich reflektierende Prismen befestigt sind. Das Navigationssystem zeigt dem Operateur über intuitiv zu erfassende Farbmarkierungen die korrekte Lage seines Winkelstücks in Bezug auf das zu setzende Implantat an, wobei die Farbmarkierung von Rot über Blau nach Grün wechselt.



Abb. 7 Abstand zwischen Implantatschulter und Eckzahn zu gering



Abb. 8 Abstand zwischen Implantatschulter und Eckzahn optimal (2 mm)

Die Tiefe des Bohrers im Knochen kann der Operateur an einem Rollbalken am rechten Bildschirmrand verfolgen. Sobald die exakte Tiefe des zu bohrenden Implantatstollens erreicht ist, ertönt zusätzlich ein akustisches Signal. Zur postoperativen Kontrolle werden ein OPG und eine axiale Röntgenaufnahme nach der Halbwinkeltechnik in der Region der Eckzähne 13 und 23 angefertigt.

Folgende Faktoren wurden bei der retrospektiven Analyse untersucht:

1. Umsetzbarkeit der Implantatposition im vorgesehenen Bereich;
2. intraoperative Modifikationen bezüglich Position und Ausrichtung;
3. Annäherung an die Wurzelspitze des Eckzahnes < 2 mm (gemäß Halbwinkeltechnik);
4. ausreichender interdentaler Abstand, um eine intakte Gewebebrücke zu den Nachbarstrukturen zu erhalten (> 2 mm);
5. Einschätzung der erzielten Genauigkeit intra operationem und durch OPG.

In einer weiteren retrospektiven Analyse wurden 108 OPGs mit 289 inserierten Implantaten in der Oberkieferprämolarenregion auf die gleichen Faktoren hin ausgewertet. Die Implantationen erfolgten nach vorangegangener Bohrschablonenerstellung mit primärer Bohrung durch eine Bohrhülse.

Ergebnisse

Von den 304 navigierten Implantationen wurden 140 (46,1 %) in den Schaltlücken sowie 164 (54 %) in den Frendlücken der Oberkieferprämolarenregion durchgeführt. Bis auf zwei Implantate konnten alle (99,35 %) in den vorgesehenen Bereichen inseriert werden, bei zehn (3,3 %) Implantaten waren intraoperative Modifikationen gegenüber der Planung erforderlich (Korrekturen der Position bzw. der Achse, kleinere Augmentationen). Bei zwei (0,66 %) Implantaten in Regio 27 wurde aufgrund der sich intra operationem darstellenden Situation keine Insertion vorgenommen (zu schmaler Alveolarkamm, schlechte Knochenqualität) (Abb. 9).

116 navigierte Implantate, das waren 38,2 % aller navigierten Implantate, wurden in Regio 14 bzw. 24 inseriert. Dabei sah die Planung die Wahrung eines Abstandes von 2 mm zum krestalen Rand des Eckzahnes vor. Dennoch zeigte sich durch eine axiale Röntgenaufnahme nach der Halbwinkeltechnik in einem navigiert implantierten Fall (0,87 %) eine radiologisch erkennbare Distanz < 1 mm. Eine Schädigung der Eckzahnwurzel resultierte in keinem Fall bei der navigationsgeführten Implantation (Abb. 7 und 8).

Das intraoperative Vorgehen war durch die Wahrung einer ständigen Sichtverbindung der Navigationsbögen mit dem Kamerasystem und die häufig notwendige Verwendung von Bohrererlängerungen erschwert. Gegenüber einer konventionellen Implantation zeigte sich der präoperative Planungsaufwand deutlich erhöht, wobei ein intraoperativer Zeitgewinn nur bei Implantationen ohne Aufklappen resultierte. Als vorteilhaft erwies sich die Flexibilität des Systems,

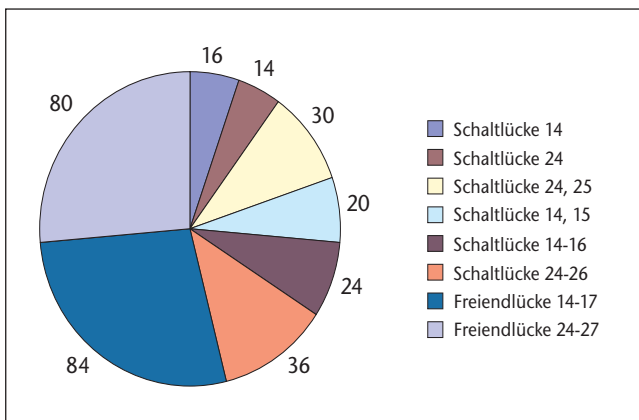
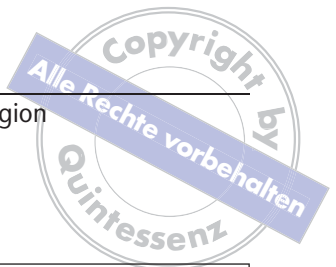


