

Aus der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Retrospektive multizentrische Studie zur navigierten Implantologie**

Zur Erlangung des akademischen Grades Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)  
vorgelegt der Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Florian Mosch

aus Karlsruhe

Dekan: Prof. Dr. med. Martin Paul

Gutachter: 1. Prof. Dr. mult. h. c. J. Bier  
2. Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Dr. h. c. U. K. Joos  
3. Prof. Dr. Dr. W. Wagner

Datum der Promotion: 23. 06. 2006

Für meine Eltern

## Inhaltsverzeichnis

Widmung.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
Abkürzungsverzeichnis .....	7
1 Einleitung .....	8
1.1 Computernavigation in der Medizin .....	9
1.1.1 Ausblick .....	11
1.2 Die derzeitige Situation in der Implantologie .....	12
1.3 Achsenparallelität der Implantate.....	17
1.4 Implantatposition zur Prothetik.....	20
1.5 Minimalinvasives Vorgehen .....	23
1.5.1 Herkömmliche OP-Technik .....	23
1.5.2 Lappenlose Operation – Stanzung.....	24
1.6 Primärstabilität von Implantaten .....	26
1.6.1 Diagnose der Knochenstrukturen .....	27
1.6.2 Implantatauswahl .....	29
1.6.3 Operationsprinzipien und Methoden zur Bestimmung der Implantatstabilität .....	31
1.7 Sofortbelastung von Implantaten .....	32
1.7.1 Voraussetzungen für die Sofortbelastung .....	34
1.7.2 Risiken der Sofort- oder Frühbelastung .....	35
1.7.3 Sofortbelastung von Implantaten in anderen medizinischen Fachgebieten .....	36
1.8 Komplikationen.....	37
1.8.1 Intraoperative Komplikationen, Nervenschädigungen, Perforationen und Hämatome.....	37
1.8.2 Postoperative Komplikationen, Sensibilitätsstörungen, Implantatverlust, Gingivaverletzungen, Frakturen und Forensik .....	38
2 Fragestellung .....	41
3 Material und Methoden .....	42
3.1 CT/ DVT-basierte Navigation mit dem RoboDent System .....	42
3.1.1 Systembeschreibung RoboDent .....	42
3.1.1.1 Systemarchitektur von RoboDent .....	42
3.1.1.2 Hardware des RoboDent-Systems.....	43
3.1.1.2.1 Die mobile RoboDent- Station.....	43
3.1.1.2.2 Der Touchscreen und Spaceball.....	45

3.1.1.2.3	Der Miniaturmonitor .....	46
3.1.1.3	Die Software des RoboDent-Systems .....	46
3.1.1.3.1	CT/ DVT als Basis für die RoboDent-Behandlung.....	48
3.1.1.3.2	Bilddaten- und Patientenregistrierung.....	49
3.1.1.3.3	Intraoperative Navigation.....	50
3.1.1.4	Arbeitsflussplan der Behandlung mit dem RoboDent-System .....	50
3.1.1.4.1	Die Vorbereitungsphase .....	50
3.1.1.4.2	Die Planungsphase .....	52
3.1.1.4.3	Die intraoperative Navigationsphase: .....	52
3.1.1.5	Probleme bei der Anwendung des RoboDent-Systems.....	52
3.1.1.5.1	Notwendigkeit hochwertiger Bilddaten.....	52
3.1.1.5.2	Schulung des Personals .....	53
3.2	Studienaufbau.....	54
3.2.1	Vorbemerkung.....	54
3.2.2	Primäres Ziel .....	54
3.2.3	Sekundäres Ziel .....	54
3.2.4	Allgemeine Angaben.....	55
3.2.5	Implantate.....	56
3.2.6	Minimalinvasive Operation.....	57
3.2.7	Primärstabilität der Implantate .....	58
3.2.8	Schonung des Nervus mandibularis und anderer Strukturen .....	59
3.2.9	Prothetik entspricht der Planung .....	59
3.2.10	Prothetische Sofortversorgung .....	60
3.2.11	Problembeschreibung durch den Operateur .....	61
3.2.12	Bewertung der Behandlung durch den Patienten .....	62
4	Ergebnisse der retrospektiven Studie .....	63
4.1	Allgemeine Angaben.....	63
4.2	Gründe für die Patienten an der Studie teilzunehmen und Akzeptanz der Behandlung .....	64
4.3	Diagnosen zur Morbidität und Erkennen von Risikogruppen.....	67
4.4	Implantate und Implantatpositionen.....	69
4.5	Durch den operativen Eingriff potentiell gefährdete Strukturen.....	70
4.6	Primärstabilität der gesetzten Implantate .....	71
4.7	Vergleich zwischen Stanzung und operativer Aufklappung .....	72
4.8	Die prothetische Versorgung der Patienten.....	78

4.9	Prothetische Sofortversorgung der Patienten .....	79
4.10	Bildgebung, Navigationsschiene und Navigationsgerät.....	81
4.11	Probleme bei der Bildgebung.....	81
4.12	Probleme bei der Implantatplanung .....	82
4.13	Probleme mit der Navigationsschiene.....	82
4.14	Probleme mit dem Navigationsgerät .....	83
5	Diskussion .....	84
5.1	Aufbau und Auswertung der Fragebögen .....	85
5.2	Implantate und Implantatpositionen.....	86
5.3	Stanzung vs. Aufklappung .....	89
5.4	Gefährdete Strukturen .....	91
5.5	Primärstabilität der Implantate .....	93
5.6	Prothetik entsprechend der Planung.....	94
5.7	Prothetische Sofortversorgung .....	97
5.8	Problembeschreibung .....	100
5.8.1	Probleme bei der Navigation und der Bildgebung.....	101
6	Schlussfolgerungen .....	103
7	Zusammenfassung.....	105
8	Literaturverzeichnis.....	107
9	Anlagen .....	126
9.1	Liste der Abbildungen und Tabellen.....	126
9.2	Danksagungen .....	129
9.3	Lebenslauf.....	130
	Eidesstattliche Erklärung.....	131

## Abkürzungsverzeichnis

2D, 3D	zweidimensional, dreidimensional
CAD/ CAM	Computer aided design/ computer aided manufacturing
CAS	Computer assisted surgery
CT	Computertomographie
d	dies, diei m.
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DVT	Digitale Volumentomographie
HA	Hydroxylapatit
HU	Hounsfield Units
IPI	Immediate provisional implant
k.A.	keine Angabe
LZ	Langzeit-
mGy	milli Gray
MKG	Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie
MPG	Medizin Produkte Gesetz
MRT	Magnetresonanztomographie
Ncm	Newton Zentimeter
OP	Operation
OPTG/ OPG	Orthopantomogramm
PC	Personal Computer
PET	Positronenemissionstomographie
PV	Provisorische Versorgung
Sed	Sedierung
SMN	Surgical microscope navigator
ZE	Zahnersatz
µm	mikro Meter

## 1 Einleitung

Computertechnologien haben in den letzten fünfundzwanzig Jahren zu großen Fortschritten in der Medizin geführt. Der Einsatz der Informationstechnologie hat sich dabei überwiegend auf die Diagnostik und Therapieplanung erstreckt. Die Übertragung der Therapieplanung auf den operativen Situs ist dabei weitgehend von der räumlichen Vorstellung und dem Geschick des Behandelnden abhängig.

Die Möglichkeiten der navigationsgestützten Umsetzung der Operationsplanung haben sich inzwischen zu einem geeigneten Hilfsmittel für die Chirurgie entwickelt. Dabei handelt es sich um passive Systeme, mit denen der Operateur in die Lage versetzt wird, das chirurgische Instrument entsprechend der präoperativen Planung im dreidimensionalen Raum zu führen.

In der dentalen Implantologie erscheint der Einsatz der Navigation sinnvoll, da die planungsgerechte Platzierung der Implantate für den chirurgischen und prothetischen Erfolg entscheidend ist.

Moderne Bildgebungsverfahren wie die Computertomographie (CT) oder die digitale Volumetomographie (DVT) und computerisierte Planungsprogramme haben sich bereits etabliert. Schwachpunkt ist zurzeit noch die Übertragung der Planung auf den Operationssitus. Navigierte Systeme sind möglicherweise in der Lage, diese Situation nachhaltig zu verbessern.

In dieser retrospektiven Studie, der bereits eine weitere Dissertation anhand prospektiver Studien folgt, sollten daher erste Erfahrungen mit der navigationsgestützten Implantatsetzung in der täglichen Praxis gesammelt werden.

## 1.1 Computernavigation in der Medizin

Seit mehr als einer Dekade wird die computergestützte Navigation in zahlreichen Teilgebieten der Medizin angewendet. Computertomographie und Magnetresonanztomographie gehören mittlerweile zu den gebräuchlichen klinisch-diagnostischen Standards. Dank verbesserter Verfahren der diagnostischen Bildgebung und großer Fortschritte in der Computertechnik (im Bereich der 3D-Darstellung) konnten seitdem die Einsatzmöglichkeiten in der Medizin ständig erweitert werden. Durch eine räumliche Darstellung steht Arzt und Operateur eine neue Art von Information zur Verfügung. Die Simulation von Ergebnissen erlaubt eine bessere Planung, sichere Operationen und genauere Voraussagen [1]. Außerdem wird die Entwicklung der computerassistierten Chirurgie (CAS) maßgeblich von den Wünschen und Forderungen der Anwender vorangetrieben, da die moderne Technik zunehmend in der Lage ist, diesen Forderungen auch gerecht zu werden. Verschiedene Systeme sind derzeit auf dem Markt: vollautomatische Roboter, Assistenzsysteme und teleoperierende Systeme. Deren Einsatz hängt jedoch stark vom Anwendungsgebiet ab. Endoskopische, mikroskopische oder freie Systeme kommen zur Anwendung. Die Genauigkeit solch computernavigierter Operationssysteme bei der klinischen Anwendung liegt üblicherweise bei 1-2 Millimetern [2].

Die Navigation, basierend auf CT-Daten, ist für den Bereich der Wirbelsäule heutzutage ein Standardverfahren. Einsatzmöglichkeiten bieten sich hier bei Frakturen, bei der Tumorbiopsie und auch bei Korrekturingriffen. Anfangs wurde die navigierte Instrumentenführung hauptsächlich bei der Insertion von spinalen Implantaten genutzt. Es war erkennbar, wie mit einem computergeführten Navigationssystem die Sicherheit und Genauigkeit der Planungsumsetzung verbessert werden konnten [3].

Eine genaue Passung des Implantats im Femur ist besonders bei der zementfreien Insertion sehr wichtig. Die Anforderungen, die hier an den Chirurgen gestellt werden sind hoch. Er hat den Auftrag, das Implantatlager exakt der Implantatgröße anzupassen, um eine sichere Verankerung im Sinne eines „Press-Fits“ zu bieten. Außerdem gilt es, die richtigen geometrischen Achsen, orientiert an patientenspezifischen Vorgaben, einzuhalten um Fehlbelastungen während der Bewegung zu minimieren. Auch bei der Reposition von Frakturen kommt die Navigation zur Anwendung [4].

In der Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie konnten durch den Einsatz von Robotik und Navigation entscheidende Fortschritte erzielt werden. Die präoperative Herstellung von Epithesen und deren direkte, postchirurgische Eingliederung ist für die Rehabilitation der Patienten von großem Vorteil [5]. Watzinger et al kamen zu dem Ergebnis, dass die Navigation bei der Rekonstruktion von posttraumatischen Deformitäten der Area zygomatico-maxillaris zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Der Eingriff kann minimalinvasiv durchgeführt werden, eine vollständige Freilegung des Os zygomaticum entfiel. Solange keine enophthalme Korrekturen durchgeführt werden, können koronale und subciliare Schnitte vermieden werden [6]. Koele et al berichten über den Einsatz eines Navigationssystems mit elektromagnetischer Detektion an den Nasennebenhöhlen und der vorderen Schädelbasis. Man kam zu dem Ergebnis, dass dieses Verfahren sich durch hohe Präzision (üblicherweise mit einer Abweichung von unter einem Millimeter) und die schnelle Vorbereitungszeit von durchschnittlich zehn Minuten auszeichnet. Eine Steigerung der Effizienz durch ein solches System wird von den Autoren erwartet. Trotz der Unterstützung durch den Computer obliegt die medizinische Verantwortung nach wie vor dem Arzt und nicht dem Navigationssystem [7].

Klapan et al zeigen, wie durch 3D-Modellierung an Computern und die Auswertung von CT-Daten neue unkonventionelle Projektionen entstehen. Diese Informationen lassen sich durch herkömmliche 2D CT-Verfahren nicht erreichen. Virtuelle Reisen durch die anatomischen Strukturen und eine Simulation des Eingriffs vor der echten Operation konnten durchgeführt werden [8].

Die Verletzlichkeit von Nervengewebe und die wichtige funktionelle Bedeutung stellen Neurochirurgen immer wieder vor große Aufgaben. Minimalinvasive kleinstmögliche Zugänge und eine exakte Instrumentenführung sind hier unbedingt erforderlich. Diagnosemethoden wie CT, MRT oder PET konnten entscheidende Verbesserungen in der Diagnostik leisten. Die genaue operative Umsetzung liegt aber weiterhin im Bereich des Chirurgen.

In der Neurochirurgie, wo bisher die operative Zielsuche auf stereotaktischen Atlanten oder Röntgenbildern basierte, wurden durch aus folgenden drei Komponenten bestehende Systeme neue Möglichkeiten geschaffen:

- Bilddatenerstellung und deren Registrierung erfolgt über am Patienten angebrachte Registrierpunkte, die von einem Sensor erfasst werden.
- Planung und Simulation des Eingriffs am PC.

- Intraoperative Führung des ebenfalls mit Sensoren versehenen Instruments.

Der entscheidende Vorteil ist die Unterstützung des Operateurs bei der Planungsumsetzung. Mittlerweile hat die CAS in der Neurochirurgie einen festen Platz. Bei der Entfernung von tief- und oder an kritischen Stellen lokalisierten Tumoren ist die Navigation nicht mehr wegzudenken [9].

### 1.1.1 Ausblick

In der Zukunft werden navigierte Operationssysteme die heutigen Grenzen für Chirurgen weiter verschieben. Dies gilt besonders in der Mikrochirurgie oder beim Operieren an sich bewegenden Organen. Es wird möglich werden, Patienten das komplette Spektrum an chirurgischer Diagnostik zu bieten. Daten von CT, MRT, Ultraschall oder anderer Verfahren können kombiniert und gemeinsam zu einem Ergebnis ausgewertet werden. Ein weiterer wichtiger Vorteil neben der präoperativen Planung ist die Möglichkeit der Simulation der Operation. Hierdurch eignet sich diese Technik auch zur Ausbildung und Schulung. Alle chirurgischen Abläufe können in Echtzeit trainiert und perfektioniert werden. Die Möglichkeit solche computernavigierte Systeme und Rechner zu vernetzen, bietet weitere interessante Ausblicke. Zum einen ist es für den Chirurgen möglich, sich per Internet mit Kollegen oder Spezialisten auf der ganzen Welt auszutauschen und anhand der digitalen Daten gemeinsam Behandlungsvorschläge zu erarbeiten, zum anderen wird es auch möglich das intraoperative Geschehen positiv zu beeinflussen [10]. Maresceaux et al sprechen statt von drei, schon von vierdimensionalen Bildern. Durch die rechnergestützte Datenverarbeitung wird es möglich die Zeit als vierte Dimension einzugliedern und so den Verlauf einer Krankheit darzustellen. Medizinern wird es so leichter fallen, bestimmten Krankheitsbildern und klinischem Verläufen bessere Behandlungskonzepte entgegenzusetzen [11]. Endo et al beschreiben ein vierdimensionales CT-System als ein dynamisches Volumenbildgebungsverfahren für bewegliche Organe, dessen Bildqualität mit der eines konventionellen Computertomographen vergleichbar ist. Das System wird erst durch mehrere Weiterentwicklungen eines gewöhnlichen Cone-Beam-CT realisierbar [12].

Auch aus forensischen Gründen spricht vieles für computergestützte Systeme. Sie erlauben eine exakte Dokumentation aller Planungs- und Behandlungsabläufe und können als Nachweis einer ordnungsgemäßen Behandlung bei eventuell geforderten Gutachten oder Regressansprüchen dienen.

### **1.2 Die derzeitige Situation in der Implantologie**

Vor der Entwicklung von dentalen CT-Formatierungsprogrammen wurden Informationen vorwiegend aus Panoramaaufnahmen oder anderen Schädelaufnahmen gewonnen. Wenngleich nützlich, liefern diese Aufnahmen keine Informationen über die bukkolinguale Ausdehnung des Alveolarkammes, und der Praktiker muss sich besonders auf seine intraoperative Einschätzung verlassen. Nicht selten wird dann ein unzureichendes Knochenangebot vorgefunden. Ein weiterer Nachteil der konventionellen Bildgebung ist, dass keine Aussagen über die Lokalisation von Nerven oder Gefäßen in bukkolingualer Richtung gemacht werden können [13, 14].

Axiale und coronale CT-Bilder sind nur teilweise hilfreich, denn durch metallische Restaurationen oder Amalgam können Artefakte entstehen. Diese Problematik lässt sich durch die Verwendung reformatierter, axialer Dünnschicht-CT-Bilder vermeiden. Eine anatomische Betrachtung der Kieferbögen ist nun in mehreren Ebenen möglich, und die Breite des Prozessus Alveolaris und der basale Knochen können genau bewertet werden. Es wurden bereits Computerprogramme entwickelt und auf den Markt gebracht, die vielfältige Panorama- und Schnittbilder darstellen und bearbeiten können [15]. Eines dieser Softwareprogramme ist Dentscan oder das weiterentwickelte Dentscan Plus (GE Medical Systems). Obwohl sich solche CT-Reformatierungsprogramme von Hersteller zu Hersteller unterscheiden, funktionieren sie nach gemeinsamen Grundprinzipien. Zuerst erfolgt die Aufnahme eines sogenannten Scout-Bildes, welches dazu dient, die zu untersuchenden Regionen zu finden und Grundeinstellungen vorzunehmen. Danach folgen die axialen Aufnahmen, auf die ein computergenerierter Bogen gelegt wird. Die einzelnen Schnittbilder werden auf diesem Bogen durchnummeriert und dann in einer Reihe vom Programm angeordnet. Der Abstand zwischen den einzelnen Schichten kann dabei variiert werden. Normalerweise werden Distanzen von 1-2 mm genutzt. Mandibularkanäle und mentale Foramina sowie die Breite des Alveolarknochens können in Querschnittbildern leicht identifiziert werden. Artefakte verringern die Bildqualität

reformatierter axialer Bilder nicht, da sie nicht auf Höhe des Processus alveolaris projiziert werden. Am Ende des Programms werden drei Bildtypen generiert: axiale und Bilder im Querschnitt sowie Panoramaaufnahmen [15]. Der zahnärztlich orientierte Radiologe liefert dem Zahnarzt einen umfassenden Report. Dieser beinhaltet neben Aussagen über die Knochendichte auch den allgemeinen Zustand von Ober- und Unterkiefer, den Status der Dentition und Messungen des Processus alveolaris. Angrenzende anatomische Strukturen, wie die maxillären Sinus, der Mandibularkanal oder die Nervenaustrittspunkte werden identifiziert und kommentiert. Es ist von immenser Bedeutung, den Mandibularkanal auf Querschnittsbildern zu erkennen und seinen Abstand von der Spitze des Alveolarkammes zu messen [14].

Die Strahlenbelastungen der einzelnen Diagnoseverfahren in der Zahnheilkunde unterscheiden sich deutlich. Immer müssen Risiken und Vorteile der jeweiligen Diagnosemethode abgewogen werden. Hier gilt: Die Strahlenbelastung sollte so gewählt werden, dass mit geringster Belastung bestmögliche Ergebnisse bei der Bildgebung erzielt werden [16]. Die Strahlenbelastung eines herkömmlichen CT ist relativ hoch. Da die Anzahl und die Dicke der Schichten die Gesamtbelastung bestimmen, ist es wichtig, die Untersuchung auf die geplante Implantatlokalisierung oder den zu examinierenden Bereich zu begrenzen [16-19].

Die Verwendung eines Magnetresonanztomographen in der Zahnmedizin hat sich aufgrund der erschwerten Darstellung knöcherner Details nicht bewährt. Es sind keine bekannten Kontraindikationen für Patienten mit bereits vorhandenen Implantaten bekannt. Einige Autoren setzen die Implantate vom Standpunkt der MRT-Sicherheit mit anderen orthopädischen Komponenten wie Schrauben oder Platten gleich [13, 20]. Konventionelle Diagnoseverfahren, wie die Nutzung von zweidimensionalen Panoramaaufnahmen als Planungsgrundlage für das Einbringen von Dentalimplantaten, sind die derzeit am häufigsten angewendeten Methoden. Eine eindimensionale Einzeichnung der Implantate im OPTG, welches keine räumlich exakten Informationen liefert, bietet jedoch nur unzureichende Planungssicherheit. Der Einsatz von computertomographischen Daten zur Diagnostik ist heute meist schwierigen implantologischen Fällen vorbehalten. Viele Implantologen arbeiten derzeit beim Setzen von Implantaten ohne chirurgische und umfassende präoperative Hilfsmittel. Das Setzen der Implantate wird meist frei Hand durchgeführt, und der Erfolg und die Genauigkeit der Implantatposition hängen maßgeblich vom Geschick und der Erfahrung des Operateurs ab.

Durch die moderne Computertechnik wird es möglich, wichtige Strukturen wie den Mandibularkanal durch Softwareprogramme im Voraus semiautomatisch zu identifizieren und die Operation virtuell zu planen [21]. Obwohl CT-Geräte immer kompakter werden, setzen sie den

Patienten weiterhin einer hohen Strahlenbelastung aus (s. Tab.1). Im Bereich der Zahnmedizin kommen solche Systeme bei der Tumordiagnostik, bei Traumata und anderen Gebieten zum Einsatz. Sie haben jedoch ihre Schwächen bei bestimmten pathologischen Veränderungen, wie retinierten Zähnen oder Läsionen im apikalen Bereich. 1997 wurde von Arai und Mitarbeitern ein kompaktes CT-System entwickelt, welches speziell für die Zahnheilkunde konzipiert war [22]. Während der ersten zwei Jahre wurde das so genannte Ortho-CT in ungefähr 2000 Fällen eingesetzt. Es zeigte sich, dass die prä- und postoperative Evaluation retinierter Zähne, apikaler Läsionen, radikulärer Zysten und anderer Krankheiten an Maxilla und Mandibula mit dem Ortho-CT sehr erfolgreich verlief [23]. Der Prototyp des Ortho-CT war eine verbesserte Version eines multifunktionellen OPG (Scanora, Helsinki). Anstelle der herkömmlichen Filmkassette wurde ein Bildverstärker angebracht, was zu einer geringeren Strahlenbelastung und einer besseren Bildqualität führte [22].

Im Jahr 2000 wurde das 3DX MultiImage Mikro-CT entwickelt. Es wurde als limitierter Konusstrahl (Cone-Beam) CT für den Praxisgebrauch entworfen und bot von nun an die Möglichkeit der dreidimensionalen Bildgebung von Hartgeweben (Knochen, Zähnen) der Gesichtsregion. Laut einer Studie von Hashimoto et al ist das 3DX einem Multidetektor-CT (CT der neuesten Generation) hinsichtlich der Bildqualität und der Strahlenbelastung für den Patienten überlegen [24].

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über einige in der Zahnmedizin verwendete bildgebenden Diagnoseverfahren und deren Strahlenbelastung [23, 25-27].

<u>System</u>	<u>OPG</u>	<u>CT</u>	<u>DVT/ Cone-Beam CT</u>
Strahlendosis (mGy)	0,65 mGy	23 mGy	4,2 mGy

Speziell die für den Kopfbereich entwickelten bildgebenden Verfahren wie Ortho-CT haben Verbesserungen gebracht. Das Ortho-CT-System liefert ausgezeichnete Informationen zur Evaluation der Mandibula. Es erlaubt eine sichere Identifizierung des Nervenkanals und des Foramen mentale. Eine einwandfreie Identifizierung der Röntgenschablone im Verhältnis zum Knochen ist möglich. Das System wird als beachtliche Hilfe bei der präoperativen Behandlungsplanung am Unterkiefer angesehen [28].

Auch der Einsatz von Schablonen in der diagnostischen und chirurgischen Phase der Implantologie ist heute eher die Ausnahme. Zahlreiche Autoren empfehlen jedoch den Einsatz

solcher Schablonen. Zum einen zur präoperativen radiologischen Diagnostik, zur Darstellung des Alveolarkammes oder zur Identifizierung wichtiger Strukturen, zum anderen als chirurgische Führungshilfe bei der operativen Umsetzung [29, 30].

Fortin et al beschreiben, wie mit einer Planungssoftware und mit chirurgischen Schablonen die richtige Implantatposition nach prothetischen Anforderungen am Patienten gefunden werden kann [31, 32]. Probleme mit Bohrschablonen zeigten sich jedoch darin, dass ihr sicherer Halt durch die Bohrerbewegung nicht immer vorhanden ist. Des Weiteren ist die Führung durch eine Schablone beschränkt. Sie dient im Wesentlichen zur Führung der Primärbohrung. Ein weiterer Nachteil kann im Seitenzahnbereich auftreten, wo es häufig zu Platzproblemen durch den Gegenkiefer kommt [33].

Systeme zur computernavigierten Insertion von Zahnimplantaten bestehen im Wesentlichen aus zwei Bestandteilen:

- Einem leistungsfähigen Computer zur Erfassung und Bearbeitung hochauflösender digitaler, computertomographischer Daten. Hier kann eine präoperative Planung und Simulation des Eingriffs durchgeführt werden. Eine Planungssoftware ermöglicht es dem Operateur, den ganzen Eingriff im Voraus virtuell durchzuführen. Die ideale Implantatposition nach prothetischen und anatomischen Gesichtspunkten kann so gefunden werden [31].

- Einem optischen Detektorsystem, welches die Position von Patient und Instrument zueinander erkennt, berechnet und virtuell am Bildschirm in Echtzeit darstellt.

Beim Einsetzen von Dentalimplantaten muss von einer elektromagnetischen Detektion des Instruments (z.B. bei Katheteroperationen) abgesehen werden, da der Motor des Bohrers zu einer Störung des Magnetfelds führt und so eine genaue Lokalisation des Implantatbettes nicht gewährleistet ist. Durch den Einsatz eines optischen Suchsystems, welches durch die leitenden Materialien nicht beeinflusst wird, kann man dieses Problem umgehen [34].

Die Registrierung des Patienten erfolgt über an einer Schablone angebrachte Referenzpunkte, sog. „fiducials“ oder Fiducial-Marker. Sie bestehen aus Metall und dienen der Software zur Berechnung der Patientenposition [35]. Um die exakte Vermessung der Fiducial-Marker zu gewährleisten, wurden verschiedene Algorithmen entwickelt, die eine Punkt-zu-Punkt-Registrierung der CT-Daten erlauben. Algorithmen, die auf dem Eigenwert-Problem basieren, haben sich besonders bewährt [36].

Studien zur Genauigkeit solcher Systeme sind in geringer Zahl bekannt, wenngleich sie sich untereinander teilweise durch die verwendeten Komponenten differenzieren [32]. Somit wird nun auch für den Bereich der dentalen Implantologie die computernavigierte Operation als wertvolle Hilfe angesehen [32].

Mit der Entwicklung des RoboDent-Systems steht erstmals ein komplettes Planungs- und Navigationssystem in der Implantologie zur Verfügung. Während chirurgische Robotersysteme auch eine aktive Führung des Instruments übernehmen, erfolgt diese bei chirurgischen Navigationssystemen durch die Hand des Arztes. Die Sensordaten werden in für den Benutzer interpretierbare Informationen umgerechnet und visualisiert. Mit RoboDent ist der Chirurg in der Lage, mit einem Gerät die Implantatplanung basierend auf CT-Daten sowie die operative Umsetzung durchzuführen. Während der Operation erhält der Chirurg laufend optische und akustische Rückmeldungen über die Lage und Ausrichtung des Instruments. Die Genauigkeit dieses Navigationssystems setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Fehler können zum einen in der Datenerhebung und in deren Registrierung liegen, zum anderen in der Ausführung der Bohrbewegungen durch den Menschen. In Untersuchungen zur Präzision des RoboDent-Systems von Schermeier wurde jedoch gezeigt, dass mittels automatisierter Patientenregistrierung Systemfehler und Ungenauigkeiten des Systems nahezu ausgeschlossen werden können. Aus der Standardabweichung lässt sich schlussfolgern, dass die Hauptfehler durch Tremor der Hand des Behandlenden oder Wahrnehmungsfehlern dessen entstehen [37].