Abb. 9 Lokalisationsverteilung der 304 Implantate bei 116 Patienten mit Navigation

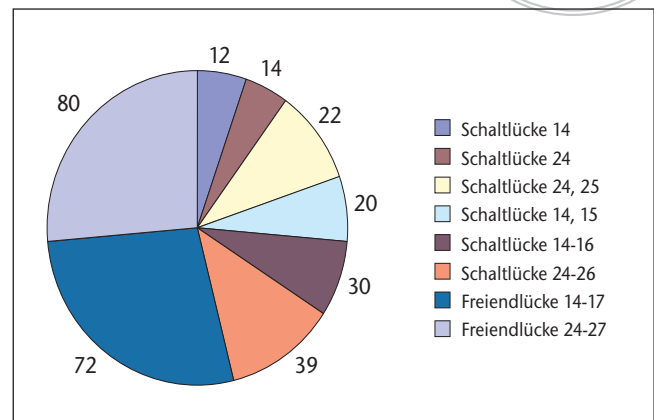


Abb. 10 Lokalisationsverteilung der 289 Implantate bei 108 Patienten unter Verwendung der Bohrschablone

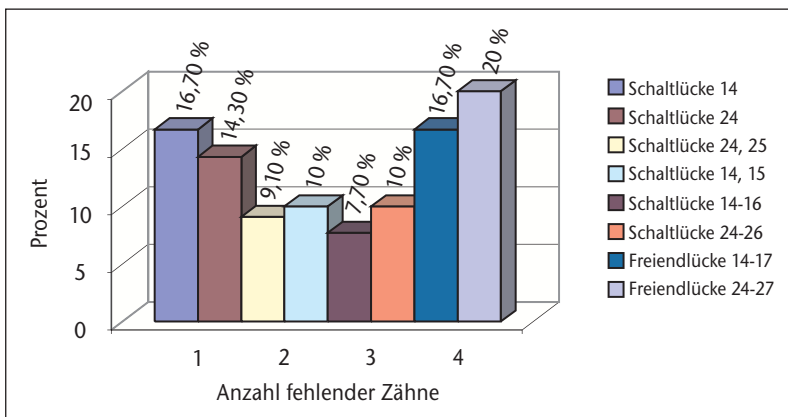


Abb. 11 Postoperative Komplikationen ohne Navigation bei Verwendung von Schablonen, bezogen auf die zu versorgende Lücke

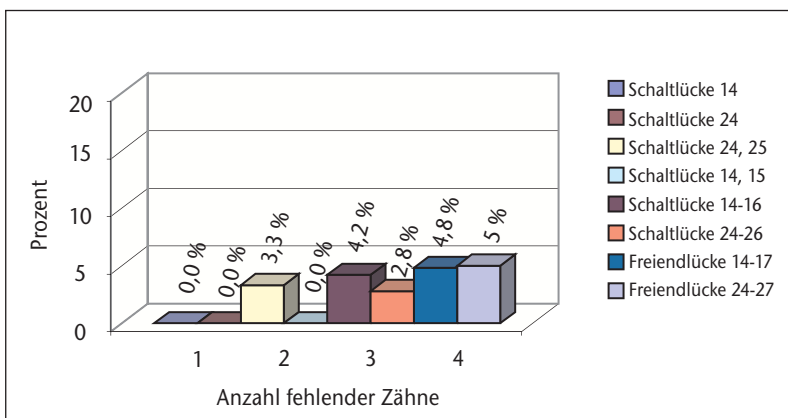


Abb. 12 Postoperative Komplikationen mit Navigation, bezogen auf die zu versorgende Lücke

die durch einfachen intraoperativen Wechsel in den Planungsmodus Korrekturen der Implantatposition erlaubte.