Die biomechanische Stabilität besonders von okklusal sofortbelasteten Implantaten ist für einen Behandlungserfolg von entscheidender Bedeutung. Die exakte präoperative Planung des prothetischen Konzepts führt zu guten okklusalen Positionierungen. Zu diesem Ergebnis kam auch eine Studie von Meyer et al, die mit dem RoboDent-System an Schweinen durchgeführt wurde. Nach histologischen Untersuchungen war eine gute biomechanische Stabilität erkennbar. Die Qualität der Implantatinsertion und der prothetischen Versorgung kann mit dem RoboDent-System deutlich verbessert werden [38].

### 1.3 Achsenparallelität der Implantate

Der Erfolg einer Implantatversorgung wird durch zahlreiche Einzelfaktoren bestimmt. Die optimale Positionierung enossaler Implantate ist ein wichtiger Vorhersagefaktor für die spätere Prothetik und den Erfolg der Behandlung. Eine der prothetischen Planung entsprechende Ausrichtung der Implantate ist häufig durch einen Mangel des Knochenangebots oder andere anatomische Besonderheiten erschwert [39].

Die Osseointegration spielt eine überragende Rolle für eine erfolgreiche prothetische Versorgung. Um diese zu erreichen muss die richtige Implantatposition gewählt werden. So spielt der Einfluss der Implantatneigung vor allem im Seitenzahnbereich eine wichtige Rolle [40]. Studien von Taylor et al zufolge ist die Setzung von nicht parallelen Implantaten der Hauptgrund für eine non-axiale Belastung unter der Kaufunktion. Dies birgt die Gefahr eines Verlusts der Osseointegration. Eine axiale Belastung auf die Fixturen ist deshalb anzustreben [41].

Vertikale und laterale Kraftverteilung auf einen festsitzenden Zahnersatz hängt von der Anzahl und der Anordnung der Implantate sowie der Steifheit des Gerüsts ab. Im Allgemeinen werden Belastungen von einem starren festsitzenden Zahnersatz (primäre Verblockung der Implantate untereinander, z.B. durch Stege) besser auf die umliegenden Pfeiler abgeleitet. Bei nicht verwindungssteifen Prothesen soll deshalb die Gesamtbelastung eines Pfeilers auch von diesem alleine getragen werden können, ohne die Belastungen auf andere Fixturen abzuleiten, denn dies ist aufgrund der mangelnden Festigkeit der Suprastruktur nicht möglich. Bei extendierten Stegen liegt eine Erhöhung der Belastung am distalen Pfeiler vor, so die Autoren [42].

Die falsche Neigung von Implantaten in Funktion führt zu Fehlbelastungen. Solche angulierten Belastungen erhöhen die Gesamtbelastung für den crestalen Knochen. Die Kräfte verlagern sich von den geforderten axialen Kräften hin zu Spannungen und Scherkräften [43].

Nach photoelastischen Analysen der Belastungsverteilung auf parallele und gegeneinander geneigte Implantate kamen Ueda et al zu dem Ergebnis, dass es nur durch die Pfeilerparallelität zu einer axialen Lastverteilung entlang der Fixtur im kommt. Ist die Lage der Implantate hingegen nicht parallel, ergaben sich die Belastungsspitzen im Knochen im apikalen Bereich der lateralen Implantate [44].

Um eine auch unter Belastung stabile Verteilung der Kaukräfte zu gewährleisten, wird eine parallele Anordnung der Implantate im Kiefer bevorzugt. So gilt die Empfehlung, insbesondere

wenn es zur Verwendung von Kugelkopfattachments kommt, eine parallele Anordnung der Fixturen zueinander und zur Einschubrichtung umzusetzen [45].

Isidor et al ermittelten durch experimentelle Studien an Affen, dass okklusale Überbelastungen auch bei bereits vorhandener Osseointegration zu Knochenabbau und daraus resultierendem Implantatverlust führen [46].

Lima Verde et al zufolge ist die unpassende Neigung von Implantaten ein häufiges Problem, welches die Ästhetik, Phonetik und die Funktion einer prothetischen Versorgung in Frage stellen kann [47]. Hohe Fehlbelastungen treten auf und können die Ursache für den Verlust der Verankerungsfunktion sein. Die prothetische Planung wird obsolet und muss neu angepasst werden [48, 49].

Walton et al konnten in einer Studie an 41 Patienten zeigen, dass die Ausrichtung eines Implantats direkten Einfluss auf die Wartungshäufigkeit und Nachsorge der Versorgung hat. Je größer die Abweichung von der optimalen Implantatachse, desto häufiger kam es zu Komplikationen und notwendigen Reparaturen. Außerdem wurde erkennbar, dass die Erfahrung des Operateurs ebenfalls einen großen Einfluss auf die korrekte Positionierung der Implantate hatte. So war bei unerfahrenen Kollegen eine ungünstige Implantatneigung häufiger [49].

Einige Konzepte zur Versorgung versuchen die Fehlstellung über die Distanzhülsen auszugleichen, was jedoch hinsichtlich der Kräfteverteilung nur begrenzt Erfolg versprechend ist. Oft gelingt es nur bis zu einem gewissen Grad, eine ungünstige Implantatrichtung zu kompensieren. Dies gilt vor allem für nicht parallele Implantate, bei denen eine gemeinsame Einschubrichtung geschaffen werden muss [39, 47, 50]. Studien von Gulizio et al haben gezeigt, dass insbesondere bei der Verwendung von parallelen Gold-Abutments von einem Winkel über dreißig Grad Neigung die Haftung abnimmt [51].

Eine gute Zusammenarbeit zwischen Prothetiker und Chirurg ist eine der Grundvoraussetzungen, um die funktionellen und ästhetischen Ansprüche einer Implantatversorgung zu erfüllen. Das Konzept der restaurationsgesteuerten Positionierung von Implantaten ist allgemein anerkannt. Auf diese Weise lassen sich prothetische Probleme minimieren. Bieten die anatomischen Strukturen jedoch nicht die geforderten Merkmale, wie Knochenhöhe und -breite, müssen durch Verfahren wie horizontale, vertikale Augmentation oder Sinuslift geeignete Verhältnisse zur Aufnahme der Fixtur geschaffen werden [52, 53]. Bei Missachtung

solcher Gegebenheiten kann es leicht zu einer Fehlstellung der Implantate kommen, welche auch durch eine ausgleichende Prothetik nicht behoben werden können. Zu den resultierenden Problemen zählt vor allem die nicht achsengerechte Belastung der Implantatpfiler. Derartige Fehlbelastungen beanspruchen den periimplantären Knochen. Es besteht die Gefahr der Knochenresorption sowie Schäden an Implantat oder Schrauben [43].

Um diesen hohen Anforderungen an die Positionierung eines Implantats auch am Patienten mit schwieriger Ausgangssituation (z.B. Tumorpatienten) gerecht zu werden, wurden Hilfsmittel entwickelt:

Studien von Akca et al zufolge liegen die Vorteile von Bohrschablonen vor allem in der Möglichkeit eine parallele mesiodistale Ausrichtung zwischen den Implantaten zu gewähren. Andernfalls besteht die Gefahr von Überbelastung der Implantate während der späteren Funktionsphase. Durch diese Überbelastungen kann eine bereits bestehende Osseointegration wieder verloren gehen [46, 54].

Ein anderes Beispiel ist ein Parallelisierungsinstrument, welches über verbundene Rohrteleskope eine Führung des Bohrers erlaubt. Ein Ende wird mit einem Implantatpfosten verbunden, das andere Ende dient zur Aufnahme des Winkelstücks. Auf diese Weise lässt sich eine Parallelisierung der Implantate untereinander erreichen. Die Gesamtausrichtung hängt somit vom ersten, möglichst korrekt gesetzten Implantat ab.

Zechner beschreibt in Untersuchungen, wie fehlplatzierte Implantate mit hohem Aufwand korrigiert wurden. In seiner Studie wurde mittels Osteodistraktion die Position der Implantate korrigiert, um bessere Voraussetzungen für die spätere prothetische Versorgung zu schaffen [55].

Watanabe et al entfernten ein fehlplatziertes Implantat mittels Trepanbohrer und setzten dieses anschließend mit seinem umgebenden Knochen in neuer Position wieder ein [56].

Ein ähnliches Verfahren und Vorgehen beschreiben auch Studien von Hallmann et al. Die Autoren sehen eine sorgfältige Behandlungsplanung als Voraussetzung für den Erfolg einer Implantatsetzung. Sie favorisieren die Verwendung von Schablonen als Führungshilfe, da solche Schienen die Übertragung der gewünschten Implantatposition erleichtern [57].

Genaueste präoperative Diagnostik (CT/ DVT) sowie eine prothetikorientierte Planung, die anschließend navigiert umgesetzt wird, beugen den Risiken von falschen Implantatstellungen

vor. Die Navigation gibt vor allem dem unerfahrenen Operateur während der gesamten Insertionszeit eine optimale Kontrolle und Überwachung über den Bohrvorgang, Position und Neigung der Implantate sowie ihrer Ausrichtung untereinander.

### **1.4 Implantatposition zur Prothetik**

Ein osseintegriertes Implantatsystem dient als Verankerung für prothetische Versorgungen in Fällen, wo eine natürliche Dentition fehlt oder diese keine ausreichende Stabilität bietet. Implantatgetragene Restaurationen können aus unterschiedlichsten Gründen Komplikationen entwickeln, sei es aus biologischen oder aus mechanischen Gründen [58].

Das Verständnis der Okklusionprinzipien und die Umsetzung der Kaukräfte auf Implantate ist ein besonders wichtiger Punkt, um die Langlebigkeit einer Implantatprothetik zu sichern [59].

Einer der Faktoren, welcher die Stabilität am meisten beeinflusst, ist die übermäßige Beladung (Overloading) eines Implantats. Dies kann eine Lockerung der Distanzhülenschraube oder mögliche Frakturen zur Folge haben. Eine Überladung kann der Fixtur und der Suprakonstruktion schaden und zu einem Verlust der Osseointegration führen. Es ist deshalb immer wichtig, schon während der Planung die Anzahl der Implantate festzulegen, da zu wenige Pfeiler zwangsläufig zu einer Überbelastung unter normaler okklusaler Last führen. Aus diesem Grund wird mindestens ein Implantat für eine prothetische Einheit gesetzt [60, 61]. Um die mechanischen Faktoren von Implantatfehlern zu untersuchen, ist die Bestimmung der von der Prothetik übertragenen Kräfte notwendig. Das Wissen über diese Kräfte liefert wertvolle Informationen für die Behandlungsplanung. Die Positionierung der Implantate kann verbessert und das Risiko falscher Belastungsbedingungen reduziert werden [42]. Die okklusale Form einer teilweise implantatgetragenen prothetischen Versorgung beruht auf den herkömmlichen Prinzipien der restaurativen Zahnheilkunde. Ein besonders für Implantate im posterioren Bereich wichtiges Ziel ist die Minimierung lateral wirkender Kräfte.

Ein wichtiger Faktor für eine stabile Verbindung von Implantat und Versorgung ist das Schaffen von Haftung (sog. Passive Fit). Eine Prothese ohne Passive Fit wird unter Belastung Spannungen in Verbindungselementen und Implantat verursachen [62].

Pathologische okklusale Kräfte, wie sie durch Bruxismus oder Pressen entstehen, können ebenfalls die Ursache für Komplikationen sein. Derartige Gewohnheiten sind zwar keine Kontraindikation für eine Therapie mit enossalen Implantaten, müssen aber zuvor diagnostiziert werden und in der Prothetik Berücksichtigung finden [63].

In Langzeitstudien von zweizeitig gesetzten Implantaten waren zahlreiche der aufgetretenen Implantatverluste abhängig von einer zu hohen Belastung der Implantate. In Studien an zahnlosen und teilbezahnten Kiefern wurde für die meisten der Implantatverluste starke okklusale Überbelastung verantwortlich gemacht [64-66].

Die Versorgung von Implantaten mit Restaurationen stellt hohe Ansprüche an die prothetische Zahnheilkunde. Eine große Herausforderung ist das hohe Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Prothetiker, Chirurg und Zahntechniker. Um das Ergebnis abschätzbar zu machen, durchläuft der Patient zahlreiche Behandlungsschritte. Eine an der Prothetik orientierte prächirurgische Diagnostik wird durchgeführt. Sie dient zur Beurteilung von Knochenangebot und erwarteter Zahnposition. Nach einer Analyse der Situationsmodelle erfolgt die Herstellung individueller Wax-Ups. An diesen kann die einartikulierte Situation untersucht werden. Mit einer Röntgenschablone aus transparentem Kunststoff, auf der die Zähne mit röntgenopakem Zusatz (Bariumpulver, CT und Wolframpulver, DVT) bestrichen werden, kann auch in schwierigen klinischen Situationen die optimale Implantatposition gefunden werden.

Röntgenschablonen sind einfach herzustellen. In ihnen eingearbeitet sind Marker aus Titan (geringe Kernladungszahl), die als Referenzpunkte für eine Auswertung dienen und keinen störenden Einfluss auf die Projektion haben. Während der Aufnahme wird die Schablone dem Patienten fest eingesetzt. Auf dieser Schablone können nun die geplanten Implantate durch Metallstifte angedeutet und in Relation zum Knochenangebot gebracht werden [67]. Die Herstellung und Fixierung solcher Schablonen ist sowohl an teilbezahnten als auch an zahnlosen Patienten möglich. Eine solche Schiene muss feststehend angebracht sein und die horizontalen CT-Schichten müssen parallel zur Okklusionsebene verlaufen. Die exakte Auswertung wird sonst in Frage gestellt.

Aus zahntechnischer Sicht werden folgende Anforderungen an die Implantatposition gestellt: Das Implantat sollte in der Mitte des zu ersetzenden Zahnes liegen, und der Neigungswinkel der Fixtur sollte die Aufnahme von Pfosten oder Stegen innerhalb der Zahnkontur erlauben.

Der Durchmesser eines Implantats sollte bei Durchtritt durch die Gingiva eine physiologische Zahnkontur ermöglichen. Eine Reihe wichtiger Faktoren sind für den Erfolg einer implantatgetragenen Versorgung verantwortlich. Hinsichtlich der auf ein Implantat einwirkenden Kräfte ist folgendes zu berücksichtigen. Die maximalen Kaukräfte, die Physiognomie oder Parafunktionen sind ebenso zu beachten, wie die Prognose eventuell vorhandener natürlicher Zähne oder das Risiko einer Osteoporose. Wenn der Gegenkiefer noch bezahnt ist, wirken größere Kräfte auf das Implantat. Die natürlich aufgewendete Kaukraft liegt über der von Patienten mit rein implantatgetragener Versorgung [68, 69].

Eine Studie von Zitzmann stellt die gute prothetische Implantatplanung als Rückwärtsplanung dar. Beginnend mit dem angestrebten prothetischen Ziel wird anhand von Anamnese und radiologischer Diagnostik ein individueller Therapieplan erarbeitet.

Die Verwendung von Röntgen- und Bohrschablone wird als Hilfe zum Erreichen bester Ergebnisse vorgestellt [70]. Implantate erlauben, anders als natürliche Zähne, wenig Spielraum für einwirkende Kräfte. Eine genaue Diagnostik der Okklusion ist deshalb wichtig. Die ein Implantat belastenden Kräfte müssen ordnungsgemäß in das vorhandene Schema integriert werden. Ein optimal belastetes Implantat erlaubt eine gute Knochenregeneration und wirkt positiv auf den Erhalt des Alveolarfortsatzes.

Zu den Methoden, die Versorgung mit Implantaten in funktioneller und ästhetischer Hinsicht noch besser zu machen, zählen auch die Herstellung individueller Abutments oder Distanzhülsen aus Keramik oder Metall [71, 72]. Wichmann beschreibt ein neuartiges System, bei dem die Herstellung der Abutments mittels CAD/ CAM-Technologie erfolgt [73].

Das von Nobel Biocare entwickelte Software-Programm zeichnet sich dadurch aus, dass es nun möglich ist, die Abutments virtuell am Computer zu entwerfen und anschließend mittels Datentransfer (Procera Verfahren) die Informationen zur Herstellung zu übermitteln. Die Fertigung der Hülsen erfolgt in Schweden. Wichmann sieht die Vorteile zementierter individueller Distanzhülsen in einer unversehrten Okklusalfäche, die nicht von Schrauben perforiert wird, ebenso wie in der Möglichkeit, die Kronenränder girlandenförmig zu gestalten [73, 74]. Dies erlaubt, in der vestibulären Region den Kronenrand ästhetisch anspruchsvoll unsichtbar zu platzieren und verhindert zu tief submukosal liegende Kronenränder im approximalen Bereich. Außerdem erübrigt sich für den unerfahrenen Behandelnden die nicht immer einfache Auswahl des geeigneten Abutments. Ein weiterer Vorteil der Herstellung individueller Distanzhülsen mit der CAD/ CAM-Technologie sind die geringen Kosten, da

außer der Software und eines Modems zur Datenübertragung keine Anschaffungen zu machen sind.

## 1.5 Minimalinvasives Vorgehen

### 1.5.1 Herkömmliche OP-Technik

Das Setzen von Implantaten erfolgt traditionell über die Mobilisierung eines mukoperiostalen Lappens [75]. So soll eine Übersichtsform geschaffen werden, die hilft das Knochenangebot zu beurteilen, sowie benachbarte Strukturen, z.B. den Mandibularkanal, zu erkennen. In vielen Fällen ist diese Technik, wie z.B. bei der Knochenaugmentation, unumgänglich.

Jedoch hat diese Arbeitsweise auch ihre Nachteile, da eine relativ große Wunde gesetzt werden muss. Eine Schwellung wegen des mobilisierten Gewebes ist zu erwarten, und der Patient wird längere Zeit eingeschränkt sein. Es besteht ein hoher intra- und postoperativer Aufwand. Momentan ist diese Arbeitsweise allerdings die am häufigsten praktizierte. Die Anforderungen an die ästhetische Implantologie sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Zunehmend wird auf eine optimale Gestaltung der gingivalen Verhältnisse Wert gelegt. Vor allem an den Papillen der Nachbarzähne entsteht nach Mobilisierung des Mukoperiostlappens ein störender Konturverlust. Ziel der modernen Implantologie ist eine schonende Weichteilpräparation, um bestmögliche Ästhetik zu gewährleisten [76-78].

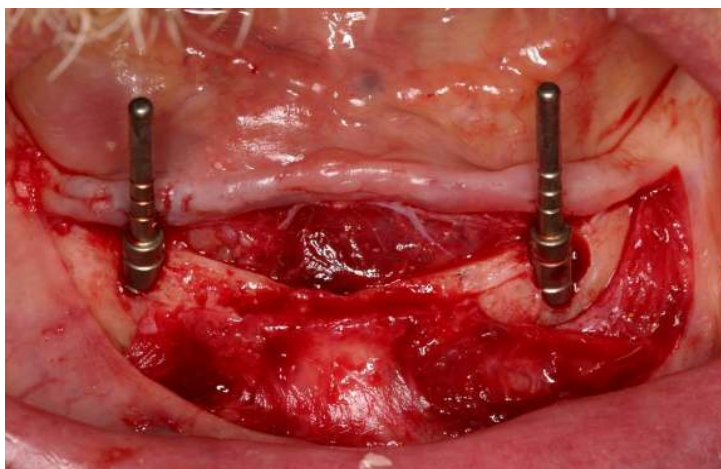


Abb. 1: Aufklappung der Schleimhaut regio 33-43 zur Aufnahme mehrerer Implantate (Quelle: Enrico Trilck, MSc)

### 1.5.2 Lappenlose Operation – Stanzung

Eine möglichst geringe Verletzung gingivaler Strukturen ist stets eine wichtige Vorgabe in der Implantologie. Implantatinsertion über Mukosastanzlöcher ohne Mobilisierung eines mukoperiostalen Lappens bietet im Vergleich zur herkömmlichen Technik eine Reihe von Vorteilen. Die Operation kann minimalinvasiv vorgenommen werden. Die Vermeidung einer größeren Schleimhautläsion verhindert Schwellungen und macht ein Fadenziehen obsolet. Aufgrund des geringeren Zeitaufwands wird die Behandlung für den Patienten erträglicher, die berufliche und soziale Beeinträchtigung verkürzt. Seine postoperativen Einschränkungen werden minimiert.

In Studien an mehr als 700 über Stanzung gesetzten Implantaten wurden über einen Zeitraum von 10 Jahren Erfolgsquoten zwischen 74% (1990) und 100% (2000) verzeichnet. Die Autoren beschreiben ihr Vorgehen als eigentlich „blindes Operieren“ [79], da es nicht zur Verwendung eines CT-basierten Navigationssystems kam. Es stellt sich die Frage, wie mit Hilfe eines navigierten Systems die Ergebnisse jener Studie ausgefallen wären.

Die Methode der Stanzung kann erst nach gesicherter Diagnostik erfolgen. Die ausreichende Breite des Alveolarkammes ist eine Grundvoraussetzung und muss mittels radiologischer Bilddaten untersucht werden. Im Falle einer notwendigen Augmentation wird die Methode obsolet. Sind alle Voruntersuchungen abgeschlossen, kann der Eingriff unter lokaler Anästhesie vorgenommen werden.

Gaggl berichtet in einer Studie vom Einsatz einer Biopsiestanze, mit der die gingivale Schleimhaut eingestantzt und anschließend mit dem Raspatorium abgelöst wurde. Bei allen auf diese Weise gesetzten Versorgungen wurde eine zufriedenstellende Ästhetik erzielt [80].



Abb. 2: Gestanzte Schleimhaut regio 36 zur Aufnahme eines Implantats (Quelle: Enrico Trilck, MSc)

Ästhetische Gesichtspunkte spielen vor allem im anterioren Oberkiefer eine Rolle.

Eine harmonische Papillenbildung nach einer Lappenoperation ist meist schwer zu erreichen. Mangelnde Ästhetik ist häufig das Resultat. Durch Stanzung bleiben die Papillen unversehrt. Gaggl et al kamen bei minimalinvasiver Implantatsetzung an Patienten zu dem Schluss, dass die transmukosale Stanzung hinsichtlich Ästhetik und Funktion zu guten Ergebnissen führt [81].

Ein verhältnismäßig kleines Areal ist bei der transgingivalen Stanzung zu anästhesieren. Stärke und Dauer der Anästhesie können deshalb reduziert werden. Es wird auch vermutet, dass Dauer und Erfolg der Implantateinheilung maßgeblich von der Versorgung des peripheren Gewebes abhängen. Wenn während der Einheilung der Implantate eine physiologische Vaskularisation des alveolären Knochens und Gewebes herrscht, wird die Knochenresorption gemindert [82, 83]. Die Schleimhautstanzung stellt eine schonende Weichteilpräparation dar und trägt so zu einem Verbleib der periimplantären Knochenhöhle bei, was der Osseointegration zugute kommt.

Untersuchungen zur Papillenbildung haben gezeigt, dass das Vorhandensein einer Papille vom Abstand zwischen knöchernem interdentalen Kieferkamm und Aproximalkontaktpunkt der Kronen abhängt. Dieser beträgt im Idealfall nicht mehr als 5 mm. Sobald diese jedoch überschritten werden, steigt das Risiko einer fehlenden Papille. So fanden Tarnow et al bei Patienten, bei denen der Abstand kleiner gleich 5 mm war, beinahe zu 100% eine Papille [84]. Um ästhetisch anspruchsvolle Ergebnisse zu erzielen, wurden chirurgische Techniken zum Papillenaufbau entwickelt. Sie sind allerdings vom Vorhandensein einer keratinisierten Mukosa abhängig. Neben Maßnahmen des Knochenaufbaus beschreiben einige Autoren auch den Einsatz von Schleimhauttransplantaten aus dem Tuberbereich, um so eine zufriedenstellende Papillenbildung zu erreichen [85].

Neben einer schonenden Präparation spielt auch die Formgebung durch das Abutment eine tragende Rolle für das Erreichen anspruchsvoller ästhetischer Ergebnisse. Dies gilt besonders bei einer einphasigen Operationstechnik mit transgingivaler Einheilung der Implantate, da hier auf eine Freilegungsoperation verzichtet wird. Als Vorgabe kann letztlich nur das gesunde Parodont mit all seinen anatomischen Merkmalen dienen.

Hier scheinen rotationssymmetrische, konfektionierte Systemkomponenten ungeeignet, eine perfekte Ästhetik zu erlangen. Aus diesem Grund wurden individuelle, anatomisch gestaltete Keramikabutments entwickelt. Mit Hilfe der CAD/ CAM-Technologie sowie innovativer

Materialien gelingt es unter Berücksichtigung biologischer und anatomischer Prinzipien, implantatgetragene Rekonstruktionen zu schaffen, die in Funktion und Ästhetik dem natürlichen Zahn sehr nahe kommen [74].

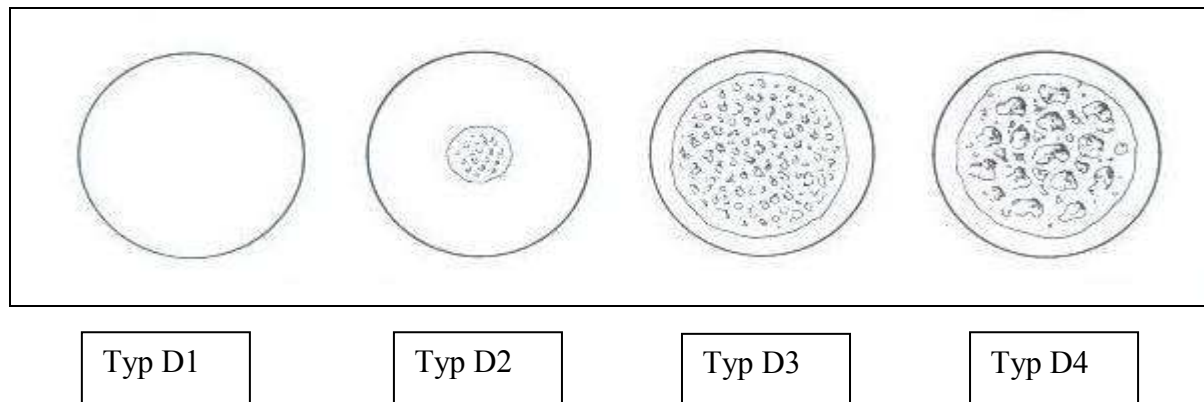
## **1.6 Primärstabilität von Implantaten**

Der Erfolg einer Implantatbehandlung hängt im Wesentlichen von einer sicheren und stabilen Verankerung im Knochen ab. Eine wichtige Rolle spielen Knochenvolumen und Knochen-dichte [86].

Die Primärstabilität von Implantaten ist einer der grundlegenden Faktoren für eine erfolgreiche Osseointegration und eine feste Verankerung des Implantats im Knochen [87]. Der Begriff Osseointegration wurde von Bränemark eingeführt, um den Kontakt zwischen Implantat- und Knochenoberfläche zu definieren. Eine gute Primärstabilität hängt von Knochenangebot und -dichte, der Operationstechnik und von der makroskopischen und mikroskopischen Beschaffenheit der Implantate ab. Studien von Friberg zeigten eine Implantatverlustrate von 32%, bei solchen Implantaten, die keine ausreichende Primärstabilität hatten [88].

### 1.6.1 Diagnose der Knochenstrukturen

Abb. 3: Schematische Darstellung der Knochendichte. Die einzelnen Typen werden in Tabelle 2 beschrieben. Nach Lekholm/ Zarb 1985 [89].

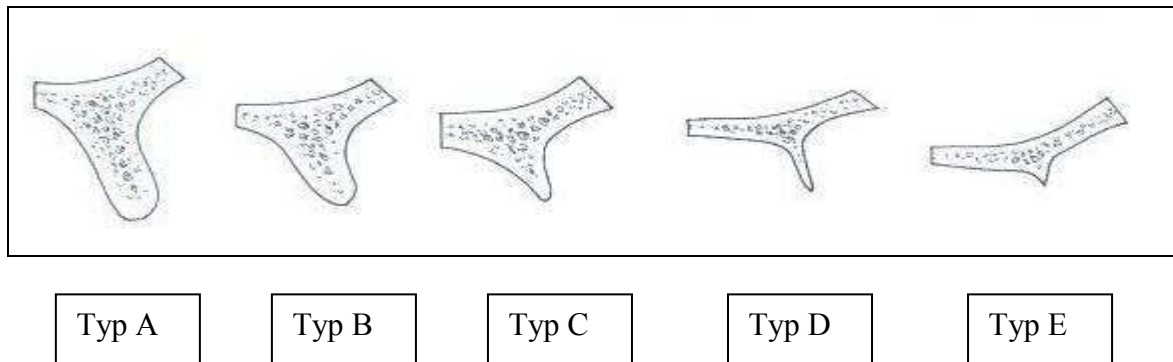


Die obige Einteilung wurde als „Misch System“ bekannt und teilt die Knochenqualität nach deren radiologischer Erscheinung in vier Klassen ein (Typ D1-D4) [90].

Tab. 2: Die vier Knochenqualitäten nach Lekholm/ Zarb 1985 [89].

<u>Knochentyp</u>	<u>Eigenschaften/ Qualität des Knochens</u>
Typ I	Fast ausschließlich kompakte Knochensubstanz
Typ II	Dichte Spongiosa umgeben von breiter Kortikalis
Typ III	Dichte Spongiosa umgeben von dünner Kortikalis
Typ IV	Lockere Spongiosa umgeben von dünner Kortikalis

Abb. 4: Schematische Darstellung der fünf Knochenatrophiegrade im Oberkiefer nach Lekholm/ Zarb 1985 [89]. Eine Beschreibung der Atrophiegrade gibt Tabelle 3.



Tab. 3: Klassifikation der Knochenquantität (Zitzmann/Schärer) [70].

Typ	Beschreibung
A	Fast vollständiger Alveolarkamm, Sinusboden oberhalb der Apices ( $\geq 14$ mm Restknochenhöhe)
B	Geringe Alveolarkammresorption/ Pneumatisation bis ins mittlere Wurzel Drittel (11-13 mm Restknochenhöhe)
C	Fortgeschrittene Resorption des Basalbogens/ Pneumatisation bis ins mittlere Wurzel Drittel (7-10 mm Restknochenhöhe)
D	Beginnende Resorption des Basalbogens /Pneumatisation bis ins zervikale Wurzel Drittel (3-6 mm Restknochenhöhe)
E	Extreme Resorption des Basalbogens/ Pneumatisation bis zur Kortikalis ( $\leq 2$ mm Restknochenhöhe)

Mit gängigen Diagnoseverfahren der Radiologie war bisher nur eine vage Bestimmung der Knochenqualität möglich. Durch Verbesserung der bildgebenden Verfahren und Entwicklung der Computertomografie steht mittlerweile ein zuverlässiges und genaues Mittel zur Verfügung, um die Morphologie und Qualität des Knochens zu beurteilen [91]. Spezielle Software erleichtert die Knochendichtebestimmung über sogenannte Hounsfield-Einheiten (HU). Jeder Stoffgruppe werden Werte zugeordnet. Luft -1000, Fett -50, Wasser 0, Weichgewebe +40 und Knochen bis +1000 [92]. Werte über 600 HU deuten auf eine sehr dichte Kortikalis hin, Werte von 400-600 auf einen dichten Knochen und Werte kleiner 200 auf Knochen geringer Dichte. Diese Einteilung funktioniert jedoch nur, wenn während der Bildgebung eine standardisierte

Referenz verwendet wird. Um die Knochendichte klinisch intraoperativ zu bestimmen, behilft man sich mit einer taktilen Untersuchung während der Präparation des Implantatbettes [93]. In einer Studie kamen Trisi und Rao zu dem Ergebnis, dass es intraoperativ für den Operateur zwar möglich ist, taktil zwischen Knochentyp D1 und D4 zu differenzieren, jedoch eine Unterscheidung von Knochentyp D2 und D3 nicht möglich ist. Die taktile Untersuchung der Knochendichte ermöglicht also die Unterteilung in weichen, normalen und dichten Knochen [94].

Eine weitere Möglichkeit der periimplantären Knochenbestimmung ist die Messung des Eindrehmoments. Einige Studien zeigten eine hohe Korrelation zwischen Eindrehmoment und Knochendichte. Liegen die Werte des Eindrehmoments am Ende bei 25 Ncm, kann mit einer ausreichenden Knochenfestigkeit gerechnet werden. Die beste und genaueste Möglichkeit der Bestimmung der Knochenbeschaffenheit ist eine histologische Untersuchung einer Gewebeprobe. Diese Verfahrensweise ist jedoch in der klinischen Praxis zu aufwändig und stellt somit keine gute Alternative dar [95].

### **1.6.2 Implantatauswahl**

Titan hat sich als Werkstoff in der Implantologie bewährt. Seine guten biomechanischen Eigenschaften erlauben eine Integration in das Gewebe. Die Oberfläche dieser Titanimplantate war zu Beginn glatt. Versuche haben allerdings gezeigt, dass durch Veränderung der Implantatoberfläche von einer möglichst glatten hin zu einer rauen Oberfläche die absolute Kontaktfläche von Implantat und Knochen vergrößert wird und die Osseointegration begünstigt [96]. In der Vergangenheit wurde immer wieder versucht, weitere Oberflächenveränderungen der Implantatoberfläche zu erzielen, um die primäre Verankerungsfunktion zu verbessern. Verschiedenste Methoden kommen zur Anwendung: Sandstrahlung, die Beschichtung mit Hydroxylapatit oder Titan Plasma besprühte Implantate. Ebenso kommt die Oberflächenätzung mit Salz- oder Schwefelsäure zur Anwendung. Eine Studie von Buser et al zeigt die höchsten Werte von Implantat und Knochenkontakt bei sandgestrahlten oder geätzten Implantaten [97]. Die Beschichtung von Implantaten mit Hydroxylapatit verhilft zu einer besseren Einheilung und Erhöhung der Stabilität. Jedoch hat sich Hydroxylapatit in Langzeitstudien als nicht optimal erwiesen. Über Erosion der HA-Schicht wurde berichtet. Ebenso über periimplantären Knochenverlust und demzufolge hohe Fehlerraten bei HA beschichteten Implantaten [98, 99].



Abb. 5: Implantate verschiedener Typen und Hersteller (Quelle: Praxis Dr. Dr. Bonsmann, Dr. Diener, Düsseldorf)

Um die Titanimplantate noch belastbarer zu machen, wird Titan einem Kaltwalzverfahren unterzogen. So gehärtetes Titan besitzt eine um 30 % erhöhte Dauerfestigkeit. Die Kurzzeitbelastungskapazität kann um bis zu 70 % erhöht werden. Auf diese Weise lässt sich die Langzeitbelastungskapazität einer herkömmlichen MK II Fixtur mit 3,75 mm Durchmesser soweit erhöhen, dass sie einer MK II Fixtur mit dem Durchmesser 4,0 mm entspricht.

Bei der Formgestaltung der Implantate wurde viel experimentiert. Die gängigsten in der Praxis eingesetzten Implantate sind heute Schrauben- oder Zylinderimplantate.

Für Patienten mit schlechter Knochenqualität wurden in den 80er Jahren selbstschneidende Implantate entwickelt. Ebenso wurden Implantate hergestellt, die mittels eines doppelten Gewindes die Einbringzeiten der Fixtur halbierten, ohne dabei höhere Temperaturen im umgebenden Knochen zu erzeugen. Durch doppelte Gewinde passiert nur jeder zweite Gewindegang ein bereits angelegtes Gewinde, was eine geringere Belastung für Gewinde in fragilem Knochen bedeutet.

Um den Einfluss der Implantatform auf die Primärstabilität zu bestimmen, untersuchten O'Sullivan et al in einer Studie fünf Implantattypen. Es kamen verschiedenen Geometrien und Oberflächenstrukturen zur Anwendung. Standardimplantate (Nobel Biocare AB, Göteborg,

Schweden), das Mark II (Nobel Biocare AB, Göteborg, Schweden), das Mark IV (Nobel Biocare AB, Göteborg, Schweden), das Astra Tioblast (AstraTech AB, Molndahl, Schweden) und das 3i Osseotite (3I [Implant Innovations Incorporated], Palm Beach, Florida, USA). Die Implantate zeigten alle eine gute Primärstabilität im Knochentyp II und III (siehe Abb. 3 und Tab. 2). In Knochen vom Typ IV zeigte das Mark IV eine gute Stabilität. Auch im Vergleich aller Knochentypen zeigte das Mark IV Vorteile [100].

Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass die Auswahl des geeigneten Implantats vor allem in Knochen geringer Dichte eine bedeutsame Rolle spielt. Der Einsatz von Standardimplantaten (3,75 mm) in Regionen geringer Knochendichte führt zu hohen Verlustraten [88, 93]. Durch den Einsatz von Implantaten mit größerem Durchmesser (5-5,5 mm) wird die Verankerungsfläche größer und somit auch die Voraussetzung für gute Osseointegration verbessert. Der maximale Implantatdurchmesser wird vom Knochenangebot bestimmt. So ist der Einsatz von breiteren Implantaten nur bei einer Alveolarkammbreite von mindestens acht Millimetern indiziert [101, 102]. Die Auswahl des Implantats hängt vom Knochenangebot ab. Meist wird das größtmögliche Implantat gewählt, um eine möglichst große Implantat-Knochen-Kontaktfläche zu erhalten.

### **1.6.3 Operationsprinzipien und Methoden zur Bestimmung der Implantatstabilität**

Grundsätzlich ist es immer von Vorteil, mindestens eine 1,5 mm dicke Knochensubstanz auf jeder Seite der Fixtur zu haben und 2-3 mm Abstand zu Nachbarzähnen oder anderen anatomischen Strukturen zu wahren [103]. Verschiedenste Operationstechniken zur Verbesserung der Primärstabilität in Knochen geringer Dichte wurden entwickelt. Bikortikale Verankerungen, Sinuslift oder die Knochenverdichtung mittels Osteotomie sind heute gebräuchlich. Ziel der Osteotomie ist es, möglichst viel Knochensubstanz bei der Präparation des Implantatbetts zu erhalten. Dies geschieht durch ein Handinstrument, das mit seinem konkaven Arbeitsende den Knochen des Implantatbetts verdichtet, ohne ihn abzutragen. Glauser beschreibt in einer Studie den Einsatz der Osteotomietechnik bei 101 Implantaten und kam zu dem Ergebnis, dass diese Technik eine gute Alternative zur traditionellen Bohrtechnik darstellt. Speziell bei der Aufbereitung von spongiossem Knochen ist die Osteotomietechnik der herkömmlichen Bohrtechnik überlegen [104].

Während der Operation beruht die Bestimmung der Primärstabilität eines Implantats auf den subjektiven Wahrnehmungen des Chirurgen. Mit dieser Methode lässt sich die Beweglichkeit eines Implantats wie folgt einteilen: ein unbewegliches Implantat, ein teilweise bewegliches Implantat, welches drehbar aber horizontal stabil ist oder lateral und vertikal bewegliche Implantate [105]. Um eine ausreichende Primärstabilität in Knochen geringer Dichte zu erreichen, hat die Präparation mit höchster Genauigkeit zu geschehen. Die Knochendichtebestimmung sollte präoperativ anhand von geeigneten Bilddaten oder zumindest intraoperativ taktil und per Drehmoment erfolgen. Die Richtung des Implantats soll zwischen den einzelnen Aufbereitungsschritten kontrolliert werden. Der letzte Bohrzyklus sollte nicht auf maximaler Tiefe durchgeführt werden. Die Insertion des Implantats sollte unter leichter Belastung erfolgen [106].

### **1.7 Sofortbelastung von Implantaten**

Der erfolgreiche Einsatz von Zahnimplantaten aus Titan als Basis für Prothesen im zahnlosen Patienten gilt heutzutage als begründete Therapieform und ist durch zahlreiche Studien gesichert. Den meisten jener Studien liegt jedoch ein zweizeitiges Implantationsverfahren zugrunde. Beruhend auf den Leitlinien für eine erfolgreiche Osseointegration, muss eine ausreichende Einheilphase gewährt werden, um maximalen Implantat-Knochen-Kontakt zu erreichen. Die Osseointegration, wie sie von Bränemark beschrieben wurde, verlangt eine Einheilphase des Implantats, um eine ausreichende Resorption des bei der Präparation nekrotisierten Gewebes und die Knochenneubildung zu gestatten. Der Erfolg dieses Konzepts steht außer Frage. Die relativ lange Behandlungsdauer hat jedoch dazu geführt, neue Konzepte der Therapie zu entwickeln und umzusetzen. Eines der Ziele der modernen Implantologie ist die Verkürzung der Behandlungsdauer. Besonders für Patienten ohne Restbezaehlung ist eine lange Einheilzeit und somit das Tragen einer Interimsversorgung eine Belastung. Die sofortige oder frühe Belastung (*immediate/ early loading*) von Implantaten stellt eine Alternative zur herkömmlichen zweizeitigen Technik dar. Der Zeitraum für ein solches Immediate oder Early Loading liegt zwischen dem Tag der Implantatinsertion und zwei Wochen danach. Andere Autoren sind der Meinung, dass geringe Belastungen für eine schnelle und erfolgreiche Knochenregeneration förderlich sind. Ein möglicher Vorteil einer Sofortbelastung wird in der Mikrobewegung des Knochens gesehen. Eine geringe Belastung fördert die physiologische

Knochenregeneration. Studien an Tieren haben gezeigt, dass eine Sofortbelastung eine stärkere Knochenreaktion hervorruft [107].

Um eine Sofortbelastung durchzuführen, bedarf es einer speziellen Diagnostik, da hier die Struktur des Knochens eine wichtige Rolle spielt. Zur Analyse dient hier neben der bildgebenden Diagnostik die Messung des Eindrehmoments bei der Implantatinsertion. Das Eindrehmoment korreliert eng mit der Knochendichte und kann dann als Maß dienen, die Knochenqualität zu beurteilen. Auch einige andere Methoden zur Evaluation der Stabilität von Implantaten wurden in einer Studie vorgestellt [108].

In klinischen und radiologischen Untersuchungen von Ericsson et al an Implantaten mit und ohne Sofortbelastung wurde die Überlebensrate von interforaminalen Fixturen untersucht. Nach einer fünfjährigen Verlaufskontrolle war zu erkennen, dass die Sofortbelastung von interforaminalen Implantaten über feste Suprastrukturen zu guten Ergebnissen führt. Auch das Verhältnis der Knochenresorption entsprach dem der herkömmlichen zweizeitigen gesetzten Implantate [109].

Die Implantation von interforaminal im Unterkiefer gesetzten Implantaten mit anschließender kontrollierter Sofortbelastung ist nach Studien von Henry und Rosenberg als ein klinisch zuverlässiges Verfahren anzusehen, welches bei verschiedensten Implantattypen möglich ist [110].

Berichte über erfolgreiche Behandlungen mit Dentalimplantaten aus Titan sind zahlreich vorhanden. Den meisten dieser Studien liegt jedoch ein zweizeitiger Ablauf zugrunde. Ziel einer Studie von Degidi und Piatelli ist der Vergleich der Erfolgsraten von sofortbelasteten Implantaten und einer Kontrollgruppe, die nach Standardprotokoll behandelt wurde. Insgesamt wurden 646 Implantate an verschiedenen Lokalisationen gesetzt. Davon wurden 422 sofort belastet, 224 blieben ohne Belastung. Man kam zu dem Ergebnis, dass die Implantation mit und ohne sofortige Belastung zu guten Ergebnissen führt. Eine genaue Evaluation der Situation ist jedoch Voraussetzung [111].

Die Sofortbelastung von Implantaten am zahnlosen Kiefer bietet dem Patienten zahlreiche Vorteile wie die Fähigkeit nach der Implantation zu essen und einen größeren Heilungskomfort. Becker und Wong zeigten, wie durch frühe Belastung (innerhalb einer Woche) der Komfort für zahnlose Patienten deutlich verbessert wird, da durch das Tragen einer implantatgetragenen Prothese schon kurz nach dem Eingriff eine Funktionalität geboten ist

[112]. Die hohen Erfolgsraten oraler Implantate haben immer wieder zu Versuchen geführt, die Behandlungsprotokolle und -abläufe zu variieren [113]. Der zeitliche Aspekt ist ein weiterer wichtiger Faktor. Im Gegensatz zur herkömmlichen Behandlung mit drei- bis viermonatiger Heilungsphase wird die Zahl der Patientenbesuche reduziert. In einer Studie von Chee und Jivray wurde durch Sofortbelastung die Frequenz der postoperativen Praxisbesuche minimiert [114]. Eine sorgfältige und strikte Patientenauswahl ist für eine erfolgreiche Sofortbelastung unbedingt erforderlich. So können mögliche Probleme und Kontraindikationen einer frühen Belastung ausgeschlossen werden. Die Patientencompliance ist bei derartigen Implantaten von großer Bedeutung [115].

### **1.7.1 Voraussetzungen für die Sofortbelastung**

Die Ergebnisse aus zahlreichen Studien haben gezeigt, dass Sofortbelastung in allen oralen Bereichen und mit unterschiedlichsten prothetischen Versorgungen möglich ist [116-119].

Folgende Punkte sind jedoch bei der Behandlung zu berücksichtigen:

Sofortbelastete Implantate müssen eine hohe Primärstabilität aufweisen. Unterschiedliche Knochenqualitäten und -quantitäten sowie vorbereitende Maßnahmen beeinflussen die Stabilität. Eine sichere Implantatverankerung ist ein Muss und Eindrehmomente von 35 Ncm bis 45 Ncm sollten erreicht werden. Die Belastungen der Implantate müssen kontrolliert erfolgen. Schon bei der Behandlungsplanung sollten mögliche Belastungsfaktoren wie Hebelwirkungen, laterale Kontakte, instabile Okklusion und starker Bruxismus oder andere ausgeprägte Parafunktionen erkannt und reduziert werden. In einigen Fällen kann die Okklusion während der ersten zwei bis drei Monate nach der Implantatinsertion verringert werden. Durch eine Dreiecksanordnung der Implantate lässt sich die Belastung minimieren, da Biegekräfte vorwiegend in axialer Richtung ausgeglichen werden.

Eine osseokonduktive Implantatoberfläche (z.B. TiUnite oder Beschichtungen mit Hydroxylapatit) unterstützt den Heilungsprozess und beugt einer Reduzierung der Implantatstabilität während der Einheilungsphase vor.

Weitere Ein- und Ausschlusskriterien für eine Sofortbelastung sind:

- gesunde und kooperative Patienten mit guter Mundhygiene

- gute gingivale, parodontale und periapikale Zustände an den Nachbarzähnen
- eine günstige und stabile Okklusion
- keinerlei apikale Erkrankungen oder Entzündungen der Implantationsstelle
- ein ausreichendes Knochenvolumen, gute Knochendichte
- kein ausgeprägter Bruxismus

### **1.7.2 Risiken der Sofort- oder Frühbelastung**

Eine Sofortbelastung eines Implantats ist im weicheren Oberkieferknochen im Gegensatz zum festeren Unterkiefer meist schwierig. Im Bereich von Knochendefekten hängt eine gute Knochenneubildung von stabilen Bedingungen ab [120]. Eine übermäßige Bewegung des Implantats führt anstelle der Osteogenese zur Bildung von Weichgewebe. Laut den Untersuchungen von Albrektsson et al zählen neben der Implantatform, dem Zustand des Implantatbetts auch eine präzise chirurgische Technik zu den Größen, die das Ergebnis einer Sofortbelastung ebenso wie bei zweizeitigem Vorgehen beeinflussen können [121]. In jedem Fall muss vermieden werden, ein zu breites Implantatbett zu präparieren, da dies die Osseintegration verhindert [122]. Studien an sofort belasteten Implantaten, die mit provisorischen Prothesen versorgt wurden, zeigten nach Langzeitbeobachtungen über einen Zeitraum von zehn Jahren eine Erfolgsrate von 84,7%, wohingegen die Referenzgruppe der herkömmlich belasteten Implantate eine Erfolgsquote von 100% aufwies [123].

Es wird vermutet, dass die Sofortbelastung bei guter Knochenqualität auch im Oberkiefer angewendet werden kann. Studien, die Daten von Implantaten im Oberkiefer schlechter Knochenqualität liefern, existieren zum größten Teil nur für das zweizeitige Verfahren zum Inserieren von Bränemark-Implantaten [124]. Studien zur Sofortbelastung von Oberkieferimplantaten liegen bisher nur wenige vor und haben meist einen kurzen Beobachtungsverlauf. Die geringe Festigkeit des Oberkieferknochens stellt ein Risiko für die Sofortbelastung dar, denn die Drehmomente bei der Insertion im Oberkiefer liegen selten über 20 Ncm [125].

### **1.7.3 Sofortbelastung von Implantaten in anderen medizinischen Fachgebieten**

Auch aus anderen Bereichen der Medizin ist die Sofortbelastung von Implantaten bekannt. Implantate dienen unter anderem einer knöchernen Verankerung von Ohrprothesen im Processus mastoideus. In einer Studie von Tjellström und Granstrom wurden 216 Patienten untersucht, von denen 161 sofortbelastete Implantate erhielten. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl das einzeitige als auch das zweizeitige Vorgehen zu guten Ergebnissen führt. Von 161 sofortbelasteten Implantaten gingen 4 (2.5%) verloren; eine fast identische Quote war bei den herkömmlich belasteten Implantaten zu erkennen [126].

In der Orthopädie werden besondere Ansprüche an die frühe Belastungsfähigkeit gestellt, da die hier auftretenden Kräfte eine große Belastung für ein Implantat darstellen. Andererseits ist es aus medizinischer Sicht nicht vorteilhaft den Patienten lange zu immobilisieren, da sich sonst Embolien entwickeln können. In Studien von McCutchen et al wurde deutlich, dass die frühe Belastung von Hüftimplantaten möglich ist und zu ausgezeichneten Ergebnissen führt [127]. Ebenso zeigten Whiteside et al, wie durch frühe zyklische Belastungen einer Hüftgelenksplastik ein verbesserter Halt bei zementlos inserierten Implantaten zustande kam [128].

## **1.8 Komplikationen**

### **1.8.1 Intraoperative Komplikationen, Nervenschädigungen, Perforationen und Hämatome**

Das Risiko von Nervenverletzungen, vor allem des Nervus alveolaris inferior und des Nervus lingualis, besteht bei zahlreichen chirurgischen Eingriffen [129]. Immer wieder wird in Studien von Patienten berichtet, die nach Implantation im Unterkiefer über Taubheit von Wangen und Unterlippe klagen [130]. Ein Ablösen des mukoperiostalen Lappens und Abtragen von Knochen zur Übersichtsgewinnung als potentiell Risiko und Sensibilitätsstörungen sind zu erwarten [131]. Die genaue Begutachtung radiologischer Aufnahmen ist zur Vermeidung solcher Komplikationen unerlässlich. Bei Studien an vierhundertfünf Implantaten kamen Bartling et al zu dem Ergebnis, dass 8,5% der Patienten über veränderte Empfindung berichteten, von denen jedoch keine länger als vier Monate persistierte. Durch eine richtige Behandlungsplanung, wenn möglich mit CT, können Implantate mit minimalem Risiko für den Nervus trigeminus gesetzt werden [132]. Risiken einer Nervenverletzung müssen dem Patienten immer vor der Behandlung dargelegt werden, um ihm die Möglichkeit zu geben, zwischen einer Versorgung mit Implantaten oder einer alternativen Behandlung zu wählen [133].

Wird der Unterkieferknochen zu weit lingual präpariert, kann es zur Perforation und zur Verletzung kleiner Gefäße im Mundboden kommen, woraus sich lebensgefährliche Blutungen entwickeln können [134]. Derartige Blutungen breiten sich im Mundboden aus und blockieren die Luftröhre, was einen chirurgischen Eingriff nötig macht. Jeder Implantologe sollte Kenntnisse über solche Komplikationen und deren Behandlung haben [135]. Die Nähe einer Klinik mit für solche Notfälle ausgebildeten Spezialisten sollte gesucht werden, um eine schnelle und effektive Behandlung zu erhalten [136]. Auch wenn solch heftige Komplikationen selten sind, werden einige Fälle in der Literatur beschrieben. Weibrich et al berichten von einer lebensbedrohlichen intraoperativen Blutung aus der Arteria sublingualis, deren variantenreicher Verlauf nicht immer diagnostiziert werden kann. Sie ist bei Perforationen der lingualen Kortikalis besonders gefährdet [137].

### **1.8.2 Postoperative Komplikationen, Sensibilitätsstörungen, Implantatverlust, Gingivaverletzungen, Frakturen und Forensik**

Dauerhafte Schäden, verursacht durch das Einsetzen von Implantaten im Unterkiefer, sind selten, aber nicht ausgeschlossen. Gleiches lässt sich über das Vorhandensein von Studien dieser Problematik sagen [138]. In der Studie von Ellis et al litten weniger als 1% der Patienten nach einem Jahr noch an Sensibilitätsstörungen [139]. Falls es zur Beschädigung eines Nerven kommt, sind genaue Untersuchungen vorzunehmen. Die Reparatur eines geschädigten Nerven sollte während der ersten vier Monate erfolgen, da sonst eine dauerhafte Beeinträchtigung der Sensibilität bestehen bleibt. Die besten Aussichten für eine Genesung bietet eine schnelle und angemessene Behandlung [133].

Die Gründe für den Verlust von Implantaten sind vielfältig. Durch ein falsches Implantatlager, entstanden aus Fehleinschätzungen der anatomischen Strukturen oder ungenauem Bohren, wird die primäre Stabilität und erfolgreiche Osseointegration verhindert.

Etwa die Hälfte der in der Studie von Adell et al dokumentierten Implantatverluste ereigneten sich als initialer Verankerungsverlust [86]. Als Gründe hierfür werden unzulängliche Operationstechniken und Überbelastungen durch die provisorischen prothetischen Versorgungen genannt. Die andere Hälfte der Implantatverluste ereignete sich durch späten Verlust der Verankerungsfunktion. Solch ein Verlust wird in der Regel bei radiologischen Nachuntersuchungen als dünne, periimplantäre Transluzenz erkennbar und ist selten mit subjektiven oder klinischen Symptomen verbunden. Eine Traumatisierung des Gewebes bei der Implantation oder schlecht sitzende und suboptimal gestaltete Prothetik können ebenfalls die Erfolgchancen mindern.

Eine durch falsche Belastungsverhältnisse hervorgerufene frische Implantatfraktur lässt sich im Röntgenbild schwer erkennen. Die Fraktur eines Implantates wird oftmals als rascher marginaler Knochenabbau bei der Röntgenkontrolle diagnostiziert. Wird ein rapider Knochenabbau erkannt, muss die Suprakonstruktion entfernt und jedes Implantat auf seine Stabilität hin geprüft werden. Adell et al kamen zu dem Ergebnis, dass alle Implantatfrakturen, die bei 3% der Patienten der Studie vorkamen, die Folge einer insuffizienten Suprakonstruktion waren [86]. Eine exakte prothetische Planung, den individuellen Belastungsverhältnissen entsprechend, mindert das Risiko von Fehl- und Überbelastungen und somit einer Implantatfraktur.

Perforationen der Gingiva wurden in einer Studie von Adell bei weniger als 5 % der behandelten Patienten festgestellt. Ursachen sind mangelnde Adaptation der Wundränder, Granulombildung durch Nahtreste oder ulzerierende Druckstellen. Während eine unzureichende Nahtvereinigung am Tag der Kontrollvisite korrigiert werden kann, sind Perforationen, die während der ersten sechs Wochen auftreten, durch Exzision, Lappenmobilisierung und erneutes Vernähen zu behandeln [86]. Proliferiert die Schleimhaut aufgrund zu kurzer Pfeiler oder eines fehlenden chirurgischen Verbandes, kann sie die Übergangsstelle zwischen Pfeiler und Suprastruktur bedecken, was zu traumatischen Ulzerationen führt. In Studien von Adell et al betrug die Häufigkeit solcher Komplikationen 7% [86]. Zur Therapie gilt Gingivektomie oder eine Lappenoperation als Mittel der Wahl. Eine minimalinvasive Operation minimiert das Risiko derartiger Komplikationen. Falls dies nicht möglich ist, muss auf eine sorgfältige Wundversorgung geachtet werden. Eine schwere wenn auch seltene Komplikation, insbesondere bei alten Menschen mit starker Atrophie des Knochens, ist die Fraktur der Mandibula nach der Insertion von Implantaten. Man geht davon aus, dass die Ursachen solcher Frakturen falsche oder zu starke okklusale Belastungen im Bereich der noch nicht osseointegrierten Implantate sind. Wiederholte forcierte Belastungen eines Implantats können zu Spontanfrakturen ohne begleitendes Trauma führen. Allzu oft wird solch ein Unterkieferbruch gar nicht oder erst nach einiger Zeit vom Patienten bemerkt. Der Abbau des Unterkieferknochens durch Osteomyelitis erhöht bei Patienten mit geschwächtem Immunsystem die Frakturgefahr [140, 141].

Eine sorgfältige Voruntersuchung des Knochenangebots und ein schonendes chirurgisches Vorgehen sind Grundvoraussetzungen. Gleiches gilt für die postoperative Versorgung. Radiologische Nachkontrollen sollten regelmäßig durchgeführt werden, um eine Periimplantitis und Knocheninfektionen frühzeitig zu erkennen [142]. In jedem Fall ist eine Aufklärung des Patienten über eine derartige Komplikation durchzuführen. Außerdem ist sein postoperatives Verhalten entsprechend anzupassen.