Von den 289 bohrschablonengeführten Implantationen erfolgten 137 (47,5 %) in den Schaltlücken sowie 152 (52,6 %) in den Frendlücken der Oberkieferprämolaren. Bis auf drei Implantate konnten alle (98,97 %) in den vorgesehenen Bereichen inseriert werden. Bei 43 (15 %)

Implantaten waren intraoperative Modifikationen gegenüber der Planung erforderlich (Korrekturen der Position bzw. der Achse, kleinere Augmentationen). Bei drei (1,03 %) Implantaten in Regio 17 wurde aufgrund der sich intra operationem darstellenden Situation keine Insertion vorgenommen (zu schmaler Alveolarkamm, schlechte Knochenqualität) (Abb. 10).

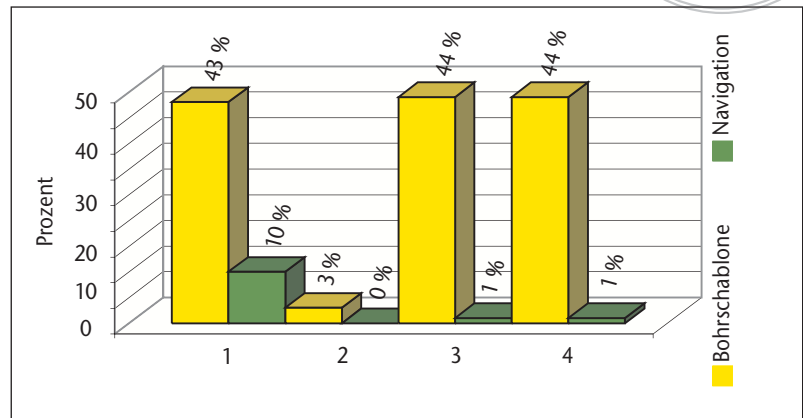
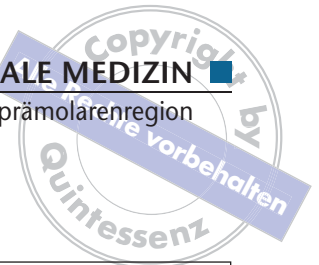


Abb. 13 Vergleich der postoperativen Komplikationen ohne und mit Navigation

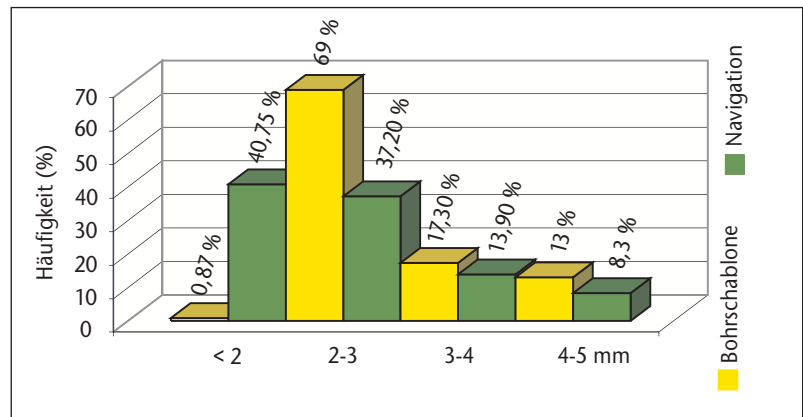


Abb. 14 Abstand zwischen Implantatschulter und Eckzahn, bezogen auf den ersten krestalen Knochen-Implantat-Kontakt (DIB) in mm an 593 Implantaten, gemessen jeweils mesial

108 Implantate, das waren 38,2 % aller bohrschablonengeführten Implantationen, wurden in Regio 14 bzw. 24 inseriert. Dabei sah die Planung die Wahrung eines Abstandes von 2 mm vor. Dennoch zeigte sich – obwohl aufgrund von Überlagerungs- und Verzerrungseffekten eine nur bedingt aussagefähige Kontrolle durch ein postoperatives OPG möglich war – in 44 Fällen (40,75 %) eine radiologisch erkennbare Distanz < 1 mm. Bei der bohrschablonengeführten bzw. Freihandimplantation resultierte in drei Fällen (2,77 %) eine Schädigung der Eckzahnwurzel (Abb. 11 bis 14).

Diskussion

Bei der Implantatinsertion wird die Basis für eine funktionelle und ästhetische Prothetik gelegt. Optimale Positionen und Achsen sind zu erzielen, um das gegebene Kieferkammvolumen auszunutzen und nach der Osseointegration einen statisch günstigen Pfeiler für eine langfristig funktionierende Kaubelastung zu gewährleisten^{3,11}.

Benachbarte Zahnwurzeln dürfen nicht traumatisiert werden. Gerade für eine sichere Osseointegration ist es wichtig, korrekte Abstände zu den benachbarten Wurzeln einzuhalten und entsprechende Gewebebrücken interdental zu belassen¹. Für dieses Ziel ist in jedem Fall eine genaue präoperative Planung durch den prothetisch orientierten Operateur erforderlich. Ein ganzes Spektrum an diagnostischen Hilfsmitteln aus dem bildgebenden radiologischen Bereich und zahntechnische Elemente wie Wax-up-Modelle und Schablonenelemente unterschiedlichster Ausfertigung erleichtern diese Vorarbeiten⁴⁻⁷. Dennoch besteht das Problem, die planerischen Vorleistungen sicher und adäquat in den operativen Situs zu übertragen¹⁹.

Die dosisreduzierte Computertomographie und die digitale Volumentomographie bieten heute die technischen Voraussetzungen, dreidimensionale Bilddatensätze mit einer für die Planung implantologischer Rehabilitationen vertretbaren Strahlenbelastung zu generieren¹⁰. Die in zahlreichen Studien nachgewiesene metrische Genauigkeit liegt im Bereich von 0,3 bis 0,5 mm und ist daher als Datengrundlage



für eine implantologische Planung hinreichend präzise^{4,6}.

Die Planungssoftware ermöglicht die virtuelle Implantatplanung innerhalb dieser Bilddatensätze mit der gleichen Genauigkeit. Die Herausforderung liegt heute darin, die intraoperative Umsetzung der erzielten Planungsgenauigkeit mit einem vertretbaren prä- und intraoperativen Aufwand zu realisieren^{4,7}. Kommerziell stehen hierzu Bohrschablonen- und Navigationsverfahren zur Verfügung. Die In-vitro-Genauigkeit verschiedener Bohrschablonen und Navigationssysteme liegt bei 0,2 bis 1 mm¹⁷.

Die erreichbare Genauigkeit eines Medizin-Roboters wird sowohl durch das System selbst als auch die Randbedingungen des OP-Einsatzes determiniert. Die Interpretation der bildgebenden Diagnostik, Schwierigkeiten mit der sicheren Fixierung der Navigationsschiene, die manuelle Unruhe des Operateurs, Bewegungen des Patienten und die Notwendigkeit, eine permanente Sichtverbindung zwischen optischen Markern und Kamerasystem zu wahren, führen im klinischen Einsatz zur Abweichung von der theoretisch erzielbaren Genauigkeit. Folgende Einflussquellen bestimmen den Fehler:

1. Fehler der Abbildung des bildgebenden Systems,
2. Fehler der Instrumentenkalibrierung,
3. Fehler der Patientenregistrierung,
4. Messfehler am Instrumentenlokalisator,
5. Messfehler am Patientenlokalisator,
6. Ausrichtungsfehler des Benutzers und
7. mechanische Fehler durch Bohrerspiel.

Die Präzision von Navigationssystemen konnte wesentlich erhöht werden, so dass Fehlerquoten unter 1 mm rangieren¹²⁻¹⁴.

Operationen am Phantomkiefer wurden am Universitätsklinikum Heidelberg von *Hassfeld* und *Brief* vorgestellt. Hier wurden vergleichende Untersuchungen zwischen manuell geführten Bohrungen mit Navigationsunterstützung und Freihandbohrungen durchgeführt. Interessant ist der Vergleich zwischen manuellen und navigierten Implantatpositionen im Endergebnis.

Erfahrene Chirurgen konnten beim manuellen Implantieren Abweichungen von 2 bis 3 mm nicht unterschreiten. Der maximale Fehler bei der Navigation lag bei 0,5 bis 0,8 mm. Hierbei handelte es sich ebenfalls um den gesamten Fehler von der Planung bis zur Vermessung der endgültigen Implantatpositionen und Achsen^{13,18}.

Ähnlich geringe Abweichungen erzielte eine Untersuchung an Göttinger Minischweinen. Hier wurde eine Abweichung der inserierten Implantate von 0,5 bis 0,9 mm gemessen. Die Kontrolle der Implantatpositionen erfolgte mittels eines Kontroll-CT mit inkorporierter Planungsschiene^{16,19}.