Die Zahl der Implantationen wächst stetig. Immer häufiger werden auch kritische Fälle behandelt, was eine Steigerung der Komplikationsrate erwarten lässt. Viele Probleme entstehen aus falscher Behandlungsplanung und mangelhafter Umsetzung. Schadensersatzklagen sind bekannt [143]. Curley beschreibt, wie die Unkenntnis rechtlicher Gesichtspunkte in der Zahnmedizin, insbesondere in der Implantologie, den Praktizierenden immer wieder unnötigerweise gerichtlichen Klagen aussetzt. Mit einem gewissen Verständnis rechtlicher Belange und durch Vorkehrungen in den Behandlungsabläufen, z.B. das Standardisieren von

Abläufen und die exakte Dokumentation prä- und postoperativer Daten, kann dazu beigetragen werden, eine Verwicklung in Schadensersatzklagen zu vermeiden [144]. CT- und DVT-Daten helfen bei der Identifizierung des Knochenangebots und der richtigen Implantatposition. Eine genaue Dokumentation ist möglich und erlaubt so eine Beurteilung des Ergebnisses [145]. Dies ist auch aus forensischer Sicht von Vorteil, da dem Arzt umfangreiche Daten für eine Verlaufskontrolle zur Verfügung stehen. Schadensfälle sollten von den Ärzten so schnell wie möglich ihrem Versicherer gemeldet werden, um professionelle Hilfe zu erhalten. Gute Planung und Umsetzung sind Grundvoraussetzungen, denn die meisten Klagen betreffen Körperverletzung und Unzufriedenheit mit dem Ergebnis [146].

## 2 Fragestellung

In der vorliegenden retrospektiven Studie sollen die Nutzer eines Navigationsgerätes (RoboDent) Angaben zu folgenden Fragenkomplexen machen:

Welches waren die Gründe für die behandelten Patienten, sich die Implantate mit dem RoboDent-System setzen zu lassen, und wie war die Patientenakzeptanz des Verfahrens?

Wurden alle geplanten Implantate auch inseriert, und wie beurteilten die Operateure die Position der Implantate im Vergleich zur Planung?

Kam es bei der Implantatsetzung unter Verwendung des Navigationsgerätes zu Verletzungen gefährdeter Strukturen wie z.B. dem Nervus mandibularis?

War es durch die Knochendichtemessung in der Planungsphase und die navigierte Umsetzung der Planung möglich, eine Primärstabilität der Implantate zu erreichen?

Wie war das Verhältnis zwischen Aufklappen des Operationssitus und einer Schleimhautstanzung unter Navigationsbedingungen, und welche Begleitmorbiditäten wurden für das jeweilige Verfahren angegeben?

Konnte die präoperative prothetische Planung mit virtuell gesetzten Implantaten postoperativ umgesetzt werden, und wie häufig wurde von der Möglichkeit die Prothetik präoperativ anzufertigen Gebrauch gemacht?

Gab es Probleme mit der Bildgebung in Bezug auf die Implantatplanung, und welche möglichen Probleme traten intraoperativ bei der Navigation auf?

### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 CT/ DVT- basierte Navigation mit dem RoboDent System**

##### **3.1.1 Systembeschreibung RoboDent**

Das in dieser Studie eingesetzte System RoboDent verfügt als komplettes klinisches System sowohl über Schnittstellen zu standardisierten Bildgebungsverfahren als auch zu dental-chirurgischem Instrumentarium und lässt sich optimal in die Behandlung eingliedern.

RoboDent erfasst über Sensoren die exakte Lage von Patient und Instrument. Es erlaubt eine freie Instrumentenführung im Raum und erfordert vom Behandelnden deshalb kein Abweichen von der gewohnten Behandlung. Die Zielführung erfolgt über optische und akustische Signale. Die Instrumentenlage relativ zum Patienten wird virtuell dargestellt.

##### **3.1.1.1 Systemarchitektur von RoboDent**

RoboDent wurde in unserer Klinik speziell für die Zahnheilkunde entwickelt und lässt sich als Zusatzgerät bequem in die vorhandene Praxisumgebung integrieren. Ein Weiterarbeiten mit den gewohnten chirurgischen Instrumenten ist möglich. Es besteht aus folgenden Komponenten:

Der RoboDent Navigationsplattform, der RoboDent Software (einer DICOM-Software), der Implantatplanungssoftware, der Implantatbehandlungssoftware und der Archivierungssoftware.

### 3.1.1.2 Hardware des RoboDent-Systems

#### 3.1.1.2.1 Die mobile RoboDent- Station



Abb. 6: Die mobile RoboDent-Station (Quelle: Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité)

Das komplette RoboDent-System ist auf einer mobilen Station untergebracht, welche eine vollständige und leichte Integration in den individuellen Behandlungsraum ermöglicht. Es erlaubt so für jeden Behandelnden und sein Team die optimale Ausrichtung. Auf dem mobilen Wagen befindet sich auch der PC, der die Basis für die Software darstellt. Er ist an eine unterbrechungsfreie Stromversorgung gekoppelt. So lässt sich auch bei Stromausfall ein Inselbetrieb sicherstellen, und die Behandlung wird nicht beeinträchtigt.

Das Tracking-System verfügt über Schnittstellen zu Navigationskameras. Die optischen Systeme Ropal und Polaris (NDI, Ontario) sind kompatibel. Die Navigationskamera ist über einen Schwenkarm an der Station freihängend angebracht.

An der Navigationsschiene am Patienten, die auch während der Bildaufnahmen eingesetzt war, wird ein passiver Tracker reproduzierbar angebracht.

Dieser passive Tracker für die Navigationsschiene am Patientenkiefer ist mit 3 Glaskugeln als Reflektionskörper bestückt. Durch Spiegelung des Infrarotlichtes der Kamera kann durch Triangulation eine Lageerfassung der Navigationsschiene erfolgen.

Auch am Winkelstück wird ein solcher optischer Tracker angebracht. Er wird über einen sterilisierbaren Adapter mit dem chirurgischen Winkelstück verbunden.

Die Genauigkeit der Lagerfassung wird vom Hersteller mit 0,35 mm/ 0,5 Kubikmeter angegeben.

Abb. 7



Abb. 8



Abbildung 7 zeigt die Patientennavigationsschiene, Abbildung 8 den am Winkelstück befestigten Tracker (Quelle: Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité).

### 3.1.1.2.2 Der Touchscreen und Spaceball

Über den desinfizierbaren Touchscreen ist es dem Behandelnden möglich, notwendige Eingaben zu machen sowie verschiedene Ansichten und Daten aufzurufen.

Der Spaceball 4000 erlaubt neben einer Auswahl und Zoomfunktion die Bewegung und Interaktion in sämtlichen Ebenen des virtuellen Kiefermodells.



Abb. 9: Der Touchscreen mit Maus und Spaceball (Quelle: Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité).

### 3.1.1.2.3 Der Miniaturmonitor

Als zusätzliches audiovisuelles Ausgabegerät steht ein Mini-Display zur Verfügung. Es lässt sich direkt neben dem Operationssitus platzieren und macht so einen ständigen Blickwechsel zum Touchscreen überflüssig. Dies steigert die Konzentrationsfähigkeit des Behandelnden auf den Operationssitus.



Abb. 10: Der schwenkbare Miniaturmonitor an der Station (Quelle: Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité).

### 3.1.1.3 Die Software des RoboDent-Systems

Die Aufgabe der RoboDent-Software besteht zunächst darin, die individuelle Situation des Patienten virtuell darzustellen. Das System berechnet aus den Bilddaten des Patienten und anhand bekannter Geometrien der Referenzkörper ein virtuelles Modell. Der Behandelnde kann nun in der Planungssoftware Zahl und Lokalisation der geplanten Implantate bestimmen. Die Bewegung der 3D-Bilder auf dem Monitor ist in allen Freiheitsgraden möglich. Die Bewegung erfolgt rein intuitiv mit dem Spaceball oder einer herkömmlichen Maus. Nach Abschluss der Planung werden die Daten archiviert.

Der Transfer zwischen Planungssoftware und Eingriffsassistent erfolgt automatisch. Hier ist seitens des Benutzers kein Eingreifen vorgesehen. Während der Operation berechnet der Computer aus den Daten der Infrarotkamera laufend die genaue Position von Patient und Instrument. Abweichungen von der Soll-Situation werden dem Benutzer in geeigneter Weise vom System dargestellt. Die Software berechnet die Lage des Bohrers im Kamerakoordinatensystem. Nach erfolgter Positionsberechnung werden die entstandenen Werte auf dem Touchscreen und dem Miniaturmonitor optisch für den Behandelnden dargestellt. Dieser zeigt neben Abweichungen von der Ziellage und der Bohrtiefe Informationen über den Systemstatus und die ermittelte Bohrerlänge.

Die Abbildungen 11-14 zeigen die verschiedenen Ansichten der Software während der Arbeitsschritte (Quelle: Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité).



Abb. 11: Software-Startseite

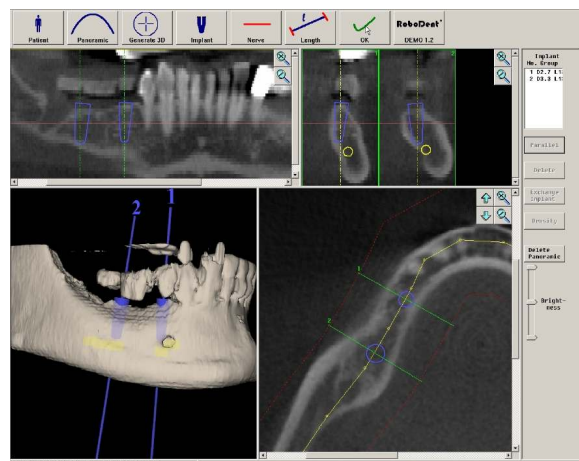


Abb. 12: Software-Planung

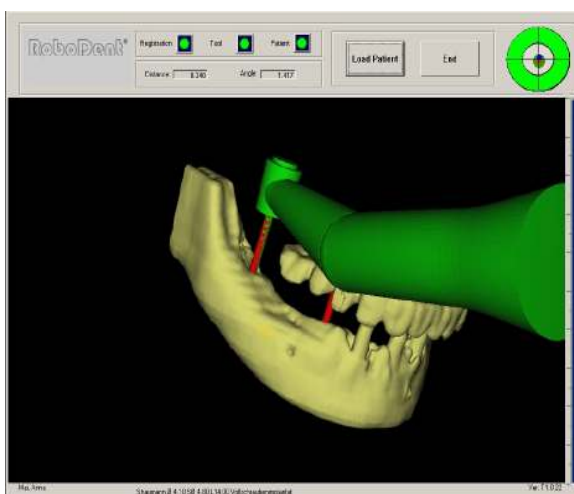


Abb. 13: Software-Navigation

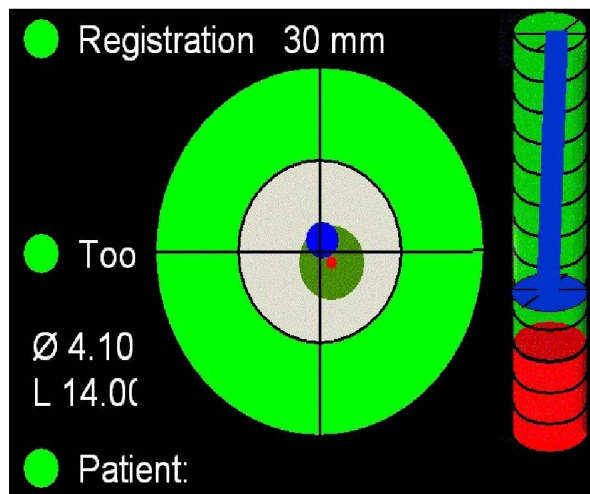


Abb. 14: Software-Navigation

### **3.1.1.3.1 CT/ DVT als Basis für die RoboDent-Behandlung**

RoboDent benötigt für die Berechnung des virtuellen Operationssitus hochauflösende Bilddaten. Diese werden im DICOM-Format eingelesen. Das System verfügt über ein CD-Laufwerk und kann so medizinische Bilddaten von herkömmlichen CT-Verfahren oder Schichtbilder, eines sog. Cone-Beam-Computertomographen (NEWTOM; DVT-9000) einlesen.

Obwohl die Wahl des eingesetzten Bildgebungsverfahrens vom Implantologen abhängt, bestehen doch Unterschiede zwischen einem NEWTOM und einem normalen CT.

Ein Cone-Beam-CT zeichnet sich durch kürzere Scanzeiten aus. Die Strahlenbelastung für den Patienten wird reduziert. Eine für den Betrachter verbesserte Auflösung und niedrigere Betriebskosten als beim CT sprechen ebenfalls für Cone-Beam-CTs.

Das NEWTOM bietet jedoch keine mit dem CT vergleichbare Abbildung von Weichgewebe. Es erfolgt keine Kalibrierung der Knochendichte. Anstelle einer Knochendichtemessung wird nur ein Vergleich der Knochendichte durchgeführt.

Die Durchführung eines Dental-CT am Patienten erfolgt üblicherweise beim Radiologen.

Während der Aufnahme muss der Patient die zuvor angefertigte Bisschiene mit dem Navigationsbogen tragen. Diese muss unbedingt richtig und fest eingesetzt werden, da sonst die exakte Darstellung gefährdet ist. Die Lagerung des Patienten während der Aufnahme hat so zu erfolgen, dass die Axialschichten parallel zur Bisschiene aufgenommen werden. Während der Aufnahme darf sich der Patient nicht bewegen.

Der an der Bisschiene befestigte Navigationsbogen muss vollständig in der CT-Aufnahme zu sehen sein. Andernfalls ist die Aufnahme zu wiederholen.

Die Bilddaten müssen anschließend vom Radiologen im DICOM-Format gespeichert und auf einen mobilen Datenträger (CD-R/ DVD-R) kopiert werden.

### **3.1.1.3.2 Bilddaten- und Patientenregistrierung**

Die Grundlage für die Registrierung bildet die Tatsache, dass bekannte Geometrien von Referenzpunkten während der Bildherstellung und der Operation an exakt der gleichen Position am Patienten angebracht sind.

Damit RoboDent die vorhandenen Bilddaten aus CT/ DVT verwerten kann, wurde dem Patienten während der Aufnahme die Navigationsschiene eingesetzt. Diese definiert mit drei Referenzpunkten ein Koordinatensystem. Durch einen Algorithmus erfolgt eine automatische Erkennung der Lage des Referenzkörpers. Solche Marker bestehen üblicherweise aus Titanstiften oder -kugeln. Diese Marker werden automatisch in den Bilddaten erkannt und verarbeitet. Eine interaktionslose automatische Patientenregistrierung stellt so eine hohe Präzision sicher.

Die automatisierte Registrierung funktioniert wie folgt:

Die Grauwertbereiche der eingesetzten Marker werden in den Datensätzen segmentiert. Durch sogenanntes „region-growing“ werden die segmentierten Voxel in zusammenhängende Volumenbereiche gruppiert. Ein Vergleich der bekannten Markergeometrie mit jener der Voxelbereiche erlaubt eine erste Vorauswahl.

Voxelgruppen, die Abbildungen von Markern darstellen, müssen in ihrer geometrischen Anordnung mit der Anordnung der Originalmarker übereinstimmen. Dies erfolgt durch eine Schwerpunktbestimmung der Voxelgruppen. Nach einer Umformung in Vektoren erfolgt ein Abgleich der Schwerpunkt- und Originalvektoren. Dies erfolgt bis zur sicheren Identifizierung von vier Markern. Durch eine zweite Stufe werden die ermittelten Werte nochmals ausschließlich untereinander mit demselben Verfahren auf Übereinstimmung mit den Originaldaten geprüft.

Intraoperativ erfolgt die Lagebestimmung über einen passiven Tracker mittels optischer Reflektoren. An der Navigationsschiene und dem Winkelstück werden jeweils Glaskugelreflektoren mit bekannter Geometrie befestigt und von der Navigationskamera erfasst.

Die Gesamtgenauigkeit des Systems hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Fehler in der Bildgebung oder in der Instrumentenkalibrierung sowie Fehler in der Patientenregistrierung

machen die Navigation fehlerhaft oder unmöglich. Durch ein exaktes Einhalten des Behandlungsablaufs und vorgabengetreue Umsetzung in der Datenerhebung werden derartige Genauigkeitsfehler ausgeschlossen.

### **3.1.1.3.3      *Intraoperative Navigation***

Zu Beginn der Behandlung wird mit dem Instrument der Navigationsbogen berührt und so die Instrumentenlänge vermessen. Ein akustisches Signal bestätigt die Kalibrierung. Nun erscheint das Winkelstück neben einer 3D-Ansicht des Kiefers, auf dem die Implantatachsen zu erkennen sind. Der Behandelnde führt nun das Instrument entsprechend der vorgegebenen Richtung und Achsen.

Auf dem schwenkbaren Minidisplay neben dem Patientenmund ist ein Fadenkreuz zu sehen. Dieses zeigt in blauer Farbe die Position und in grüner Farbe die Achse des Bohrers an. Befindet sich der Bohrer an der exakten Position und in der richtigen Achse, ändert das Display seine Farbe auf Grün und der Bohrvorgang kann beginnen. Ein Balken auf der rechten Seite des Displays zeigt die Bohrtiefe an und warnt durch optische und akustische Signale vor zu tiefem Bohren.

### **3.1.1.4      *Arbeitsflussplan der Behandlung mit dem RoboDent-System***

Die Behandlung mit dem RoboDent-System beruht auf einem dreiphasigen Aufbau:

#### **3.1.1.4.1      *Die Vorbereitungsphase:***

Zu Beginn der Behandlung erfolgen eine intensive Patientenaufklärung und eine Beratung des Patienten hinsichtlich des geplanten Eingriffs. Behandlungsalternativen werden aufgezeigt und die Implantation mit dem RoboDent-System erläutert.

Die nun folgende Evaluation beinhaltet die Befundaufnahme und Diagnostik der individuellen Situation des Patienten.

Eine Situationsabformung und anschließende Modellherstellung erlaubt eine prothetische Situationsbestimmung, mit deren Hilfe anschließend eine Interimsversorgung gefertigt werden kann.

Provisorische Implantate kommen bei zahnlosen Patienten zum Einsatz. Solche provisorischen Sofortimplantate ermöglichen eine stabile Versorgung ab dem Zeitpunkt der Implantation, die das Weichgewebe im Gegensatz zur konventionellen provisorischen Versorgung entlastet. Das Ergebnis ist eine sichere Einheilung, welche besonders in Fällen mit Knochen- und Weichgewebsaugmentation von entscheidender Bedeutung ist.

Provisorische Implantate werden in einem Abstand von 3 mm zu den definitiven Fixturen gesetzt. Außerdem empfiehlt es sich, die provisorischen Implantate entlang einer kortikalen Knochenwand zu setzen, um eine höhere Stabilität zu gewährleisten. Eine Osseointegration, wie bei definitiven Versorgungen, ist bei provisorischen Implantaten nicht gewünscht.

Zu den Kontraindikationen für die Verwendung provisorischer Implantate zählt eine unzureichende Knochentiefe, ein zu geringer kortikaler Knochen sowie die Unmöglichkeit, ausreichend viele provisorische Implantate zu setzen um die temporäre Versorgung zu tragen.

Die provisorischen Implantate werden vor oder zum Zeitpunkt der prothetischen Versorgung mit den definitiven Implantaten entfernt. Die Tragedauer der provisorischen Implantate entspricht ungefähr der Einheilzeit der definitiven Implantate.

Bei der Behandlung mit dem RoboDent dienen solch vorübergehende Implantate (IPI), dazu, den provisorischen Zahnersatz zu stabilisieren und später, während der Operation, zur Befestigung der Navigationsschiene. Auf diese Weise wird die Ausgangssituation verbessert, da der Patient am Ende der Vorbehandlung über einen nach funktionellen und ästhetischen Anforderungen gefertigten provisorischen Zahnersatz verfügt.

#### **3.1.1.4.2 Die Planungsphase:**

Nach erfolgter Situationsabformung und Modellherstellung erfolgt die Duplizierung des exakten Set-Ups der Interimsversorgung mit farblosem PMMA-Kaltpolymerisat.

Vom Zahntechniker wird nun ein systemspezifischer Navigationsbogen am Duplikat befestigt.

Nachdem eine röntgenopake Substanz aufgetragen wurde, kann nun die navigierte Röntgendiagnostik im CT/ DVT durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden als DICOM-Datensatz gespeichert und anschließend mit der RoboDent-Planungssoftware computergesteuert verarbeitet.

#### **3.1.1.4.3 Die intraoperative Navigationsphase:**

Während der Operation wird das Instrument computergesteuert vom RoboDent-System navigiert. Es erfolgt eine Positionierung der Implantate entsprechend der zuvor durchgeführten Computerplanung. Ein komplikationsloses Einsetzen und eine 1:1 Umsetzung der Planung sind das Ergebnis.

#### **3.1.1.5 Probleme bei der Anwendung des RoboDent-Systems**

##### ***3.1.1.5.1 Notwendigkeit hochwertiger Bilddaten:***

RoboDent arbeitet auf der Grundlage hochauflösender Bildgebungsverfahren wie CT oder DVT. Das bedeutet eine erhöhte Strahlenbelastung des Patienten im Vergleich zu herkömmlichen Diagnoseverfahren. Allerdings ist es nur auf diese Weise möglich, alle wichtigen Strukturen zu erkennen, das Knochenangebot zu beurteilen und computergenerierte räumliche Modelle zu entwerfen. Normalerweise gibt es in einer herkömmlichen Praxis kein CT und die Zahl der NEWTOM-Standorte in Deutschland ist noch begrenzt.

### **3.1.1.5.2      *Schulung des Personals:***

Die Arbeit mit dem RoboDent-System erfordert zu Beginn sicherlich eine Anpassung der Verhaltensweisen im Operationssaal. Zwar lässt sich das System bequem in die vorhandene Einrichtung integrieren, da RoboDent aber mit optischen Detektoren an Patienten und Instrument arbeitet um deren Lage im Raum zu berechnen, müssen der Behandler und das Personal unbedingt darauf achten, dass die Reflexionswege nicht durch die Assistenz oder den Behandelnden verdeckt werden. Dies kann beim Absaugen der Fall sein. Auch OP-Tücher oder ähnliches können den Strahlenweg blockieren. Eine derartige Unterbrechung macht eine Neukalibrierung des Systems notwendig. Nach einer Einarbeitungsphase für das Team wird dieses Problem meist eliminiert.

## **3.2 Studienaufbau**

### **3.2.1 Vorbemerkung**

Zurzeit wird die überwiegende Zahl von Implantaten nach eindimensionaler Einzeichnung der Implantatpositionen in das OPTG-Röntgenbild frei hand in den Kiefer des Patienten eingesetzt. Selten werden Röntgen- oder Bohrschablonen dabei als Hilfsmittel benutzt. Nur geringe Mengen von Implantaten werden bisher unter Verwendung von Planungsprogrammen in Kombination mit CT- oder DVT-Daten entweder frei hand oder an Schablonen orientiert eingesetzt.

Die Navigation versetzt den Implantologen nun in die Lage, seine Implantatplanung exakt auf den Patienten zu übertragen. Notwendig ist dafür allerdings eine hochwertige Bildgebung (CT, DVT) und die Verwendung eines entsprechenden Planungsprogramms.

### **3.2.2 Primäres Ziel**

Primäres Ziel ist es die Planung so umzusetzen, dass die Implantate chirurgisch und prothetisch optimal positioniert sind.

### **3.2.3 Sekundäres Ziel**

Sekundäre Ziele sind:

- keine Verletzung gefährdeter Strukturen (z. B. Nervus mandibularis)
- Primärstabilität der Implantate
- minimalinvasives operatives Vorgehen
- Umsetzung einer navigationsgestützten prothetischen Sofortversorgung
- Umsetzung der prothetischen Versorgung entsprechend der Planung

Anhand des folgenden Fragebogens erfolgten die Datenerfassung und deren Auswertung:

### 3.2.4 Allgemeine Angaben

Für jeden Patienten werden folgende allgemeine Angaben erhoben:

Klinik-/Praxiscode	1- 8
Operateurcode	Klinikcode + Operateurcode (2-stellig)
Bildgebung	Computertomographie <input type="checkbox"/> DVT <input type="checkbox"/>
Patientencode	Klinik-/ Praxiscode + 8-stellige Patientennummer
Patientenalter	
Patientengeschlecht	w <input type="checkbox"/> m <input type="checkbox"/>
Erfolgte eine Aufklärung über alternative Operationsverfahren?	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
RoboDent-Software (Version)	<u>1.xx</u>
CT/ DVT	

### 3.2.5 Implantate

Zurzeit ist eine metrische Evaluation, ob die Implantatpositionen im Kiefer der Planung entsprechen, nicht möglich. Dies wird in einer prospektiven Studie mit geänderter Software möglich sein. In dieser Studie soll die subjektive Beurteilung des Operateurs evaluiert werden.

Implantatlokalisierung (pro Implantat ein Kästchen)																		
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Wurde die Operation entsprechend der Planung umgesetzt?	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
Gründe, warum die Planung nicht umgesetzt wurde (Freitext)	<hr/> <hr/> <hr/>
Wurden die geplanten Implantate gesetzt	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
Welche Implantate wurden nicht entsprechend der Planung gesetzt?	<hr/> <hr/> <hr/>
Gründe, warum geplante Implantate nicht gesetzt wurden (Freitext)	<hr/> <hr/> <hr/>

### 3.2.6 Minimalinvasive Operation

Es soll geklärt werden, ob durch die Navigation vermehrt auf Aufklappungen zur Implantatsetzung verzichtet werden konnte und stattdessen lediglich eine Stanzung durchgeführt werden konnte.

Es wurde eine Stanzung durchgeführt	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Es wurde eine Aufklappung durchgeführt	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Angabe von Gründen für bzw. gegen eine Stanzung bzw. Aufklappung (Freitext)	_____ _____ _____	
Bei welchen Implantatpositionen wurde eine Aufklappung durchgeführt?	_____ _____	
Bei welchen Implantatpositionen wurde eine Stanzung durchgeführt?	_____ _____	
Welche Komplikationen ergaben sich intraoperativ bei der Aufklappung?	keine <input type="radio"/> (Freitext) _____	
Welche Komplikationen ergaben sich intraoperativ bei der Stanzung?	keine <input type="radio"/> (Freitext) _____	
Welche Komplikationen ergaben sich postoperativ bei der Aufklappung?	keine <input type="radio"/> (Freitext) _____	
Welche Komplikationen ergaben sich postoperativ bei der Stanzung?	keine <input type="radio"/> (Freitext) _____	
Schmerzen postoperativ bei Aufklappung	keine <input type="radio"/>	mittel <input type="radio"/> stark <input type="radio"/>
Schmerzen postoperativ bei Stanzung	keine <input type="radio"/>	mittel <input type="radio"/> stark <input type="radio"/>
Schwellung postoperativ bei Aufklappung	keine <input type="radio"/>	mittel <input type="radio"/> stark <input type="radio"/>
Schwellung postoperativ bei Stanzung	keine <input type="radio"/>	mittel <input type="radio"/> stark <input type="radio"/>
Hämatom postoperativ bei Aufklappung	keine <input type="radio"/>	mittel <input type="radio"/> stark <input type="radio"/>

Hämatom postoperativ bei Stanzung	keine <input type="radio"/>	mittel <input type="radio"/>	stark <input type="radio"/>	
OPERATIONSZEIT (Schnitt – Nahtzeit)	_____ <u>min</u>			
Art der Anästhesie bei Aufklappung	ITN <input type="radio"/> Sed <input type="radio"/>	Leitung <input type="radio"/>	LA <input type="radio"/>	Mikrojet <input type="radio"/>
Art der Anästhesie bei Stanzung	ITN <input type="radio"/> Sed <input type="radio"/>	Leitung <input type="radio"/>	LA <input type="radio"/>	Mikrojet <input type="radio"/>
Zeitdauer der beruflichen und sozialen Beeinträchtigung bei Aufklappung	kurz <input type="radio"/>	(1-3 Tage)		
	mittel <input type="radio"/>	(4-7 Tage)		
	lang <input type="radio"/>	(>7 Tage)		
Zeitdauer der beruflichen und sozialen Beeinträchtigung bei Stanzung	kurz <input type="radio"/>	(1-3 Tage)		
	mittel <input type="radio"/>	(4-7 Tage)		
	lang <input type="radio"/>	(>7 Tage)		

### 3.2.7 Primärstabilität der Implantate

Auf Grund des Planungsprogramms ist es möglich, sowohl das Knochenangebot als auch die Knochendichte im Bereich der geplanten Implantatsetzung zu prognostizieren. Es ist daher von Interesse, ob die genaue Planungsumsetzung zu einer Primärstabilität geführt hat.