Bereits 2001 durchgeführte Bohrungen von *Schermeyer* et al.¹⁸ am Phantommodell mit Unterstützung des RoboDent-

Verfahrens zeigten eine große Genauigkeit mit einer mittleren Abweichung von 0,1 mm und einer Standardabweichung von 0,4 mm.

In der hier vorgestellten Studie konnten von den 306 navigierten Implantationen 304 (99,35 %) an den vorgesehenen Lokalisationen durchgeführt werden. Bei zehn Implantationen (3,3 %) waren jedoch intra operationem Modifikationen durch Augmentation oder Änderung des Insertionspunktes nach intraoperativer Darstellung des Operationssitus erforderlich, um unnötige Perforationen oder Verletzungen der Eckzahnwurzel zu vermeiden.

Bei einem der in Regio 14 bzw. 24 inserierten 116 navigierten Implantate zeigte die radiologische Röntgenkontrolle einen Abstand zum Wurzelbereich des Eckzahnes von < 1 mm, obgleich ein Abstand von 2 mm vorgesehen war. Rückschlüsse auf die tatsächliche Distanz zur Eckzahnwurzel sind aufgrund der verzerrenden überlagernden Darstellung des OPG dennoch nur bedingt möglich^{8,10}.

Bei der rein bohrschablonengeführten bzw. Freihandimplantation kam es in 44 Fällen (40,75 %) zu ungünstigen Achsenstellungen im Verhältnis zur Eckzahnangulation. Daraus resultierte beidseits eine Unterschreitung der Knochendistanz von weniger als 2 mm. In drei Fällen (2,77 %) wurde die Eckzahnwurzel traumatisiert. Für die klinische Anwendung können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Der mittlere Fehler der navigierten Implantatinsertion beträgt nicht mehr als maximal 0,5 mm. Der implantologische Eingriff ist somit genau planbar, was die Problematik der Oberkieferprämolarenregion betrifft, und eine Eckzahnschädigung kann vermieden werden.

Beim operativen Einsatz muss neben der klinisch relevanten Gesamtgenauigkeit aus virtueller Planung und intraoperativer Umsetzung auch die Handhabung des Systems Berücksichtigung finden¹⁶. Im Vergleich zu einer konventionellen Implantatinsertion zeigt sich das intraoperative Vorgehen des Systems praktikabel, dennoch beansprucht die erforderliche Wahrung der Sichtverbindung zwischen Kamerasystemen und optischen Markern an den Navigationsschienen eine Adaption des Operateurs und der Assistenz. Aufgrund der Interferenz mit der Schiene ist der Einsatz von Bohrer Verlängerungen relativ häufig erforderlich, so dass bei Implantationen im Oberkieferseitenzahnbereich eine ausreichende Kieferöffnung des Patienten berücksichtigt werden muss.

Zeitvorteile im Vergleich zu einer konventionellen Implantation ergeben sich bei der rein navigierten Implantation nur im Falle eines geschlossenen Vorgehens, wenn auf die Präparation eines Mukoperiostlappens verzichtet werden kann.

Durch die Navigation wird eine bisher nicht erreichbare Genauigkeit erzielt, auch wenn die Erfahrungen dieser



retrospektiven Studie zeigen, dass die im klinischen Einsatz erzielbaren Präzisionen deutlich geringer sind als die in vitro erreichbare Messgenauigkeit^{15,20}. So war bei 3,3 % der 304 inserierten Implantate eine Korrektur notwendig. Diese Erfahrungen werden auch von *Hümmeke et al.*⁹ bestätigt, die in 98 % der Fälle eine Übereinstimmung des intraoperativen Befundes und der postoperativen Röntgenkontrolle mit der geplanten Situation fanden. Bezogen auf die wesentlich größere Implantatzahl in der vorliegenden Studie reduziert sich damit die Übereinstimmung zwischen intraoperativem Befund und postoperativen Röntgenkontrollen auf 96,7 % der Fälle.

gerung der Achsenoptimierung und damit zu einer besseren prothetischen Versorgung vor allem bei der Freundsituation von Regio 14 bis 17 bzw. 24 bis 27. Insofern sprechen die Ergebnisse dieser retrospektiven Studie für die routinemäßige Einsatzbarkeit des Navigationssystems RoboDent. Bei den kleinen Schalllücken und unter Kenntnis der anatomischen Besonderheiten in der Oberkieferprämolarenregion ist die Navigation, wie auch die Ergebnisse dieser Studie zeigen, nicht erforderlich.

Schlussfolgerung

Der behandlerische und finanzielle Mehraufwand der Implantatnavigation führt zu einer nachweislichen Effizienzstei-

Danksagung

Ich bedanke mich bei Prof. Dr. Dr. *Kniha* (MKG-Praxis) aus München und Prof. Dr. *Benner* (LMU München) für die Überlassung der Fotos und Röntgenbilder. Dem Team vom Diagnostikzentrum Hannover danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung dieser umfangreichen Untersuchung.

Literatur

- Behneke N, Fuhr K. Präoperative Diagnostik und Planung implantologischer Versorgung bei reduzierter Bezahnung aus prothetischer Sicht. *Z Zahnärztl Implantol* 1986;2:106-164.
- Benner K, Suillement S. *Knaurs Medizinischer Atlas des Menschen*. München: Droemer Knaur, 1994.
- Bier J. Robotik. *Mund Kiefer Gesichtschir* 2000;4(Suppl):S356-S368.
- Hassfeld S. Dreidimensionale Planung für die dentale Implantologie anhand computertomographischer Daten. *Dtsch Zahnärztl Z* 2000;55:313-325.
- Hassfeld S. Navigation in dental implantology: Perspectives and accuracy. Vortrag, 1st International Symposium on Computer Aided Surgery around the Head, Interlaken, Schweiz, 27.02.-01.03.2003.
- Hassfeld S, Mühling J. Comparative examination of the accuracy of a mechanical and an optical system in CT and MRT based instrument navigation. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2000;29:400-407.
- Hassfeld S, Mühling J. Der Einsatz von Computer- und Robotertechnik in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie. *Zahnärztl Mitt* 2000;90:2870-2878.
- Heurich T, Brief J, Hassfeld S. Perfektion in der Implantologie durch computergestützte Implantatplanung und deren operative Umsetzung – Möglichkeiten und Grenzen. *Implantologie* 2002;11:9-26.
- Hümmeke E, Esser E, Vosshans J. Diagnostische Möglichkeiten der digitalen Volumetomographie (DVT). *Quintessenz* 2003;54:1105-1112.
- Jacobs R. Preoperative radiologic planning of implant surgery in compromised patients. *Periodontol* 2000 2003;33:12-25.
- Kniha H, Gahlert M, Lassen T, Bier J. Die Konzeption der CT-unterstützten Navigation bei der dentalen Implantatinsertion. *Quintessenz Zahntech* 2003;29:842-863.
- Lüth T. Technical challenges in computer aided dental implantology. Vortrag, 1st International Symposium on Computer Aided Surgery around the Head, Interlaken, Schweiz, 27.02.-01.03.2003.
- Lüth T, Bier J, Glagau J et al. Automatic patient registration in computer assisted maxillofacial surgery. *Medicine Meets Virtual Reality (MMVR)*, Newport Beach, USA, 23.-26.01.2002.
- Lüth T, Bier J, Heissler E. Navigations-Robotersysteme als Führungshilfen. In: Schlag PM, Graschew G (Hrsg.). *Tele- und computergestützte Chirurgie*. Berlin: Springer 1998:128-137.
- Meissen R. Genauigkeitsmessungen von navigierten Bohrungen mit dem Robodentverfahren. Masterthese, Krems: Donau-Universität, 2003.
- Meyer U, Fillis T, Joos U et al. 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.
- Sarment DP, Clinthorne N, Sukovic C. Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003;18:571-577.
- Schermeier O, Hildebrandt D, Lüth T, Szymanski D, Bier J. Accuracy of an image guided system for oral implantology. In: Lemke HU. *CARS 2001. Computer assisted radiology and surgery. Proceedings of the 15th International Congress and Exhibition*, Berlin, June 27-30, 2001. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- Schultes G, Gaggl A. CT-gestützte Navigation zur Insertion von dentalen Implantaten in Oberkiefermodellen. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2001;111:828-833.
- Straelen F. Roboassist – Ein Assistenzsystem für den Implantologen und das spezialisierte Dentallabor im Navigationsverfahren mit Robodent. Masterthese, Krems: Donau-Universität, 2003.