Primärstabilität vorhanden	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Primärstabilität nicht vorhanden bei Implantatpositionen	_____	
Angabe von Gründen, warum Primärstabilität nicht erreicht worden ist (Freitext)	_____ _____ _____	

### 3.2.8 Schonung des Nervus mandibularis und anderer Strukturen

Durch das Navigationssystem ist es möglich, Implantate gesichert so zu setzen, dass keine Strukturen geschädigt werden. Dies soll überprüft werden.

Wurde der N. mandibularis verletzt?	ja	<input type="radio"/>	nein	<input type="radio"/>
Wurde die Kieferhöhle perforiert?	ja	<input type="radio"/>	nein	<input type="radio"/>
Wurde die Kortikalis perforiert?	ja	<input type="radio"/>	nein	<input type="radio"/>
Wurde der Nasenboden perforiert?	ja	<input type="radio"/>	nein	<input type="radio"/>
Gründe warum eine Struktur verletzt wurde	_____			

### 3.2.9 Prothetik entspricht der Planung

Auf Grund der eingearbeiteten prospektiven Prothetik in die Navigationsschienen können die Implantate in korrekter Position unter der Suprakonstruktion positioniert werden. Insofern ist ein Abgleich zwischen geplanter und umgesetzter Prothetik ein Hinweis auf die Nützlichkeit der Navigation.

Angaben zur Art der Prothetik (Krone, Brücke, Prothese)	_____ _____ _____			
Wurde die Prothetik wie geplant umgesetzt?	ja	<input type="radio"/>	nein	<input type="radio"/>
Wurde die Prothetik gegenüber der Planung geändert?	ja	<input type="radio"/>	nein	<input type="radio"/>
Warum wurde die Prothetik gegenüber der Planung verändert (Freitext)?	_____ _____ _____			

### 3.2.10 Prothetische Sofortversorgung

Die prothetische Sofortversorgung von Implantaten ist nach wie vor in der wissenschaftlichen Diskussion. Mit der navigierten Implantatsetzung ist es möglich, bereits präoperativ die prothetische Suprakonstruktion herzustellen, indem die Planung auf das Technikermodell übertragen wird. Es sollen neben Argumenten für oder gegen eine Sofortversorgung geprüft werden, ob die navigationsgestützte Sofortversorgung eine ausreichende Präzision aufweist.

Erfolgte eine prothetische Sofortversorgung?	ja	<input type="radio"/>	nein	<input type="radio"/>
Angabe von Gründen für die Sofortversorgung (Freitext)	<hr/> <hr/> <hr/>			
Angabe von Gründen gegen die Sofortversorgung (Freitext)	<hr/> <hr/> <hr/>			
Art der Sofortversorgung (Krone, Brücke, Prothese)	<hr/>			
War eine Umarbeitung der Sofortversorgung nötig?	sofort	<input type="radio"/>	später	<input type="radio"/>
Warum war eine Umarbeitung der Sofortversorgung nötig? (Freitext)	<hr/> <hr/> <hr/>			

### 3.2.11 Problembeschreibung durch den Operateur

Im Rahmen der Evaluation der navigierten Implantatsetzung sollen mögliche Probleme der Prozessabläufe geklärt werden.

Gab es Probleme bei der Bildgebung?	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
wenn ja, welche	_____ _____ _____
Gab es Probleme bei der Planung?	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
wenn ja, welche	_____ _____ _____
Gab es Probleme bei der Navigationsschiene?	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
wenn ja, welche	_____ _____ _____
Gab es Probleme mit dem Navigationsgerät?	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
wenn ja, welche	_____ _____ _____

### 3.2.12 Bewertung der Behandlung durch den Patienten

Begründung für Navigation	
Implantate stehen genauer	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
Operation ist sicherer	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
höhere Erfolgswahrscheinlichkeit der OP	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
Sonstiges (Freitext)	_____ _____ _____
Bewertung der Operation	
sehr zufrieden	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
zufrieden	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
nicht zufrieden	ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>
Gründe, warum nicht zufrieden (Freitext)	_____ _____

## 4 Ergebnisse der retrospektiven Studie

### 4.1 Allgemeine Angaben

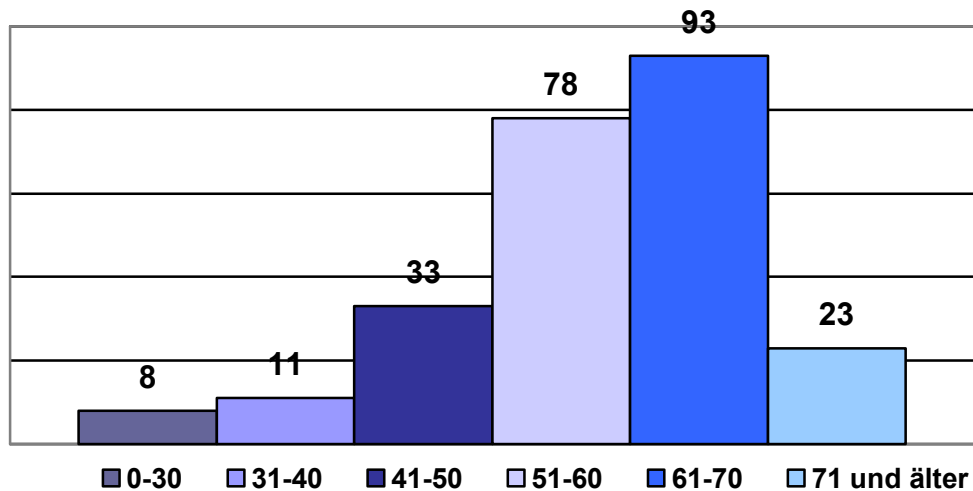
An der Studie waren 6 Praxen und 2 Kliniken beteiligt. Alle verfügten über ein RoboDent-Navigationsgerät mit den Softwareversionen 1.0-1.6. Insgesamt wurden bei 246 Patienten 1202 Implantate navigationsgestützt gesetzt. Es wurden 139 Frauen und 107 Männer behandelt.

Tabelle 4 zeigt die an der Studie beteiligten Zentren, die Anzahl der behandelten Patienten und die Zahl der gesetzten Implantate.

<u>Klinik/ Praxis</u>	<u>Zahl der Patienten</u>	<u>Zahl der Implantate</u>
Charité (CVK), Berlin	122	657
Prof. Dr. Dr. Esser, Osnabrück	16	41
Dr. Dr. Ch. Foitzik, Darmstadt	8	30
Dr. G.M. Henrich, Bad Homburg	44	193
Dr. Dr. Kah, Koblenz	22	46
PD Dr. Dr. Kniha, München	30	197
Dr. R. Luckey, Hannover	4	36
gesamt	246	1202

Das Durchschnittsalter der Patienten betrug 57,8 Jahre.

**Abb. 15: Altersverteilung der 246 Patienten der Studie**

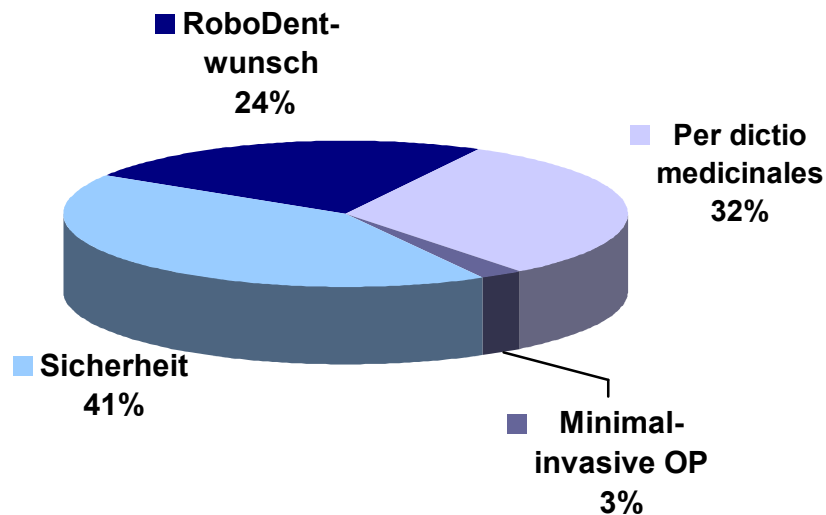


#### **4.2 Gründe für die Patienten an der Studie teilzunehmen und Akzeptanz der Behandlung**

Patienten stehen neuen Technologien in der Medizin unterschiedlich gegenüber. Es wurden Gründe und Akzeptanz der Patienten für das navigierte Verfahren von den Behandelnden gesammelt und beurteilt.

Alle Patienten wurden über alternative Behandlungsmethoden zur Navigation aufgeklärt. Als Gründe für die Entscheidung einer navigierten Implantatsetzung wurden neben Sicherheit und Nervenschonung auch die Empfehlung durch den Chirurgen und Minimalinvasivität genannt.

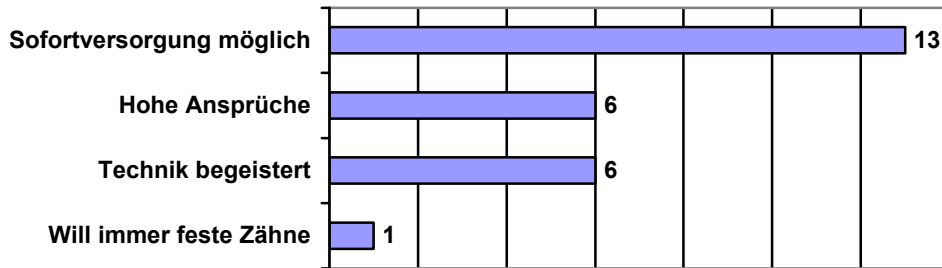
**Abb. 16: Patientenbegründung zur Teilnahme an der RoboDent-Studie**



Die Entscheidung, die Behandlung mit dem RoboDent-System durchführen zu lassen, wurde von den Patienten unterschiedlich begründet. Wenn nicht bereits durch den Chirurgen vorgegeben, erwarteten die Patienten vor allem eine sichere Behandlung. Gründe wie Nervenschonung, Angst, komplizierte Anatomie oder Lokalisation wurden angegeben.

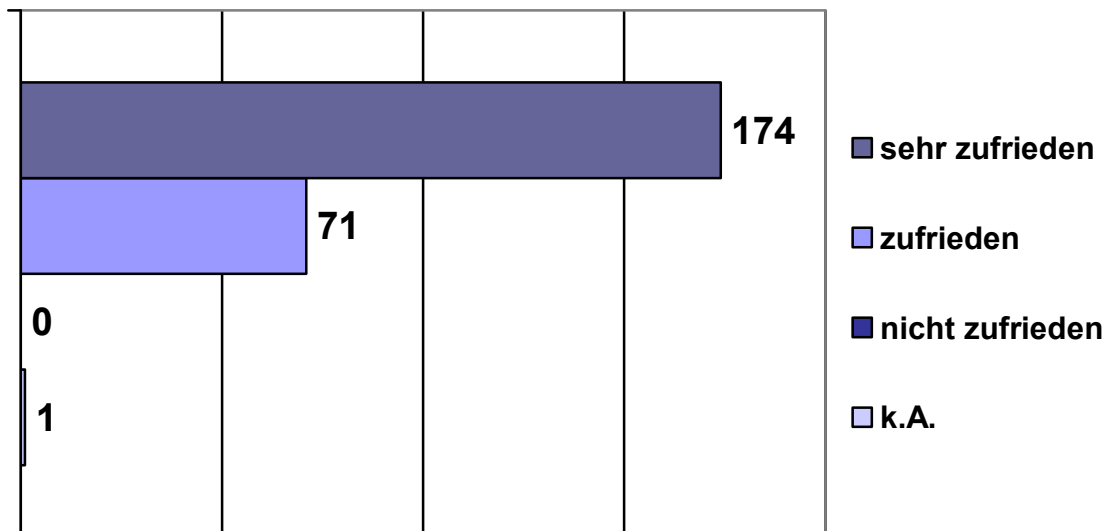
Patienten, die sich eine Implantatversorgung mit RoboDent wünschten, gaben außerdem folgende Gründe an:

**Abb. 17: Begründung der Patienten zur Versorgung mit RoboDent**



Zur Akzeptanz des navigierten Operationsverfahrens äußerten sich die Patienten postoperativ 174mal (71 %) sehr zufrieden, 71mal (29 %) zufrieden. Kein Patient äußerte Unzufriedenheit über die Behandlung. Von einem Patienten wurden hierzu keine Angaben gemacht.

**Abb. 18: Patientenzufriedenheit nach dem Einsatz des RoboDent-Systems**

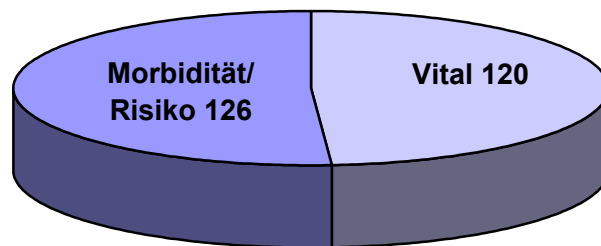


### 4.3 Diagnosen zur Morbidität und Erkennen von Risikogruppen

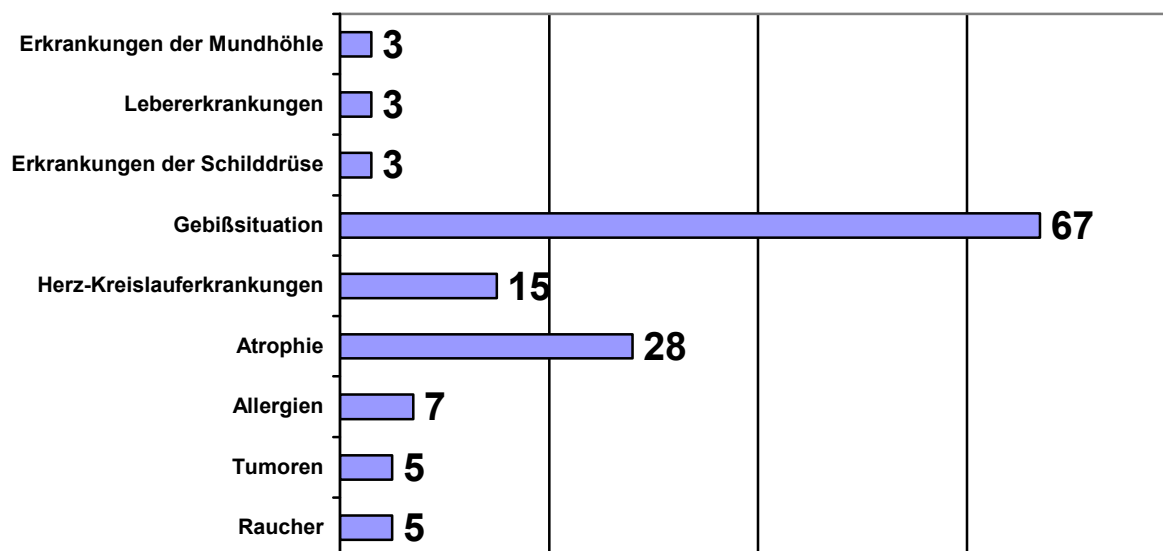
Bei allen Patienten erfolgte eine allgemeine Anamnese mit dem Zweck, eventuelle Risikopatienten zu finden und, wenn nötig, die Behandlung entsprechend anzupassen.

Abbildung 19 gibt Auskunft über das Auftreten pathologischer Erscheinungen im Patientengut. Eine Beschreibung in Form einer Gruppeneinteilung der Morbidität gibt die Abbildung 20.

**Abb. 19: Diagnosen zur Morbidität der 246 Patienten**



**Abb. 20: Das Auftreten pathologischer Veränderungen bei den Patienten**



In der Rubrik Erkrankungen der Mundhöhle wurden einmal die Gingivahypoplasie, einmal ein peripheres Riesenzellgranulom und einmal eine Xerostomie angegeben.

Unter der Rubrik Gebißsituation wurden 36 Freiendsituationen, 3 Einzelzahnücken, 1 Unfall, 1 sanierungswürdiges Restgebiß sowie ein Lückengebiß und 15 nicht erhaltungswürdige Restgebisse erfasst. In 3 Fällen wurde eine Parodontitis marginalis profunda diagnostiziert.

Die Rubrik Herz- Kreislaufferkrankungen beinhaltet Hypo- und Hypertonie, Herzschwächen und Infarkte.

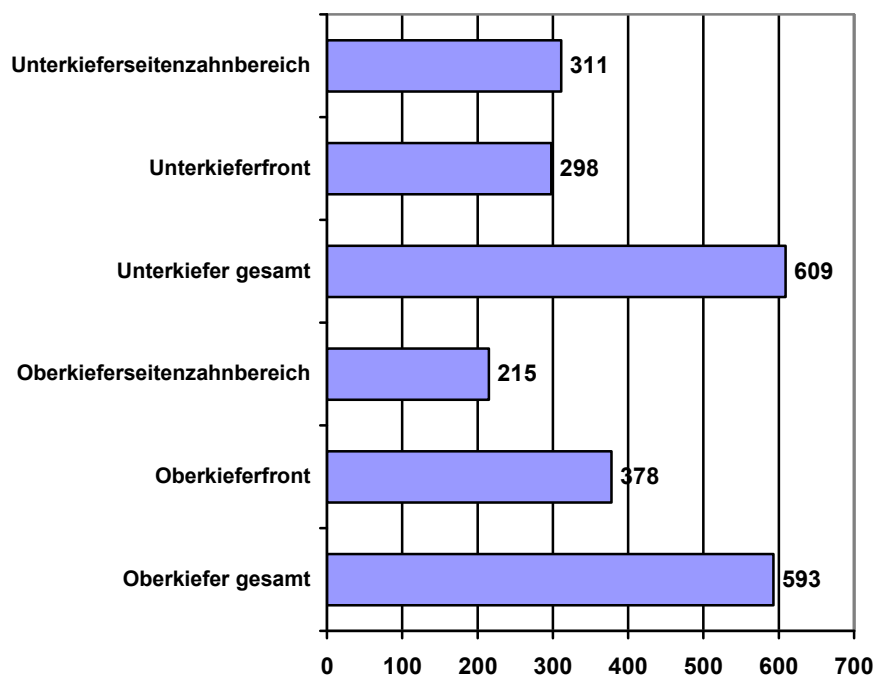
Allergien wurden in 7 Fällen angegeben. 6 davon gegen Penicillin und eine Nickelallergie.

Zwei der 5 angegebenen Tumoren waren Mundboden-Karzinome. In 2 Fällen handelte es sich um Mamma-Karzinome, in einem Fall wurde keine weitere Angabe gemacht.

#### 4.4 Implantate und Implantatpositionen

In dieser retrospektiven Studie wurden 1202 Implantate gesetzt. Es wurden unterschiedliche rotationssymmetrische Implantate mehrerer Hersteller verwendet, die unterschiedliche Typen, Längen und Durchmesser aufwiesen.

**Abb. 21: Regionen der eingesetzten Implantate**

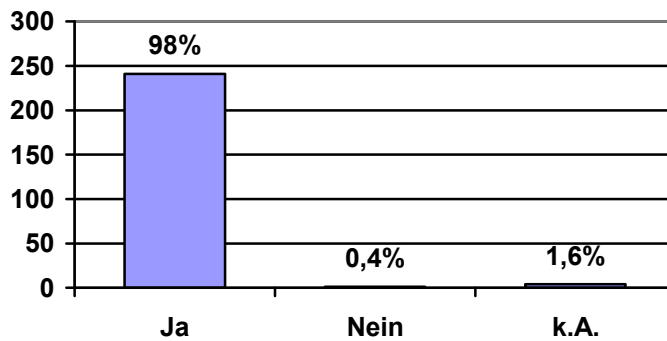


Bei 245 Patienten wurde die Operation entsprechend der Planung umgesetzt.

In einem Fall war dies nicht möglich. In regio 36 war der crestale Knochen zu dünn. Dieser erschien im CT breiter als im klinischen Bild.

In 241 Fällen konnten die geplanten Implantate gesetzt werden. In einem Fall wurde die Planungsumsetzung durch den Operateur geändert, um Primärstabilität zu gewähren. In vier Fällen wurde von den Behandelnden hierzu keine weitere Angabe gemacht.

**Abb. 22: Prozentuale Verteilung der Planungsumsetzung der 246 Implantate**



Die Implantatpositionen im dreidimensionalen Raum konnten geometrisch nicht mit der vorangegangenen Planung vergleichend gemessen werden. Dies ist erst mit der Software 1.7, die keinem der Nutzer zum Zeitpunkt dieser Studie zur Verfügung stand, möglich. Beurteilt wurden die Implantatpositionen im Vergleich zur Planung subjektiv durch die Operateure auf Grund des Operationsablaufs und der postoperativen Röntgenkontrolle.

#### **4.5 Durch den operativen Eingriff potentiell gefährdete Strukturen**

Potentiell gefährdete Strukturen bei der Implantatsetzung konnten durch das Navigationsgerät intraoperativ überwacht werden.

Beim Setzen von Implantaten im Unterkieferseitenzahnbereich (regio 34-37, 44-47) kam es in einem Fall zu einer vorübergehenden Hypästhesie des Nervus mandibularis durch eine Annäherung des Bohrers an den Canalis mandibularis.

Beim Setzen von Implantaten im Oberkieferseitenzahnbereich (regio 14-17, 24-27) wurde der Kieferhöhlenboden in 3 Fällen bewusst zum Zweck eines Sinuslifts perforiert.

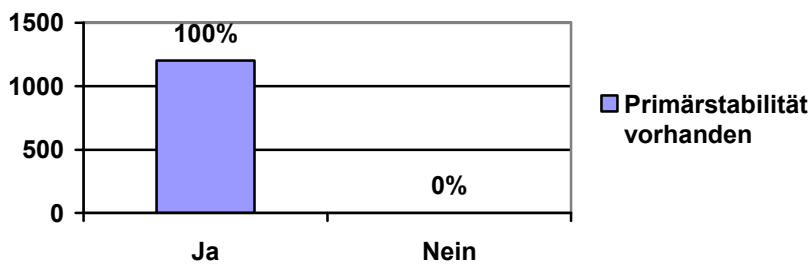
In keinem Fall wurde beim Setzen von Implantaten im Oberkieferfrontzahnbereich (regio 12-22) der Nasenboden perforiert.

#### 4.6 Primärstabilität der gesetzten Implantate

Die Primärstabilität der Implantate wird im Wesentlichen durch die Knochendichte bestimmt, die im Planungsmodul des Navigationssystems angezeigt und bei der Positionsplanung der Implantate berücksichtigt wird.

Die Angaben zur Primärstabilität wurden in von allen Behandelnden als positiv beantwortet. Es wurde bei allen 1202 gesetzten Implantaten an 246 Patienten eine ausreichende Primärstabilität der Implantate erreicht.

**Abb. 23: Vorhandene Primärstabilität der gesetzten Implantate in %**

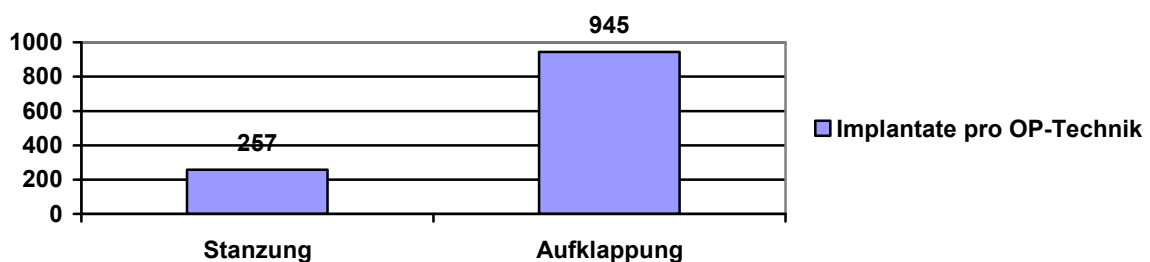


#### 4.7 Vergleich zwischen Stanzung und operativer Aufklappung

Es wurde der Frage nachgegangen, wie sich das Verhältnis zwischen Schleimhautstanzung und operativer Aufklappung unter Navigationsbedingungen darstellt. Darüber hinaus wurden Angaben zu Komplikationen, Schmerzen, Schwellungen, Hämatomen sowie beruflicher und sozialer Beeinträchtigung gemacht. Soweit möglich wurden Zeitangaben für das jeweilige operative Vorgehen gemacht.

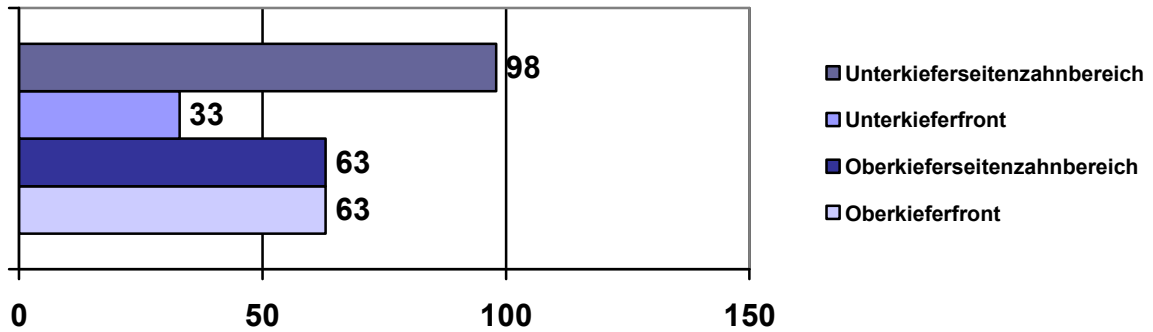
Bei 66 Patienten (26 %) wurden 257 Implantate durch Stanzung der Schleimhaut, bei 185 Patienten (72 %) 945 Implantate mit operativer Aufklappung gesetzt. 5 Patienten (2 %) wurden die Implantate sowohl durch Stanzung als auch durch Aufklappung gesetzt.

**Abb. 24: Häufigkeit der angewendeten OP-Technik bei der Implantation**



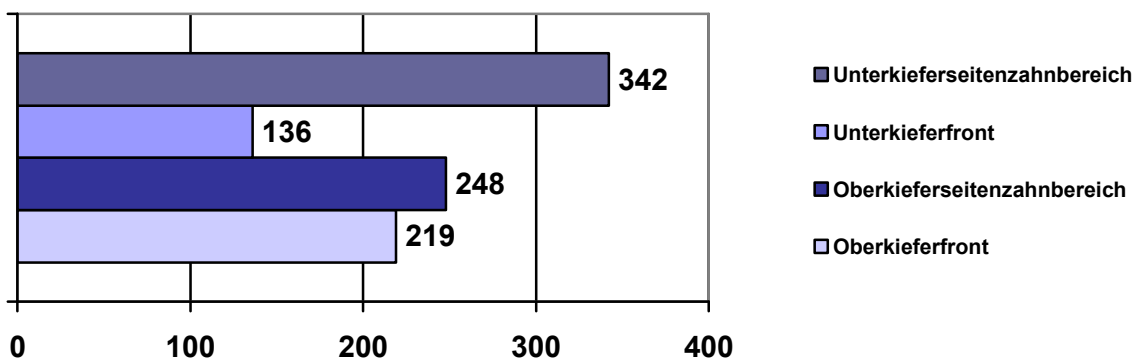
Die Anzahl der gesetzten Implantate pro Patient und Kieferregion, die durch Stanzung bzw. Aufklappung operiert wurde, ist in den Abbildungen 25 und 26 aufgeführt.

**Abb. 25: Regionen der durchgeführten Stanzung  
(Implantate pro Region)**



Bei 13 Patienten (20 %) wurde ein Implantat durch Stanzung gesetzt. Bei 32 Patienten (48 %) wurden 2-5 Implantate gesetzt, wobei bei 5 Patienten auch eine Aufklappung erfolgte. 21 Patienten (32 %) erhielten mehr als fünf durch Stanzung gesetzte Implantate. Außer in den Regionen 18, 48, 38 wurde in allen Regionen die Stanzung angewendet.

**Abb. 26: Regionen der durchgeführten Aufklappung  
(Implantate pro Region)**



Bei 9 Patienten (5 %) wurde jeweils ein Implantat durch Aufklappung gesetzt. Bei 111 Patienten (60 %) wurden 2-5 Implantate gesetzt. 65 Patienten (35 %) erhielten durch operative

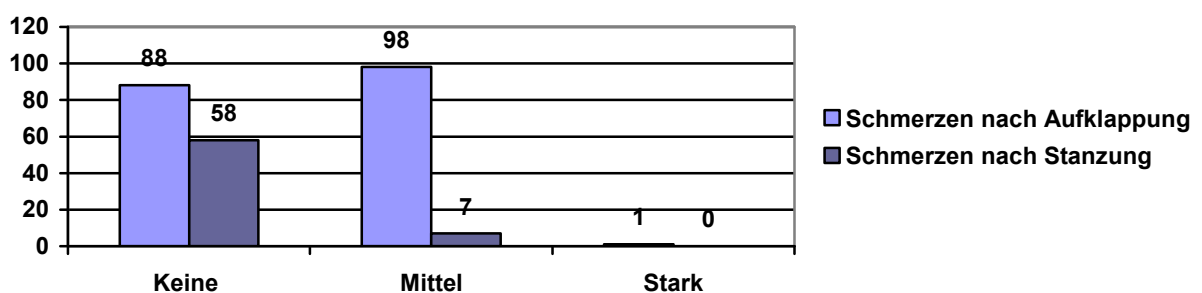
Aufklappung mehr als 5 Implantate, wobei 5mal auch eine Stanzung erfolgte. In allen Regionen außer 28, 38 und 48 kam eine Aufklappung zum Einsatz.

Es kam weder bei der Aufklappung noch bei der Stanzung zu intraoperativen Komplikationen.

Als postoperative Komplikationen wurden einmal ein Implantatverlust und einmal eine Nahtdehiszenz nach der operativen Aufklappung festgestellt. Bei der Stanzung kam es postoperativ in einem Fall zu einem Healingtausch und in einem weiteren zu einer Hypersensibilität an den Nachbarzähnen.

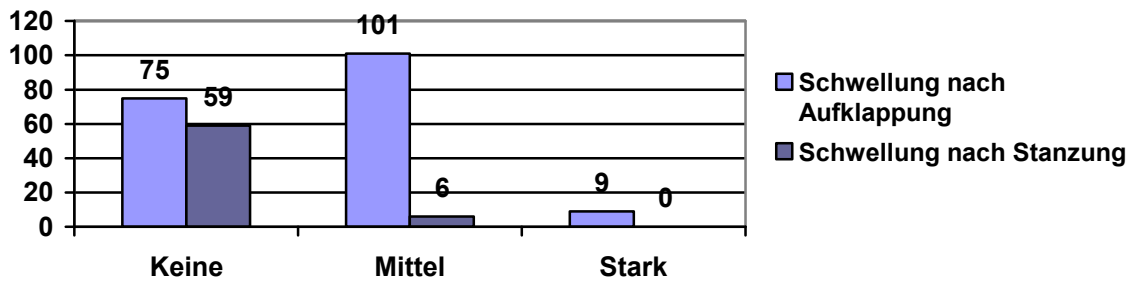
47% der Patienten gaben an, nach der Aufklappung keine Schmerzen verspürt zu haben. 52% klagten über mittlere Schmerzen und 1% der Patienten über heftige Schmerzen. Bei der Stanzung hatte kein Patient starke Schmerzen. 11% der Patienten berichteten jedoch über mittlere Schmerzen. 89% der Patienten gaben an, keine postoperativen Schmerzen gehabt zu haben.

**Abb. 27: Postoperative Schmerzen durch die Implantation**



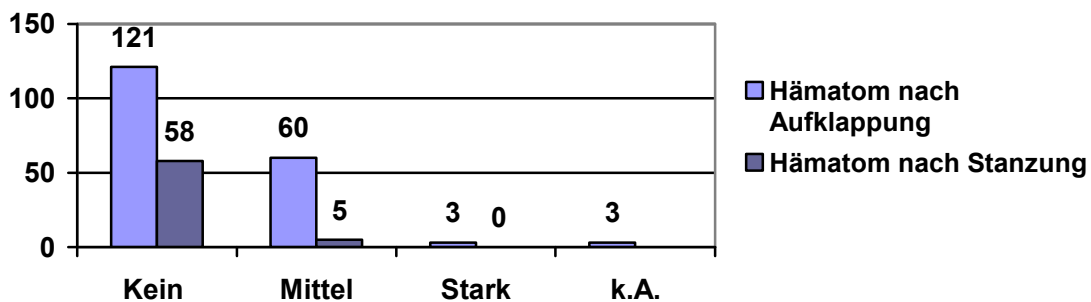
Bei 41 % der Patienten traten nach der Aufklappung keine postoperative Schwellungen auf. 54% der Patienten hatten mittlere, 5% der Patienten starke postoperative Schwellungen nach der Aufklappung. Bei der Stanzung kam es zu keiner starken postoperativen Schwellung. 10% der Patienten hatten eine mittlere Schwellung, 90% der Patienten keine Schwellung.

**Abb. 28: Postoperative Schwellungen bei den verschiedenen OP-Techniken**



Bei 2% der Patienten wurden Hämatome in starker Form postoperativ bei der Aufklappung diagnostiziert. 33% der Patienten hatten ein mittleres Hämatom, 65% der Patienten hatten kein postoperatives Hämatom nach der Aufklappung. Bei 3 Patienten fehlten diese Angaben. In keinem Fall trat ein starkes postoperatives Hämatom nach Stanzung auf. 8% der Patienten hatten ein mittleres Hämatom, 92% der Patienten keines.

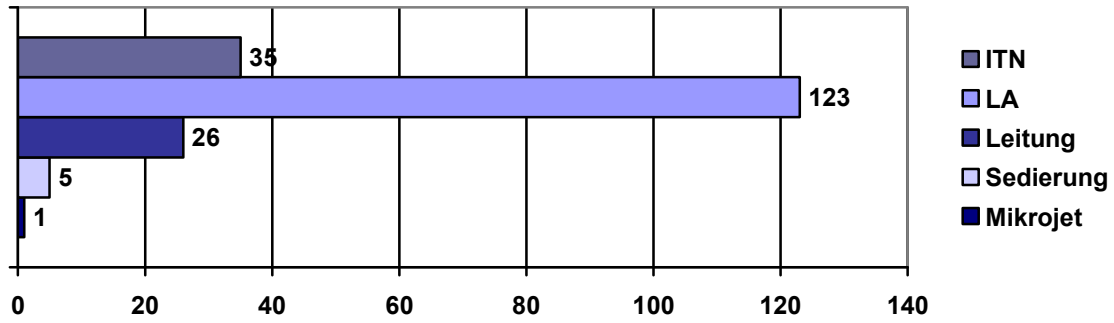
**Abb. 29: Auftreten von Hämatomen bei den verschiedenen OP-Techniken**



Die durchschnittliche Operationszeit (soweit erfasst) betrug 84 Minuten.

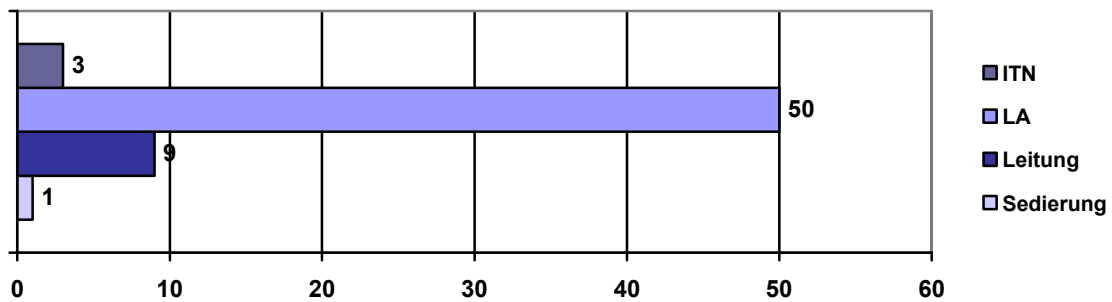
Die Abbildungen 30 und 31 zeigen die Art und Anzahl der Anästhesie, die vor der Aufklappung (190 Anwendungen) oder Stanzung (116 Anwendungen) eingesetzt wurde.

**Abb. 30: Art der eingesetzten Anästhesie bei Aufklappung**



ITN = Intubationsnarkose, LA = Leitungsanästhesie

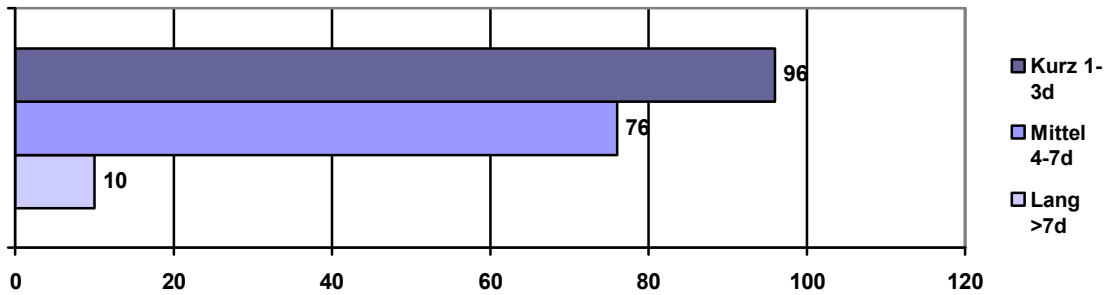
**Abb. 31: Art der eingesetzten Anästhesie bei Stanzung**



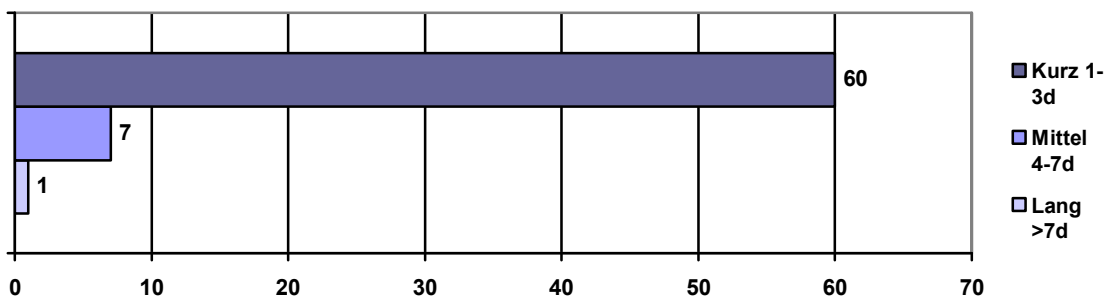
ITN = Intubationsnarkose, LA = Leitungsanästhesie

Um zu untersuchen, inwiefern die Behandlung mit dem RoboDent-System den Ansprüchen der modernen Implantologie gerecht wird, wurde die Beeinträchtigungsdauer der Patienten erfasst. Die Abbildungen 32 und 33 geben die Zeit (d) der beruflichen und sozialen Beeinträchtigung für die Patienten bei den verschiedenen Verfahren an.

**Abb. 32: Dauer der Beeinträchtigung der Patienten bei Implantation durch Aufklappung**



**Abb. 33: Dauer der Beeinträchtigung der Patienten bei Implantation durch Stanzung**



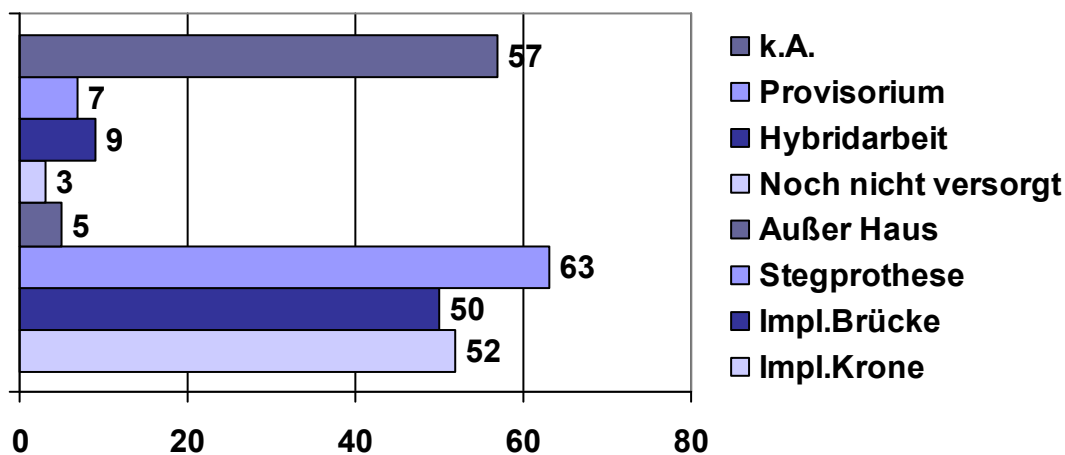
#### 4.8 Die prothetische Versorgung der Patienten

Durch die dreidimensionale Darstellung der anatomischen Kieferstruktur können die Implantate in der Planungsphase in der prothetisch gewünschten Lage und Position in Relation zur Wax-up-Situation, die an der Navigationsschiene angebracht ist, geplant werden.

Darüber hinaus ist es mit dem Navigationsgerät möglich, auf dem Technikmodell bereits vor der Operation des Patienten die Implantatsetzung zu simulieren und damit eine prothetische Suprakonstruktion in geeigneten Fällen bereits präoperativ herzustellen.

Eine prothetische Versorgung der navigiert implantierten Patienten erfolgte bei 179 Patienten. Vier Patienten wurden noch nicht prothetisch versorgt. Bei 72 Patienten wurden diese Angaben nicht erfasst.

**Abb. 34: Die prothetische Versorgung der Patienten**



k. A. = keine Angabe, Impl. = Implantat

Bei 186 Patienten (76 %) wurde die Prothetik entsprechend der präoperativen Planung umgesetzt. Bei 2 Patienten (0,8 %) wurde sie nicht umgesetzt und ein Patient (0,4 %) wartet noch auf die prothetische Versorgung. In 57 Fällen (22,8 %) wurden keine Angaben gemacht.

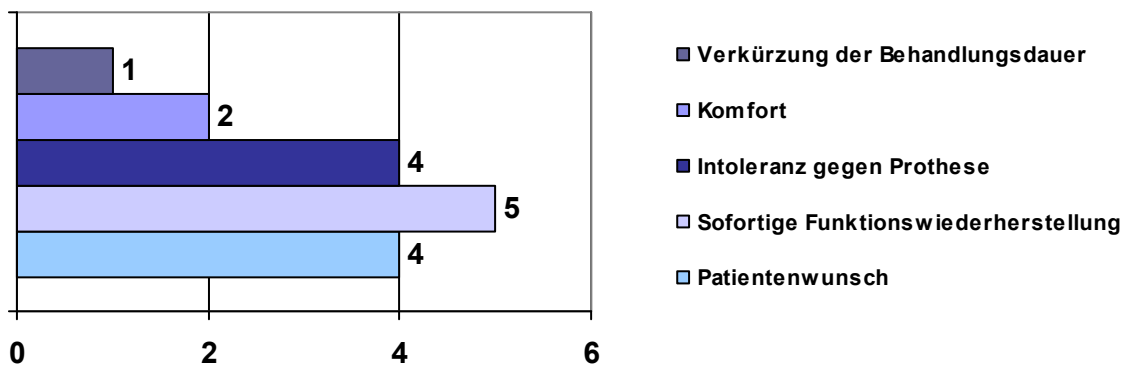
Bei 2 Patienten (0,8 %) wurde die Prothetik gegenüber der Planung verändert. In einem Fall (0,4 %) wurde auf Wunsch des Patienten eine herausnehmbare Arbeit im Unterkiefer festsitzend umgesetzt.

Einmal (0,4 %) kam es aufgrund mangelnder Patientencompliance zu einem Implantatverlust; eine Nachimplantation und erneute Patientenaufklärung waren notwendig.

#### 4.9 Prothetische Sofortversorgung der Patienten

Eine prothetische Sofortversorgung, entweder durch ein Langzeitprovisorium oder eine definitive Versorgung, wurde unter Einbeziehung der gesetzten Implantate bei 16 Patienten durchgeführt. Dabei handelte es sich 14mal um Brücken und in zwei Fällen um Stege.

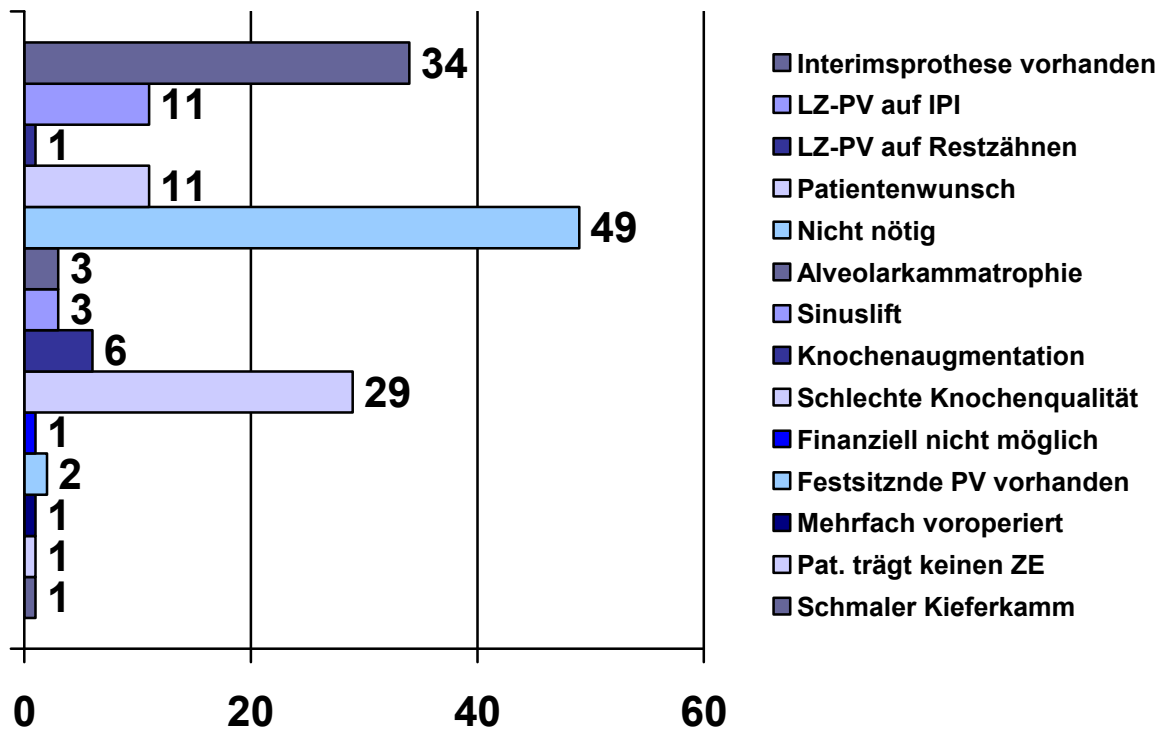
**Abb. 35: Gründe für eine Sofortversorgung der Patienten**



Eine Umarbeitung der Sofortversorgung war bei 9 Patienten notwendig. Bei 2 Patienten erfolgte die Umarbeitung später.

Gründe für die Umarbeitung der Sofortversorgung waren Anpassungen an die veränderte Situation. 1mal musste das Provisorium aufgrund des Abweichens von der geplanten Implantatposition ausgeschliffen werden, 1mal erfolgte die Umarbeitung einer Kunststoffbrücke in Einzelkronen, in einem weiteren Fall wegen einer Schleimhautreparatur.

**Abb. 36: Folgende Gründe sprachen gegen eine Sofortversorgung der Patienten**



LZ-PV: Langzeitprovisorium, IPI: ZE: Zahnersatz

#### 4.10 Bildgebung, Navigationsschiene und Navigationsgerät

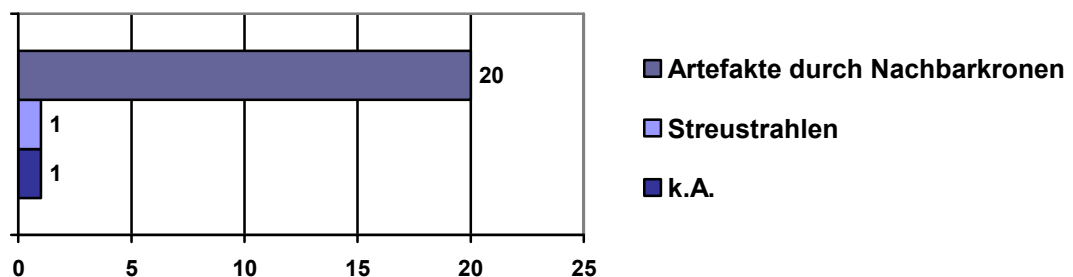
Die Bildgebung, die Navigationsschiene und das Navigationsgerät können zu möglichen Problemen bei der navigierten Implantatsetzung führen. Aus diesem Grund wurden hierzu Angaben erhoben.

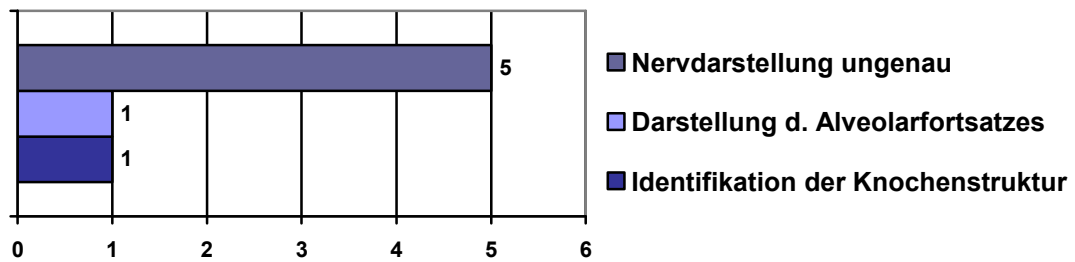
Die Bildgebung erfolgte bei 170 Patienten durch ein CT und bei 74 Patienten durch ein DVT. In 2 Fällen wurde keine Angabe gemacht.

#### 4.11 Probleme bei der Bildgebung

Bei 29 Patienten wurde über Probleme im Zusammenhang mit CT oder DVT berichtet. Störend für die Navigation waren bei der Bildgebung in 68% der Fälle Artefakte und in 4% der Fälle Streustrahlen durch Nachbarkronen. Außerdem wurde bei 24% der Patienten die Nerven- und Knochendarstellung bemängelt. In einem Fall wurde hierzu keine Angabe gemacht.

**Abb. 37: Probleme, die bei der CT-Auswertung auftraten**



**Abb. 38: Probleme, die bei der DVT-Auswertung auftraten**

#### 4.12 Probleme bei der Implantatplanung

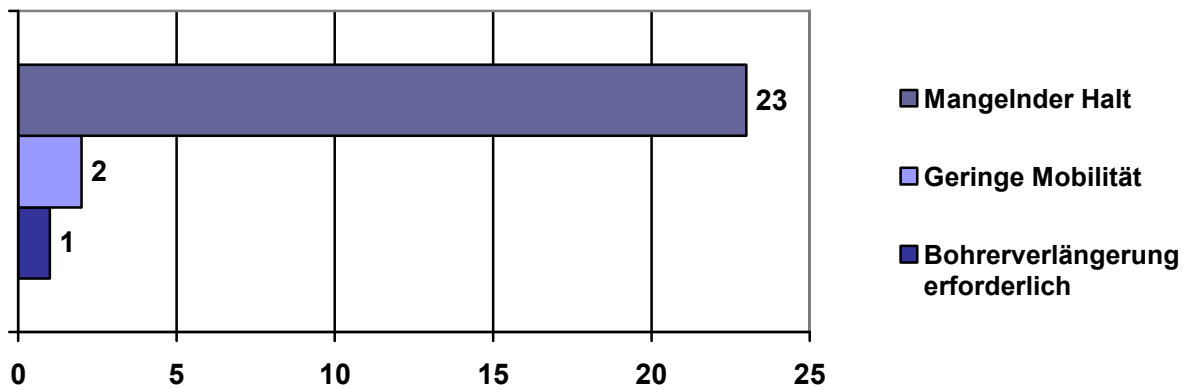
Über Probleme bei der Planung wurde in 2 Fällen berichtet.

Es traten Probleme bei der Findung und Bestimmung idealer Implantatpositionen auf. Außerdem war in einem Fall die Knochenstruktur im DVT nur schwer von der umgebenden fibrösen Schleimhaut zu differenzieren.

#### 4.13 Probleme mit der Navigationsschiene

Die Navigationsschienen werden bei teilbezahnten Patienten durch die Restzähne gehalten. Bei zahnlosen Patienten werden die Schienen entweder durch IPI's oder Minischrauben befestigt. 25mal wurden Probleme mit der Navigationsschiene angegeben. In 23 Fällen hatten die IPI's einen mangelnden Halt oder waren nicht osseointegriert. Außerdem wurde 2mal die eingeschränkte Mobilität durch die Navigationsschiene bemängelt. Einmal war eine Bohrer Verlängerung erforderlich.

**Abb. 39: Probleme, die sich bei der Implantatsetzung durch die Navigationsschiene ergaben**



#### 4.14 Probleme mit dem Navigationsgerät

Das Navigationsgerät besteht aus einer komplexen Hard- und Software. Probleme mit den Navigationsgeräten waren selten:

In einem Fall wurde die Wahrung der Sichtverbindung bemängelt.

Die Neukalibrierung des Systems war einmal erforderlich.

Einmal gab es Probleme mit der exakten Positionsbestimmung des Knochens.

Einmal wurden fehlende Übersicht und Platzmangel angegeben.

## 5 Diskussion

Die Auswahl der an der Studie beteiligten Patienten erfolgte zufällig. Alle erfüllten die Kriterien, mit dem RoboDent-System behandelt werden zu können und waren in den beteiligten Praxen und Kliniken in Behandlung. Außerdem wurden alle Patienten über alternative Behandlungsmethoden aufgeklärt.

Aus den Begründungen der Patienten, warum sie sich für RoboDent entschieden haben, geht hervor, dass die Sicherheit einen für den Patienten wichtigen Faktor darstellt. Durch postoperative Befragung konnte die Akzeptanz der Navigation ermittelt werden. Das Verfahren zeichnet sich durch eine breite Akzeptanz und eine hohe Zufriedenheit der Patienten aus.

Für einige Patienten ist eine möglichst schnelle Funktionswiederherstellung ein Grund für die Behandlung mit RoboDent. Auch die Studien von Petropoulos et al zeigen, dass die Sofortbelastung dazu beitragen kann, die Dauer der Behandlung zu verkürzen und Praxisbesuche und Kosten zu reduzieren [147].

Es sind bisher keinerlei Studien zur Patientenakzeptanz der navigierten Implantologie bekannt.

Das RoboDent-System ist ein anerkanntes und in Deutschland nach MPG zugelassenes Behandlungssystem für navigierte Implantologie. Es ist das mit Abstand meistverkaufte Navigationssystem für Implantologie weltweit. Einsatzmöglichkeiten ergeben sich sowohl in Praxen als auch in Kliniken. Es zeichnet sich durch eine hohe Benutzerfreundlichkeit und Praxistauglichkeit aus. Die Integration in die normale Behandlungsumgebung ist in vollem Umfang möglich, da das System auf einer mobilen Station untergebracht ist. RoboDent ist das erste derartige Komplettsystem weltweit. Die Methode wurde bereits in Studien von Meyer et al und Schermeier et al untersucht und man kam zu dem Ergebnis, dass die im RoboDent-System verwendete Technik eine hohe Präzision aufweist. Dies gilt sowohl für die Datenverarbeitung als auch für die intraoperative Navigation [38, 148].

## **5.1 Aufbau und Auswertung der Fragebögen**

Der Aufbau der Fragebögen erfolgte nach einem einfachen Prinzip. Allen Behandelnden und Patienten wurden die gleichen Fragebögen vorgelegt. Alle Angaben wurden subjektiv gemacht.

Die geometrische Bewertung der Implantatposition wurde nicht erfasst. In einer dieser Studie folgenden prospektiven Studie zur navigierten Implantatologie mit dem RoboDent-System werden Daten erfasst, die Aussagen über die genaue Lokalisation der Implantate machen. Dies war zum jetzigen Zeitpunkt nur subjektiv möglich, da keine der Praxen und Kliniken bereits über die neue Softwareversion 1.7 verfügten. Mit ihr wird es möglich sein, die präoperative Planung computergesteuert mit der tatsächlichen Implantatposition geometrisch zu vergleichen.

## 5.2 Implantate und Implantatpositionen

Durch die Planung von Implantaten am Computer ist es präoperativ möglich, die exakte Position dreidimensional darzustellen. Die Verwendung hochwertiger Bilddaten ist Voraussetzung für die hohe Genauigkeit, wie sie mit dem RoboDent-System erreicht wird. Fortin et al untersuchten in einer Studie die Genauigkeit einer Planungssoftware. Eine präoperativ angefertigte Schablone diente als Führungshilfe bei der Bohrung. Nach qualitativer Auswertung mittels dem Kendall-Korrelations-Koeffizient und einer mengenmäßigen Auswertung mittels Kappa Konkordanz-Koeffizient für quantitative Daten, kam man zu dem Ergebnis, dass navigierte Systeme für die präoperative Planung der Implantatgröße und das Erkennen anatomischer Besonderheiten besonders zuverlässig sind [149]. Kramer et al untersuchten in in vitro Studien die Genauigkeit von navigierter und herkömmlicher Implantatsetzung. Es wurden jeweils zwanzig Implantate in Oberkiefermodelle inseriert. Die navigiert gesetzten Fixturen wiesen hinsichtlich der Position eine höhere Genauigkeit auf [150].

Die Genauigkeit der Insertion war nach den Aussagen der Operateure in unserer Studie sehr hoch, was sich auch mit den Untersuchungen von Wanschitz et al deckt. In Studien untersuchten sie die Präzision eines neu entwickelten Navigationssystems für Dentalimplantate. Fünf Kadaverunterkiefer wurden vor und nach der Implantation mit hochauflösenden CT gescannt und vermessen. Als chirurgische Planungssoftware wurde das in Wien entwickelte Programm VISIT verwendet. Die geplante und tatsächliche Implantatposition wurde verglichen. Die Gesamtgenauigkeit betrug bei diesem Versuch  $0.96 \pm 0.72$  mm (range 0.0-3.5 mm) [151].

In Studien von Siessegger et al kam ein auf Infrarotlicht basierendes Navigationssystem zum Einsatz (Vector Vision 2, BrainLAB, München). Ziel war der Vergleich der Genauigkeit von konventioneller Implantation und Navigation. Alle Eingriffe wurden an komplizierten klinischen Fällen durchgeführt (z.B. nach Knochenaugmentation). Die Verwendung des Navigationssystems führte, so die Autoren, im Vergleich zur herkömmlichen Technik, zu besseren Ergebnissen [152].

Die Implantation im Oberkiefer stellt besondere Anforderungen. Die Exaktheit des SMN-Systems (Zeiss, Oberkochen) zum navigierten Bohren und nachfolgender Implantation im Oberkiefer wurde in einer Studie von Gaggl et al untersucht. Es wurden sechzig Bohrungen an

zehn Kunststoffmodellen durchgeführt. Nach Registrierung der Modelle wurde versucht, die Bohrung so nah wie möglich an den Boden des maxillären Sinus zu platzieren. Die mittlere Abweichung des Abstandes zum Sinusboden betrug 0,25 mm, was eine hohe Präzision der CT-basierten Navigation während der Implantatbohrung zeigt [153].

Bahat kam in Studien zu dem Ergebnis, dass die Verwendung von Röntgenschablonen dazu verhilft, Implantate prothetisch sinnvoll im Knochen platzieren zu können [154]. In vielen Fällen wird eine solche Röntgenschablone später für den operativen Eingriff modifiziert und zur Bohrschablone umgestaltet. Entfernt man den lingualen Anteil der Schablone und löst die radioopaken Stifte heraus, lässt sich die Schiene intraoperativ zur Kontrolle der Bohrrichtung nutzen. Die Bohrschablone enthält Führungskanäle, die der späteren Implantatausrichtung entsprechen. Die Genauigkeit der Implantatinsertion wird hierdurch verbessert. Dies geht aus Untersuchungen von Zinner et al hervor, welche die Anfertigung solcher Schablonen im Unterkiefer beschreibt [155].

Auch in anderen Bereichen der Medizin, z.B. bei Operationen am komplizierten Pelvis, kann erfolgreich mit optisch kontrollierten Instrumenten gearbeitet werden. In Untersuchungen von Peters et al wurde die Computernavigation mit Medivision (Oberdorf, Schweiz) durchgeführt, die Software war SurgiGATE 2.1. Ziel war eine Insertion möglichst langer Schrauben. Als Vergleich diente die herkömmliche Technik ohne Navigation. Die Studie zeigt, wie durch die navigierte Schraubeninsertion die Genauigkeit verbessert und längere Schrauben gesetzt werden konnten. Hier bietet die Computernavigation entscheidende Vorteile, da insbesondere mit zunehmender Schraubenlänge der Eintrittspunkt und die strenge Achsengenauigkeit immer schwerer vom Operateur zu beurteilen sind [156].

Die Darstellung computertomographischer Daten am PC macht es möglich, Implantate im Vorfeld virtuell zu planen und die optimalen Lokalisationen im Knochen zu finden. Durch ein solches System wird es auf einfache Weise möglich, Implantate an bestimmten Positionen zu inserieren [157]. Auch das RoboDent-System, welches ausschließlich mit hochwertigen CT- oder DVT- Bilddaten arbeitet, die es erlauben die Implantate im Voraus dreidimensional virtuell zu planen, führt zu sehr guten Ergebnissen bei der Implantatlokalisierung. Zu diesem Schluss führten auch Studien von Watzinger et al. Der Einsatz eines computergestützten Navigationssystems wurde untersucht und die Planung mit der Umsetzung verglichen. Die Navigation ist ein wertvolles Hilfsmittel in der Implantatchirurgie [34].

Die Genauigkeit von Systemen wie RoboDent wurde in einigen Studien untersucht. Um die maximalen Abweichungen zwischen Planungsposition und klinischer Position der Implantate zu vergleichen, wurden Bilddaten prä- und postoperativ verglichen. Die bekannten Studien zur Genauigkeit gehen von einer maximalen Abweichung von  $<1$  mm aus [33, 151, 158].

Auch die Daten dieser Studie zeigen eine hohe Sicherheit bei der Planungsumsetzung. Es ist jedoch auch intraoperativ jederzeit für den Operateur möglich, die Planungsumsetzung zu ändern. Dies kann beispielsweise aus Gründen der Primärstabilität indiziert sein. Die Studie zeigt, dass es mit der navigierten Implantation möglich ist, Implantate schnell und unkompliziert zu planen und dann exakt an zuvor geplanten Lokalisationen zu setzen.

Durch den Einsatz computergestützter Navigationssysteme kann eine hohe Genauigkeit zwischen Planungsposition und tatsächlicher Position erreicht werden. Dies erlaubt es dem Operateur, die Implantate exakt an zuvor berechneten Positionen zu inserieren. Die Arbeit wird dadurch erleichtert und sicherer gegenüber herkömmlichen Verfahren. Ein weiterer Vorteil ist, dass es möglich wird, die implantatgetragene Prothetik bereits präoperativ anzufertigen.

Ziel der modernen Implantologie ist es stets gewesen, Behandlungen genauer und sicherer zu machen. So wurde sowohl in der Diagnostik durch den Einsatz von CT/ DVT oder Röntgenschablonen, als auch in der Chirurgie durch Bohrschablonen die Behandlung verbessert [159]. Die Verlässlichkeit solcher Systeme steht Studien von Fortin et al zufolge außer Frage. Die Möglichkeit des Operateurs, jederzeit den Operationsablauf zu ändern, bietet ein breites Feld von Möglichkeiten [149].

Sobald mehr als ein Implantat zum Einsatz kommt, spielt auch die Ausrichtung der Implantate untereinander eine entscheidende Rolle. Dies ist vor allem im Oberkieferseitenzahnbereich zu beachten, wo die gewünscht Implantatposition meist schwer zu erreichen ist [41].

Laut den Ergebnissen von Walton et al führen Neigungswinkel von Fixturen in einem Bereich von  $> 6,5$  Grad lingualer Abweichung und bis zu  $6,5$  Grad fazialer Abweichung zu einer Zunahme der Reparaturanfälligkeit der Suprastrukturen. Die Autoren konnten in ihren Untersuchungen jedoch keinen Zusammenhang zwischen dem Inter-Implantat-Winkel und der Wartungshäufigkeit zeigen [160].

In Studien von Khoury wurden dazu bereits Versuche mit Parallelisierungshilfen durchgeführt. Man kam zu dem Ergebnis, dass Implantate sich mit Hilfe eines solchen Instruments parallel zueinander ausrichten lassen. Auf diese Weise lässt sich die okklusale Belastung optimieren und eine sicherere prothetische Versorgung erreichen [161]. Der Einsatz derartiger Hilfsmittel wird beim RoboDent-System obsolet. Die Ausrichtung der Implantate erfolgt virtuell am Computer durch ein Parallelisierungstool. Dieses dient dazu die optimalen statischen Ausrichtungen der einzelnen Implantatpfeiler im Verhältnis zur späteren Prothetik zu berechnen. So kann bereits im Vorfeld anhand der Bilddaten im DICOM-Format mit der RoboDent-Software eine optimale Ausrichtung der Implantate entlang ihrer prothetisch zuvor geplanten Achsen erfolgen. Individuelle okklusale Verhältnisse werden bei der Umsetzung berücksichtigt. Eine physikalisch günstige Pfeilerparallelität gewährleistet optimale Druckableitung und beugt Fehl- und Überbelastungen vor. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch *in vitro* Studien von Kramer et al. Die Implantatposition, die Neigung und die Insertionstiefe wurden nach konventioneller und navigierter Insertion gemessen und verglichen. Die durchschnittlichen Abweichungen waren bei navigierter Umsetzung deutlich geringer. Dies gilt in axialer und transversaler Richtung. Die *in vitro* Anwendung eines Navigationssystems erhöht die Genauigkeit bezüglich Position, Neigung und Tiefe [150].

### **5.3 Stanzung vs. Aufklappung**

Die moderne prächirurgische Diagnostik wie die des RoboDent-Systems, ermöglicht heute bereits im Vorfeld des implantologischen Eingriffs eine exakte Bestimmung der anatomischen Verhältnisse und des Implantatbetts [162]. Die Insertion der Implantate durch Aufklappung eines mukoperiostalen Lappens ist laut der Studien von Gaggl et al nicht immer nötig, insbesondere wenn zuvor durch die präoperative Diagnostik ein ausreichendes Knochenangebot diagnostiziert wurde [80].

In der hier ausgewerteten Studie wurden die Patienten sowohl durch Stanzung als auch durch Aufklappung operiert (vgl. Abb. 24 Seite 72).

Die Ergebnisse der Studie haben gezeigt, dass die Aufklappung wie auch die Stanzung zuverlässige Verfahren der Implantologie darstellen. Der Einsatz beider Techniken ist in allen Kieferabschnitten möglich. Auch die Anzahl der gesetzten Implantate hatte keinen Einfluss auf

die Art der Operationstechnik. Außer Knochenaugmentation ergaben sich aus der Studie keine Kontraindikationen für die Stanzung.

Die Insertion von Implantaten über Mukosastanzlöcher bietet gegenüber der Aufklappung zahlreiche Vorteile für Behandler und Patienten. Der Eingriff kann minimalinvasiv erfolgen, was mit verminderter Blutung und geringster Traumatisierung der Gewebe und Knochen einhergeht. Dies geht auch aus den Untersuchungen von Al-Ansari et al hervor. Es wurden insgesamt 20 Implantate an 7 männlichen Patienten im Ober- und Unterkiefer durch Stanzung gesetzt. Bei allen Patienten verlief die Heilung komplikationslos [75].

Die Stanzung dient einer Verkürzung der Behandlungsdauer. Wird die Operation durch Stanzung durchgeführt, zeigt sich Gaggel zufolge eine Verkürzung der beruflichen und sozialen Beeinträchtigung der Patienten [80]. Dies deckt sich mit den Ergebnissen dieser Studie.

Die in Studien von Campelo und Camara erwähnte mangelnde Einsicht auf den Knochen wird beim RoboDent-System obsolet, da eine CT-gestützte prächirurgische Diagnostik und ein durch Navigation kontrollierter Eingriff erfolgen [79].

Das Risiko eines Hämatoms oder einer Schwellung sowie das Auftreten von Schmerzen und eventuellen postoperativen Komplikationen werden deutlich reduziert (siehe auch Abbildungen 27-29; Seiten 74, 75). Campelo und Camara zufolge stellt die Stanzung ein minimalinvasives Verfahren dar, welches dazu dient, intraoperative Komplikationen zu minimieren. Das Risiko eines Hämatoms oder einer Schwellung sowie das Auftreten von Schmerzen und eventuellen postoperativen Komplikationen werden durch den Einsatz von RoboDent, kombiniert mit Schleimhautstanzung, deutlich reduziert. Die Ergebnisse unserer Studie decken sich in einigen Punkten mit Untersuchungen von Campelo und Camara. Es wurden 770 Implantate über Stanzung gesetzt. Die Operationen wurden jedoch nicht navigiert durchgeführt. Die Autoren sehen in der Stanzung ein minimalinvasives Verfahren, welches, wenn es korrekt angewendet wird, dazu verhilft Komplikationen zu minimieren. Die Stanzung kann dazu beitragen, die postoperativen Beeinträchtigungen für die Patienten zu reduzieren, da eine Nahtentfernung meist obsolet ist (vgl. auch Abb. 32,33 Seite 77) [79].

Die Schonung der interdentalen Papillen kommt den Patienten vor allem im Frontzahnggebiet, wo die Ästhetik eine wichtige Rolle spielt, zugute, was die Untersuchungen von Wheeler et al zeigen [163].

Die Art der im Einzelfall anzuwendenden Anästhesieart ist abzuwägen. Es zeigt sich jedoch, dass in den meisten Fällen durch die Lokal- bzw. Leitungsanästhesie, sowohl bei Aufklappung, als auch bei der Stanzung, eine ausreichende Schmerzausschaltung erreicht wird (siehe Abbildungen 30 und 31; Seite 76).

Vorteile des RoboDent-Systems machen die Implantatinsertion über Mukosastanzungen sicher, da die Implantatrichtung durch die anatomischen Informationen aus den CT/ DVT Daten abgesichert sind. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass eine lappenlose Operation im Hinblick auf die Beeinträchtigungsdauer des Patienten zu bevorzugen ist, wenn es die klinische Situation zulässt und keine zusätzlichen augmentativen Maßnahmen erfolgen müssen (Vergleiche auch Abbildungen 32, 33; Seite 77). Die niedrige Komplikationsrate spricht für die Anwendung der Schleimhautstanzung. Diese Ergebnisse decken sich auch mit denen von Gaggl et al. Die Autoren kamen in Untersuchungen an 12 Patienten beim Einsatz von Distraktionsimplantaten mittels Stanzung ebenfalls zu guten Ergebnissen. Das Verfahren zeichnet sich hinsichtlich der Narbenbildung und der Komplikationsrate als besonders atraumatisch aus [81].

### **5.4 Gefährdete Strukturen**

Chirurgische Komplikationen wie Sensibilitätsstörungen, Hämatome, Mandibulafraktur sowie die Devitalisierung von Nachbarzähnen können, so Goodacre et al, bei einer Versorgung mit Implantaten auftreten. Bei allen Implantaten im Ober- und Unterkiefer besteht die Gefahr der Verletzung benachbarter Strukturen [164]. Dagegen haben die Ergebnisse der ausgewerteten Studie gezeigt, dass mit Hilfe der navigierten Implantation das Risiko einer ungewollten Verletzung potentiell gefährdeter Strukturen nahezu gegen Null geht, da es in keinem der 246 Fälle zu intraoperativen Komplikationen kam (siehe Kapitel 4.7). Dies zeigt, dass die navigierte Implantation sicher ist und dazu beiträgt, Risiken für den Patienten zu minimieren.

Aus den Ergebnissen von Ellis und Hawker sowie aus Studien über die Inzidenz von Nervenausfallerscheinungen von Walton geht hervor, dass bei herkömmlichen Implantationsverfahren Komplikationen durchaus auftreten. In Studien berichten sie über Schädigungen des Nervus mandibularis, die zwar meist nur temporär auftreten, für den Patienten jedoch eine starke körperliche und psychische Belastung darstellen. Eine

Nervenschädigung bedarf der Behandlung. Da die Nervenregeneration sich über einen sehr langen Zeitraum erstreckt, können Aussagen über dauerhafte Schäden meist erst nach einigen Monaten gemacht werden [131, 138, 139].

Untersuchungen von Nazarian et al und Wismeyer et al an 110 Patienten, welche im Unterkiefer mit Implantaten versorgt wurden ergaben, dass 11% der Patienten in den ersten Tagen über Nervenirritationen des Nervus mandibularis klagten [133, 165].

Des Weiteren besteht bei der Implantation im Oberkiefer die Gefahr einer Perforation der Sinusböden. Wenn nicht zum Zwecke eines Sinuslifts, ist die Eröffnung der Kieferhöhlen zu vermeiden. Die durch die Mund-Antrum-Verbindung eröffnete Kieferhöhle gilt nach 24 Stunden als infiziert und die Gefahr einer Sinusitis maxillaris besteht.

Aus unserer Studie geht hervor, dass die Verletzung der Kieferhöhlen, sowie der Unterkieferkortikalis mit navigierter Implantation vermeidbar sind.

Auch Gaggl und Schulz kamen in Studien zu guten Ergebnissen mit dem Einsatz einer CT-basierter Navigation. Die CT-basierte Navigation macht die Implantation sicherer und hilft Risiken zu vermeiden [153].

In seltenen Fällen, wo die Patienten an starkem Knochenabbau leiden, besteht das Risiko einer Fraktur der Mandibula durch das Auftreten der Kaukräfte [142]. Da in der RoboDent-Operationsplanung jedoch eine genaue Analyse des Knochenangebots durchgeführt wird, können, wenn nötig, augmentative Maßnahmen erfolgen, um ein ausreichendes Implantatlager zu schaffen.

Im Rahmen eventueller Regressansprüche durch Patienten ist der Behandler mit der CT/ DVT-basierten Planung und der zugelassenen medizinischen Hard- und Software des RoboDent-Systems auch aus forensischer Sicht voll abgesichert. In vielen Fällen kann solch eine Planungssicherheit dazu beitragen, rechtliche Untersuchungen zu vermeiden, wie Worthington in Studien zeigen konnte [143]. Durch die genaue Dokumentation kann der Behandelnde seinen Erfolg nachweisen.

Aus den Untersuchungen von Wanschitz et al zur Präzision eines Navigationssystems für Dentalimplantate geht, wie auch aus unserer Studie hervor, dass dieses Verfahren sicher ist. Es

kam bei den Bohrungen zu keinerlei Verletzungen des Mandibularkanals oder der mandibulären Kortices (vgl. auch Kap.4.5, Seite 70-71) [151].

Weitere Studien über das Auftreten von Komplikationen in der navigierten Implantologie, insbesondere mit dem RoboDent-System, stehen noch aus.

## **5.5 Primärstabilität der Implantate**

Durch die navigierte Implantation konnten die Fixtoren in das Gebiet mit dem besten Knochenangebot inseriert werden. Dies ist wichtig, um eine ausreichende Stabilität zu gewährleisten. In der Studie wurden keine Vorgaben zum Implantattyp gemacht, da von den Operateuren für die jeweilige Indikation unterschiedliche Implantate verwendet werden. So variieren die angewendeten Implantate in Typ, Länge oder Durchmesser. Die Implantation an unterschiedlichen Lokalisationen oder Knochenstrukturen erfordert laut Takacs verschiedene Implantattypen und genaueste Planung, um eine maximale Stabilität zu erreichen [166].

Alle 1202 in dieser Studie gesetzten Implantate unterschiedlicher Hersteller wurden von den Behandelnden klinisch als primärstabil beurteilt und konnten im Knochen belassen werden.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Implantats hängt zu einem großen Teil von seiner Stabilität im Knochen ab. Die Primärstabilität beim Setzen der Implantate ist ein mechanisches Phänomen, welches durch das lokale Knochenangebot und dessen Dichte bestimmt wird. Des Weiteren setzt Meredith die richtige Implantatauswahl und eine korrekte chirurgische Technik voraus. Außerdem trägt eine hohe Primärstabilität dazu bei, die Knochenregeneration zu verbessern [108]. Aus Studien von Friberg et al. geht eine Implantatfehlerrate von 32% bei Implantaten, die keine ausreichende Primärstabilität aufwiesen, hervor [88]. Dies unterstreicht die Wichtigkeit dieses Faktors bei der Implantateinheilung.

Aus diesem Grund sind präoperative Messungen durchzuführen, um die Primärstabilität zu gewährleisten. Messungen der Knochendichte erfolgten in dieser Studie während der RoboDent-Operationsplanung. Sie wird anhand der CT/ DVT-Bilddaten berechnet und im Planungsmodul des Navigationssystems angezeigt. So kann die Knochendichte bei der

Positionsplanung der Implantate berücksichtigt werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Implantate in Regionen mit ausreichendem Knochenangebot inseriert werden.

Wie schon Quiryne et al berichteten, unterstützt die Computertomografie den Operateur bei der Planung der genauen dreidimensionalen Position im Kieferknochen [91].

Es zeigt sich, dass durch die exakte Planung anhand CT oder DVT und Durchführung der Operationen mit einem Navigationssystem ein hohes Maß an Primärstabilität erreicht werden kann. Nur auf diese Weise kann eine optimale Einheilung der Implantate gewährleistet werden. Das Risiko eines Implantatverlusts wird reduziert.

Der Operationsablauf lässt sich bei der RoboDent-Behandlung jederzeit vom Operateur verändern. Falls die gewünscht Primärstabilität in kritischen Fällen nicht erreicht wird, kann ein anderes Implantat größeren Durchmessers oder eine andere Position durch den Behandler gewählt werden.

## **5.6 Prothetik entsprechend der Planung**

In der Planungsphase der RoboDent-Behandlung können die Implantate anhand einer dreidimensionalen Darstellung der Kieferanatomie auch prothetisch sinnvoll geplant werden. Ziel dieser Planung ist es, die optimale prothetische Versorgung wenn möglich bereits präoperativ anfertigen zu lassen. Die Implantate können untereinander optimal ausgerichtet werden um den Anforderungen der späteren Kräfte standzuhalten. Diese Form der prothetikorientierten Implantatplanung wirkt sich positiv auf die Belastung der Implantate in Okklusion aus. Um dies umzusetzen werden von anderen Autoren zahlreiche Hilfsmittel empfohlen.

Die Verwendung von Röntgenschablonen verhilft dazu, Implantate prothetisch sinnvoll im Knochen platzieren zu können. Dies geht aus Untersuchungen von Bahat hervor [154]. In vielen Fällen wird eine solche Röntgenschablone später für den operativen Eingriff modifiziert und zur Bohrschablone umgestaltet. Entfernt man den lingualen Anteil der Schablone und löst die radioopaken Stifte heraus, lässt sich die Schiene intraoperativ zur Kontrolle der Bohrrichtung nutzen. Die Bohrschablone enthält Führungskanäle, die der späteren Implantatausrichtung entsprechen. Die Genauigkeit der Implantatinsertion wird hierdurch verbessert, wie Zinner et al in ihren Studien feststellten [155].

Die Herstellung von Röntgen- und Bohrschablonen verläuft einfach und schnell. In Verbindung mit einem CT-basierten Navigationssystem kann auch der Fehler, der in der operativen Freihand-Umsetzung liegt, weiter reduziert werden. Eine schonende und genauere Insertion im Verhältnis zur späteren Prothetik wird möglich. Naitoh et al beschreiben in einer Studie den Einsatz einer nach CT-Daten hergestellten chirurgischen Schablone. Beim Setzen von einundzwanzig Implantaten im Unterkiefer wurde mit der verwendeten Schablone eine hohe Genauigkeit in der Umsetzung der Planung erreicht [30].

Die 1993 eingeführte SimPlant-Software verbindet die CT-Bildgebung mit CAD. Vor Einführung dieser Software wurde die Implantatplanung mit Ausdrucken oder Kopien der reformatierten CT-Bilder durchgeführt. Transparente Overlays simulierten die Implantate. SimPlant nutzt die CT-Rohdaten aus dem Scan, unterstützt von Computergrafik, und bietet so eine ausgezeichnete Planungsbasis. Das Programm erlaubt dem Planenden verschiedene Ansichten des reformatierten CT-Bildes ebenso wie eine Inspektion der Knochenanatomie und des Alveolarkammes. Knochenweite und -breite können von beliebigen Punkten aus gemessen werden. Anhand der gewonnenen Daten erfolgen die Implantatauswahl nach Länge und Durchmesser sowie die Wahl geeigneter Abutments. Die Neigung des geplanten Implantats lässt sich auf dem Monitor verändern. So kann unter Beachtung der natürlichen Zähne, anderer Implantate oder anatomischer Strukturen eine optimale Position gefunden werden, wie Rosenfeld und Mecal in ihren Studien beschreiben [167].

Anhand der vom Techniker gefertigten Wax-Up-Situation kann jedes Implantat in der gewünschten Position zur späteren prothetischen Versorgung inseriert werden. Durch die anschließende Duplizierung der Wax-Up-Situation und Überführung in Kunststoff wird es möglich, die Zahnaufstellung bereits in die Diagnostik mit einzubeziehen, da die Schiene während der CT/ DVT- Aufnahmen in situ verbleibt. Um für die prothetische Versorgung eine möglichst günstige Ausgangssituation der Implantate zu schaffen, muss in der prothetischen und chirurgischen Planungsphase rechtzeitig das Verhältnis zwischen Knochenangebot und der späteren Restaurationsposition analysiert werden. Eine sorgfältige Implantationsplanung inklusive Wax-Up und Schablonentechnik ist für eine erfolgreiche prothetische Versorgung unerlässlich, was Witkowski nach Untersuchungen bildgebender Verfahren darstellt [159, 168]. Die vorliegende Studie hat gezeigt, dass es bei einer Vielzahl der Patienten möglich war, die präoperative prothetische Planung auch umzusetzen (siehe Kapitel 4.8; Abbildung 34, Seite 78). Die Patienten, bei denen eine Änderung erfolgte, konnten zum Teil alternativ versorgt werden.

Die genaue chirurgisch-prothetische Planung ist besonders wichtig, um späteren Fehlbelastungen vorzubeugen. Die Okklusion ist eine wichtige Determinante für Erfolg oder Misserfolg eines Implantats. Eine genaue Evaluation der okklusalen Verhältnisse muss bei jeder prothetischen Versorgung erfolgen und in der Umsetzung des Zahnersatzes Berücksichtigung finden, wie Saba berichtete [169]. Aus klinischen Langzeitstudien von Lindquist et al über einen Zeitraum von 6 Jahren geht hervor, dass Überbelastungen einen Grund für den Verlust von Implantaten darstellen können [65]. Die Wartungsanfälligkeit einer falsch belasteten Restauration ist um ein vielfaches höher und mit zusätzlichen Kosten ist zu rechnen, wie Untersuchungen von Walton et al ergaben [160].

Für eine Erhaltung des Alveolarfortsatzes spielt die Höhe der Belastung eine entscheidende Rolle. Optimal belastete Implantate wirken einem Knochenabbau entgegen und fördern die Remodellierung der Knochensubstanz, wie Melson und Lang in ihren Untersuchungen zeigen konnten [170]. Obwohl über das Zusammenspiel von Implantatoberfläche und Knochen in der Vergangenheit bereits einige Studien veröffentlicht wurden, sind Aussagen aus Studien über das biomechanische Verhalten von Implantaten in Verbindung mit der Biologie des Knochens bisher meist zu einseitig und berücksichtigen nicht die vielgestaltige Kräfteentwicklung während des physiologischen Kauaktes [43, 171]. Die meisten hierzu durchgeführten Studien beziehen sich zudem auf einzelne Implantate. Es bekannten Ergebnissen geht jedoch hervor, dass die Belastungsrichtung einen großen Einfluss auf Erfolg oder Misserfolg hat. So sehen auch Ueda et al ein Auftreten von unphysiologischen Belastungszunahmen an den schräg belasteten Implantaten in ihrer Studie [44].

## 5.7 Prothetische Sofortversorgung

Mit dem Navigationsgerät ist es möglich, auf dem Technikmodell bereits vor der Operation des Patienten, die Implantatsetzung zu simulieren und damit eine prothetische Suprakonstruktion in geeigneten Fällen bereits präoperativ herzustellen. Wenn möglich, wurde in dieser Studie die Prothetik bereits präoperativ gefertigt. Dies dient der Verkürzung der Behandlungsdauer und hat einen positiven Einfluss auf das Wohlbefinden der Patienten. In Fällen, in denen es zu intraoperativen Änderungen durch den Operateur kommt oder der Patient plötzlich andere Versorgungswünsche vorbringt, muss die Versorgung entsprechend umgearbeitet und angepasst werden. Deshalb hat hier eine genaue Einschätzung der Situation zu erfolgen, damit nicht durch Umarbeitungen der Prothetik Zeitverlust und zusätzlich Kosten auftreten.

Diese Art der Rückwärtsplanung wird auch von Zitzmann in Studien zur Patienten- und prothetisch orientierten Implantatplanung beschrieben und als ein wichtiges Element einer erfolgreichen Behandlung angesehen [70].

Aus der Möglichkeit, die provisorisch oder definitive prothetische Versorgung bereits prächirurgisch anzufertigen, ergeben sich neue Behandlungskonzepte. Nach genauer Diagnostik und mit ausreichender Primärstabilität können sofort belastete Implantate gesetzt werden. Moderne Konzepte der Implantologie gehen zunehmend in Richtung einer Verkürzung der Behandlungsdauer.

Aus den Ergebnissen der in dieser Arbeit ausgewerteten Studie geht hervor, dass die Patienten immer kürzere Behandlungszeiten fordern. Die sofortige Funktionswiederherstellung und der daraus resultierende Komfort spielen ebenso eine Rolle wie die Intoleranz gegenüber Prothesen und die verkürzten Behandlungszeiten. Dieses Konzept wurde auch in Studien von Balshi et al, wo Patienten unter keinen Umständen auf festen Zahnersatz verzichten wollten, angewendet [172].

Untersuchungen von 186 sofortbelasteten Implantaten an Ober- und Unterkiefer zahnloser Patienten wurden von Ganeles et al durchgeführt. 161 dieser Implantate wurden sofort belastet. Die Patienten wurden mit einer befestigten Prothese versorgt. Nach Auswertung der Ergebnisse waren 99% der sofortbelasteten Implantate klinisch und radiologisch integriert. Die Studie zeigt, dass es möglich ist, Implantate am zahnlosen Kiefer sofort zu belasten und sehr gute Ergebnisse zu erzielen [173].

Klein et al gehen davon aus, dass sich dieses Konzept auch auf andere Bereiche der Kopfregion anwenden lässt. Ziel ihrer Studien war die Verkürzung der Behandlungsdauer.

Mit Hilfe eines medizinisch anerkannten Robotersystems wurden Implantate zur Aufnahme von Ohrprothesen inseriert. Die Implantatpositionen wurden anhand von CT-Daten geplant und anschließend mit einer hohen Genauigkeit eingesetzt. Es kam zu keinerlei chirurgischen Komplikationen, und sofortiges Einsetzen der Prothesen nach der Implantation war möglich [5].

Der zeitliche Aspekt ist bei der Implantatversorgung ein wichtiger Faktor. Im Gegensatz zur herkömmlichen Behandlung mit drei- bis viermonatiger Heilungsphase, wird durch Sofortbelastung die Zahl der Patientenbesuche reduziert. Zu diesem Ergebnis kam auch eine Studie von Chee und Jivraj, in der durch Sofortbelastung die Frequenz der postoperativen Praxisbesuche minimiert werden konnte [114].

Auch in unserer Studie wurden Sofortbelastungskonzepte durchgeführt (vgl. Kap.4.9). Dadurch bleibt den Patienten ein zweiter chirurgischer Eingriff zur Freilegung der Implantate erspart. Dieses Konzept führen einige Autoren noch weiter [174].

Die Kriterien für eine Sofortbelastung sind streng. Deshalb ist eine sorgfältige und strikte Patientenauswahl in diesen Fällen indiziert [115]. Zu den Ein- und Ausschlusskriterien der Sofortbelastung von Implantaten zählen unter anderem eine gute Patientencompliance, gesunde Nachbarzähne, keinerlei Entzündungen der Implantationsstelle, sowie ein ausreichendes Knochenvolumen mit guter Knochendichte (vgl. Kapitel 1.7.1).

Auch in unserer Studie konnte bei einer Reihe von Patienten keine Sofortbelastung erfolgen (vgl. Abbildung 36, Seite 80). Gründe wie unzureichende Knochenqualität, Atrophie oder erfolgte Augmentationen lassen keine Sofortbelastung zu. In Fällen, wo es zur Planungsänderung kommt und eine prothetische Sofortversorgung umgearbeitet werden muss, kann dies noch während der Operation erfolgen, um direkt auf eventuelle Änderungen einzugehen. Umfangreichere Änderungen können nur durch den Zahntechniker erfolgen, was eine Verlängerung der Behandlung bedeutet.

Diese einphasigen Verfahren wurden bereits in mehreren Studien von Kosinski et al und Engstrand et al nachgewiesen. Die Autoren berichten von Erfolgsquoten von bis zu 99%. Es können die verschiedensten Implantattypen und Suprakonstruktion zum Einsatz kommen. Die

meisten derzeitigen Untersuchungen zu Sofortbelastung von Implantaten beziehen sich jedoch auf die interforaminale Unterkieferregion [175, 176].

Studien zufolge kann durch die sofortige Funktion des Implantats die Einheilung verbessert werden. Die Belastung und daraus resultierenden Bewegungen des Implantats dürfen 100  $\mu$ m nicht überschreiten, da der positive Effekt auf den Gewebeumbau dann verloren geht und anstelle von Knochen Bindegewebe entsteht, wie die Untersuchungen von Brunski ergeben [177, 178].

Henry und Rosenberg sehen die kontrollierte Sofortbelastung von interforaminal im Unterkiefer gesetzten Implantaten als ein klinisch zuverlässiges Verfahren an. Der Einsatz verschiedener Implantatsysteme ist möglich [110].

Eine prothetische Sofortversorgung kann entweder durch ein Langzeitprovisorium oder eine definitive Versorgung erfolgen. Es ist möglich, verschiedenste Arten prothetischer Versorgungen zur Sofortbelastung zu nutzen. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Glauser et al überein [179, 180].

## 5.8 Problembeschreibung

Die Arbeit mit dem RoboDent-System erfordert eine exakte Planung anhand hochwertiger Bilddaten. Aus diesem Grund ist der Behandelnde auf die Anfertigung eines CT/ DVT angewiesen. Des Weiteren erfolgt die Herstellung von Wax-Ups und individuellen Navigationsschienen, die intraoperativ am Patienten angebracht werden müssen.

Durch diesen Mehraufwand entstehen für den Patienten zusätzliche Kosten.

Die lange Kette der Einzelfaktoren bei der RoboDent-Planung darf außerdem keine Detailfehler enthalten, da sonst das Behandlungsergebnis gefährdet wird. Dies geht aus den Untersuchungen von Kniha hervor [181].

Metson et al vergleichen in ihrer Studie die Navigation mit elektromagnetischer und optischer Detektion. Im Bereich der Sinuschirurgie wurde deutlich, dass beide Systeme zur intraoperativen Erkennung der Instrumente gut geeignet waren. Jedoch haben beide auch ihre Nachteile. So führt z.B. das Vorhandensein metallischer Objekte im Operationsfeld zu Interferenzen bei der elektromagnetischen Erfassung. Die Wahl eines optischen Systems hingegen bedarf durchgehend freier Sicht zwischen Infrarotkamera und Operationssitus [182].

In Studien wurde gezeigt, dass die Strahlenbelastung eines 14-Bild-Zahnfilm-Röntgenstatus oder eines Orthopantomogramms deutlich unter der eines CT liegt. Die Verwendung eines CT erhöht die Belastung deutlich. Die Strahlenbelastung durch ein DVT liegt ebenfalls klar unter der eines CT (siehe auch Tabelle 1, Seite 14) [16, 17, 19].

Hashimoto et al verglichen in einer Studie das 3DX mit einem Multidetektor-CT (CT der neuesten Generation) anhand der Bildqualität und der Strahlenbelastung für den Patienten. Die Ergebnisse zeigten, dass das 3DX im Vergleich zum Multidetektor-CT bessere Bilddaten zur Bestimmung oraler Strukturen (Schmelz, Dentin, Pulpenkavum o.ä.) liefert. Hinsichtlich der Strahlenbelastung für den Patienten war das 3DX dem Multidetektor-CT ebenfalls überlegen. Die mittleren Strahlendosen zur Bildgebung beim Multidetektor-CT betragen ein Vielfaches der Strahlendosen des 3DX. Dies zeigt nach Ansicht der Autoren die Effizienz des 3DX zur Diagnose und Untersuchung von Hartgeweben in der maxillofazialen Region [24].

Die Anfertigung eines CT hat eine höhere Strahlenbelastung für den Patienten zufolge als die Standardverfahren der Röntgendiagnostik. Nicht jede implantologische Praxis verfügt über ein

DVT, welches in der Strahlenbelastung dem OPG ähnlich ist. Jedoch ist die Anzahl der DVT-Standorte in Deutschland steigend. Um ein maximales Knochenangebot zu nutzen ist es wichtig, eine gesicherte Diagnose über das vorhandene Knochenangebot zu erhalten. Die Nutzung eines dentalen CT in der Implantologie bietet eine Reihe von Vorteilen. Aus diesem Grund haben solche Verfahren seit mehreren Jahren einen festen Platz in der Diagnostik und Planung. Hochwertige Bilddaten bieten dem Behandelnden die Möglichkeit einer dreidimensionalen Visualisierung und der Beurteilung der Kieferstrukturen. Dies wird durch Untersuchungen von Kniha et al bestätigt [181].

So gilt es den Patienten davon zu überzeugen, dass sich der Gang zum jeweiligen CT/ DVT-Standort und der größere Aufwand für ihn lohnen, da diese Daten für eine sichere Implantation notwendig sind.

### **5.8.1 Probleme bei der Navigation und der Bildgebung**

Der Einsatz der Navigation erfordert vom Behandler ein Umdenken und eine Einarbeitungszeit, da der Umgang mit den zusätzlichen Systemkomponenten einige Aufmerksamkeit bei der Arbeit erfordert. Das System arbeitet mit einer optischen Navigationskamera. Deshalb ist während der gesamten Einsatzzeit auf ein freies Strahlenfeld der Infrarotkamera zu achten. Glaskugelreflektoren dürfen nicht verdeckt werden, da sonst eine Lageerfassung durch die Navigationskamera nicht mehr möglich ist und eine Neukalibrierung zu erfolgen hat.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Schulung des Assistenzpersonals. Auch die Assistenz muss sich mit den neuen Gegebenheiten vertraut machen. Der am Patienten angebrachte Registrierflügel schränkt die Bewegungsfreiheit ein. Dies erfordert eine Änderung der gewohnten Handgriffe. Vougioukas et al zufolge ist die Navigation auch ein wertvolles Hilfsmittel, welches intellektuelle und manuelle Fähigkeiten des Chirurgen fördert aber nicht dazu dienen soll solche Fähigkeiten zu ersetzen [183].

Die Navigationsschienen werden bei teilbezahnten Patienten durch die Restzähne gehalten. Bei zahnlosen Patienten werden die Schienen entweder durch IPI's oder Minischrauben befestigt. Der Halt der Navigationsschiene ist für reproduzierbare Einstellungen unerlässlich. In einigen

Fällen zeigen sich Probleme mit der Verankerung. In zahnlosen Kiefern, wo die Verankerung über provisorische Implantate erfolgt, kommt es nach Kniha häufiger zu Problemen mit der Fixierung (siehe auch Kap. 4.13) [181].

Die Bildgebung, die Navigationsschiene und das Navigationsgerät können zu möglichen Problemen bei der navigierten Implantatsetzung führen. Nach Watzke und Kalender stellen Artefakte und Streustrahlen ein wesentliches Problem bei der Diagnostik dar [184].

Diese, durch metallische Werkstoffe hervorgerufenen Effekte, werden vor allem bei der Computertomographie bemängelt.

Die Identifizierung bestimmter Strukturen kann laut unseren Ergebnissen auch beim DVT erschwert sein (vgl.Kap.4.11, Abb.38).

Probleme bei der RoboDent-Planung, von denen in der vorliegenden Studie berichtet wurde, lassen sich auf Benutzerfehler zurückführen. Nach einiger Übung mit dem RoboDent-System können derartige Probleme reduziert werden.

Die eingeschränkte Mobilität kann in Zukunft durch eine kleinere Reflektorgeometrie verbessert werden, um so dem Operateur intraoperativ mehr Bewegungsspielraum zu geben.

## 6 Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen dieser Studie mit dem RoboDent-System lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

Es ist klar zu erkennen, dass die herkömmliche Implantation sowohl in der Planung als auch in der Umsetzung der Computernavigierten in zahlreichen Punkten unterlegen ist.

Mit Hilfe der navigierten Implantation ist es möglich, orale Implantate entsprechend der Planung zu inserieren.

Durch die exakte präoperative Diagnostik, basierend auf CT/ DVT-Datensätzen und die akkurate Platzierung, wird das höchste Maß an Primärstabilität erreicht.

Bei der Standardimplantation kann minimalinvasiv vorgegangen werden. RoboDent bietet die notwendigen Voraussetzungen, sowohl diagnostisch als auch intraoperativ.

Es traten keine Schädigungen angrenzender Strukturen während der Implantatsetzung an Nerven oder Sinus oder Kortices auf. Die Navigation schließt solche Komplikationen sicher aus.

Die Implantatpositionen können, prothetischen Planungen entsprechend, chirurgisch sinnvoll im Knochen platziert werden. Eine optimale Lagebeziehung von Implantat und Suprastruktur wird erzielt. Die Wartungsfrequenz und Reparatur einer Versorgung wird gesenkt.

Das Ergebnis einer RoboDent-Implantatinsertion rechtfertigt die Kosten, den erhöhten Aufwand sowie die durch die Notwendigkeit hochwertiger Bilddaten steigende

Strahlenbelastung für den Patienten. Eine sowohl prothetische als auch chirurgisch optimale Versorgung ist das Resultat.

## 7 Zusammenfassung

**Ziel der Studie:** In der modernen Implantologie kommen immer bessere Diagnoseverfahren und Systeme mit dem Zweck einer exakteren und sichereren Versorgung der Patienten zum Einsatz. Ziel dieser multizentrischen Studie zur navigierten Implantologie war die Evaluation der Vorteile der CT/ DVT-basierten Navigation von Zahnimplantaten, wie sie mit dem RoboDent-System möglich ist.

**Material und Methode:** Insgesamt wurden 1202 Implantate verschiedener Hersteller an 246 Patienten mit dem RoboDent inseriert. Anschließend erfolgte eine Befragung der Operateure und Patienten zur Behandlung mit dem System mittels Fragebogen. Den Patienten wurden Fragen zu ihrer Entscheidung für RoboDent gestellt. Außerdem wurden Angaben über das Auftreten von Schmerzen und Beeinträchtigungsdauer bei verschiedenen Operationstechniken und Zufriedenheit gesammelt. Die Patientenakzeptanz wurde ermittelt. Des Weiteren wurden Informationen zu Implantatpositionen, OP-Technik, Komplikationen, Primärstabilität, prothetischer Versorgung/ Sofortversorgung und Problemen mit dem System von den Behandelnden erfragt.

**Ergebnis:** Die RoboDent-Behandlung zeichnet sich durch eine hohe Patientenzufriedenheit aus. Hauptentscheidungsgrund für die Patienten war die Sicherheit. Eine ausreichende Primärstabilität der gesetzten Implantate wurde erreicht. Alle Implantate waren primärstabil. Intraoperativ kam es zu keinerlei Komplikationen. Es zeigten sich Vorteile der Stanzung gegenüber der Aufklappung sowohl intra- und postoperativ als auch in der Beeinträchtigungsdauer für die Patienten. Die Prothetik wurde, wenn möglich, bereits präoperativ angefertigt. Bei Patientenwunsch und abgesicherter Diagnose wurde eine Sofortbelastung durchgeführt. Probleme wurden von den Behandelnden bei der Einarbeitung in das neue System angegeben. Die durch die zusätzlichen Navigationswerkzeuge eingeschränkte Mobilität wurde bemängelt. Teilweise wurde die Diagnostik durch Fehler in der Bildgebung erschwert.

**Schlussfolgerung:**

Mittels navigierter Implantation ist es möglich, Implantate entsprechend der Planung mit ausreichender Primärstabilität zu inserieren. Standardimplantationen können minimalinvasiv erfolgen. Das Auftreten von Komplikationen lässt sich durch die Navigation ausschließen.

Die Implantate können prothetisch sinnvoll im Knochen inseriert werden, woraus sich ein optimales Lageverhältnis zwischen Implantat und Suprastruktur ergibt. Die Reparaturanfälligkeit der Restauration wird dadurch gesenkt. Es ist klar zu erkennen, dass die herkömmliche Implantation sowohl in der Planung als auch in der Umsetzung der computernavigierten Implantation in zahlreichen Punkten unterlegen ist. Das Ergebnis einer RoboDent-Implantatinsertion rechtfertigt die Kosten, den erhöhten Aufwand sowie die durch die Notwendigkeit hochwertiger Bilddaten steigende Strahlenbelastung für den Patienten. Im Ergebnis entsteht eine sowohl prothetisch als auch chirurgisch optimale Versorgung.

## 8 Literaturverzeichnis

1. Matsushita S, Suzuki N. [Application of computer-assisted 3D imaging simulation for surgery]. *Nippon Rinsho* 1994;52(3):817-23.
2. Gunkel AR, Thumfart WF, Freysinger W. Computerunterstützte 3D-Navigationssysteme. Übersicht und Standortbestimmung. *Hno* 2000;48(2):75-90.
3. Nolte LP, Visarius H, Arm E, Langlotz F, Schwarzenbach O, Zamorano L. Computer-aided fixation of spinal implants. *J Image Guid Surg* 1995;1(2):88-93.
4. Krivonos O, Gebhard F, Keppler P, Kinzl L, Hesser J, Manner R. Computer assisted treatment of pelvis fractures. *Stud Health Technol Inform* 2001;81:242-6.
5. Klein M, Hein A, Lueth T, Bier J. Robot-assisted placement of craniofacial implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003;18(5):712-8.
6. Watzinger F, Wanschitz F, Wagner A, Enislidis G, Millesi W, Baumann A, et al. Computer-aided navigation in secondary reconstruction of post-traumatic deformities of the zygoma. *J Craniomaxillofac Surg* 1997;25(4):198-202.
7. Koele W, Stammberger H, Lackner A, Reittner P. Image guided surgery of paranasal sinuses and anterior skull base--five years experience with the InstaTrak-System. *Rhinology* 2002;40(1):1-9.
8. Klapan I, Barbir A, Simicic L, Risavi R, Besenski N, Bumber Z, et al. Dynamic 3D computer-assisted reconstruction of a metallic retrobulbar foreign body for diagnostic and surgical purposes. [Case report of orbital injury with ethmoid bone involvement]. *Orbit* 2001;20(1):35-49.
9. Reinhardt H, Trippel M, Westermann B, Gratzl O. Computer aided surgery with special focus on neuronavigation. *Comput Med Imaging Graph* 1999;23(5):237-44.
10. Satava RM. Emerging technologies for surgery in the 21st century. *Arch Surg* 1999;134(11):1197-202.

11. Maresceaux J, Soler L, Ceulemans R, Garcia A, Henri M, Dutson E. [Image fusion, virtual reality, robotics and navigation. Effects on surgical practice]. *Chirurg* 2002;73(5):422-7.
12. Endo M, Tsunoo T, Kandatsu S, Tanada S, Aradate H, Saito Y. Four-dimensional computed tomography (4D CT)--concepts and preliminary development. *Radiat Med* 2003;21(1):17-22.
13. Miles DA, Van Dis ML. Implant radiology. *Dent Clin North Am* 1993;37(4):645-68.
14. Wyatt CC, Pharoah MJ. Imaging techniques and image interpretation for dental implant treatment. *Int J Prosthodont* 1998;11(5):442-52.
15. Abrahams JJ. Dental CT imaging: a look at the jaw. *Radiology* 2001;219(2):334-45.
16. Frederiksen NL. X rays: what is the risk? *Tex Dent J* 1995;112(2):68-72.
17. Frederiksen NL, Benson BW, Sokolowski TW. Effective dose and risk assessment from computed tomography of the maxillofacial complex. *Dentomaxillofac Radiol* 1995;24(1):55-8.
18. Clark DE, Danforth RA, Barnes RW, Burtch ML. Radiation absorbed from dental implant radiography: a comparison of linear tomography, CT scan, and panoramic and intra-oral techniques. *J Oral Implantol* 1990;16(3):156-64.
19. Ngan DC, Kharbanda OP, Geenty JP, Darendeliler MA. Comparison of radiation levels from computed tomography and conventional dental radiographs. *Aust Orthod J* 2003;19(2):67-75.
20. Sawyer-Glover AM, Shellock FG. Pre-MRI procedure screening: recommendations and safety considerations for biomedical implants and devices. *J Magn Reson Imaging* 2000;12(1):92-106.

21. Hassfeld S. Navigationsverfahren in der Implantologie - Stand der Technik und Perspektiven. *Quintessenz Implantologie* 2000;373.
22. Arai Y, Tammissalo E, Iwai K, Hashimoto K, Shinoda K. Development of a compact computed tomographic apparatus for dental use. *Dentomaxillofac Radiol* 1999;28(4):245-8.
23. Terakado M, Hashimoto K, Arai Y, Honda M, Sekiwa T, Sato H. Diagnostic imaging with newly developed ortho cubic super-high resolution computed tomography (Ortho-CT). *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2000;89(4):509-18.
24. Hashimoto K, Arai Y, Iwai K, Araki M, Kawashima S, Terakado M. A comparison of a new limited cone beam computed tomography machine for dental use with a multidetector row helical CT machine. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2003;95(3):371-7.
25. Voßhans. Genaue Lagebestimmung der unteren Achter prae operationem. *ZM* 2005;95(2):132-36.
26. Kiefer H. Strahlenexposition von analogen und digitalen Zahnstaten und Panoramaschichtaufnahmen; 2004.
27. Cohnen M, Kemper J, Mobes O, Pawelzik J, Modder U. Radiation dose in dental radiology. *Eur Radiol* 2002;12(3):634-7.
28. Ito K, Gomi Y, Sato S, Arai Y, Shinoda K. Clinical application of a new compact CT system to assess 3-D images for the preoperative treatment planning of implants in the posterior mandible A case report. *Clin Oral Implants Res* 2001;12(5):539-42.
29. Minoretti R, Merz BR, Triaca A. Predetermined implant positioning by means of a novel guide template technique. *Clin Oral Implants Res* 2000;11(3):266-72.
30. Naitoh M, Arijji E, Okumura S, Ohsaki C, Kurita K, Ishigami T. Can implants be correctly angulated based on surgical templates used for osseointegrated dental implants? *Clin Oral Implants Res* 2000;11(5):409-14.

31. Fortin T, Champleboux G, Lormee J, Coudert JL. Precise dental implant placement in bone using surgical guides in conjunction with medical imaging techniques. *J Oral Implantol* 2000;26(4):300-3.
32. Randelzhofer P, de la Barrera JM, Spielberg M, Kurtz C, Strub JR. Three-dimensional navigation in oral implantology: a preliminary investigation. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2001;21(6):617-26.
33. Schermeier OL, T. Methoden und Verfahren zur Navigation in der dentalen Implantologie. *Automatisierungstechnik* 2002:253-261.
34. Watzinger F, Birkfellner W, Wanschitz F, Millesi W, Schopper C, Sinko K, et al. Positioning of dental implants using computer-aided navigation and an optical tracking system: case report and presentation of a new method. *J Craniomaxillofac Surg* 1999;27(2):77-81.
35. Gaggl A, Schultes G, Karcher H. Navigational precision of drilling tools preventing damage to the mandibular canal. *J Craniomaxillofac Surg* 2001;29(5):271-5.
36. Birkfellner W, Solar P, Gahleitner A, Huber K, Kainberger F, Kettenbach J, et al. In-vitro assessment of a registration protocol for image guided implant dentistry. *Clin Oral Implants Res* 2001;12(1):69-78.
37. Schermeier OL, T. The Precision of the RoboDent System - An in vitro study. *Computer assisted Radiology and Surgery* 2002.
38. Meyer U, Wiesmann HP, Runte C, Fillies T, Meier N, Lueth T, 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(2):102-8.
39. Asvanund C, Morgano SM. Restoration of unfavorably positioned implants for a partially edentulous patient by using an overdenture retained with a milled bar and attachments: a clinical report. *J Prosthet Dent* 2004;91(1):6-10.

40. Rangert B, Krogh PH, Langer B, Van Roekel N. Bending overload and implant fracture: a retrospective clinical analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1995;10(3):326-34.
41. Taylor TD, Agar JR, Vogiatzi T. Implant prosthodontics: current perspective and future directions. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2000;15(1):66-75.
42. Skalak R. Biomechanical considerations in osseointegrated prostheses. *J Prosthet Dent* 1983;49(6):843-8.
43. Rangert B, Jemt T, Jorneus L. Forces and moments on Branemark implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1989;4(3):241-7.
44. Ueda C, Markarian RA, Sendyk CL, Lagana DC. Photoelastic analysis of stress distribution on parallel and angled implants after installation of fixed prostheses. *Pesqui Odontol Bras* 2004;18(1):45-52.
45. Walton JN, Huizinga SC, Peck CC, Naitoh M, Arijji E, Okumura S, et al. Implant angulation: a measurement technique, implant overdenture maintenance, and the influence of surgical experience. Can implants be correctly angulated based on surgical templates used for osseointegrated dental implants? *Int J Prosthodont* 2001;14(6):523-30.
46. Isidor F. Loss of osseointegration caused by occlusal load of oral implants. A clinical and radiographic study in monkeys. *Clin Oral Implants Res* 1996;7(2):143-52.
47. Lima Verde MA, Morgano SM, Hashem A. Technique to restore unfavorably inclined implants. *J Prosthet Dent* 1994;71(4):359-63.
48. Storum K, Carrick JL. Implant-osseous osteotomy for correction of the misaligned anterior maxillary implant. *Dent Clin North Am* 2001;45(1):181-7.
49. Walton JN, Huizinga SC, Peck CC, Rodriguez-Tizcareno MH. Implant angulation: a measurement technique, implant overdenture maintenance, and the influence of surgical experience. A double cast fixed detachable prosthesis for the correction of severely angulated implants. *Int J Prosthodont* 2001;14(6):523-30.

50. Grossmann Y, Madjar D. Prosthetic treatment for severely misaligned implants: a clinical report. *J Prosthet Dent* 2002;88(3):259-62.
51. Gulizio MP, Agar JR, Kelly JR, Taylor TD. Effect of implant angulation upon retention of overdenture attachments. *J Prosthodont* 2005;14(1):3-11.
52. Rosenquist B. Fixture placement posterior to the mental foramen with transpositioning of the inferior alveolar nerve. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1992;7(1):45-50.
53. Smith DE, Zarb GA. Criteria for success of osseointegrated endosseous implants. *J Prosthet Dent* 1989;62(5):567-72.
54. Akca K, Iplikcioglu H, Cehreli MC. A surgical guide for accurate mesiodistal paralleling of implants in the posterior edentulous mandible. *J Prosthet Dent* 2002;87(2):233-5.
55. Zechner W, Bernhart T, Zauza K, Celar A, Watzek G. Multidimensional osteodistraktion for correction of implant malposition in edentulous segments. *Clin Oral Implants Res* 2001;12(5):531-8.
56. Watanabe F, Hata Y, Mataga I, Yoshie S. Retrieval and replacement of a malpositioned dental implant: a clinical report. *J Prosthet Dent* 2002;88(3):255-8.
57. Hallman M, Carlsson B. Surgical correction of malpositioned implants. A case report. *Clin Oral Implants Res* 1996;7(4):316-9.
58. Becker W, Becker BE, Newman MG, Nyman S. [Clinical and microbiological findings, that can cause failure of dental implants]. *Quintessenz* 1991;42(1):9-21.
59. Gittelsohn GL. Vertical dimension of occlusion in implant dentistry: significance and approach. *Implant Dent* 2002;11(1):33-40.
60. Davidoff SR. Restorative-based treatment planning: determining adequate support for implant-retained fixed restorations. *Implant Dent* 1996;5(3):179-84.

61. Dixon DL, Breeding LC, Sadler JP, McKay ML. Comparison of screw loosening, rotation, and deflection among three implant designs. *J Prosthet Dent* 1995;74(3):270-8.
62. Watanabe F, Uno I, Hata Y, Neuendorff G, Kirsch A. Analysis of stress distribution in a screw-retained implant prosthesis. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2000;15(2):209-18.
63. Perel ML. Parafunctional habits, nightguards, and root form implants. *Implant Dent* 1994;3(4):261-3.
64. Odman J, Lekholm U, Jemt T, Thilander B. Osseointegrated implants as orthodontic anchorage in the treatment of partially edentulous adult patients. *Eur J Orthod* 1994;16(3):187-201.
65. Lindquist LW, Rockler B, Carlsson GE. Bone resorption around fixtures in edentulous patients treated with mandibular fixed tissue-integrated prostheses. *J Prosthet Dent* 1988;59(1):59-63.
66. Quirynen M, Naert I, van Steenberghe D. Fixture design and overload influence marginal bone loss and fixture success in the Branemark system. *Clin Oral Implants Res* 1992;3(3):104-11.
67. Kopp KC, Koslow AH, Abdo OS. Predictable implant placement with a diagnostic/surgical template and advanced radiographic imaging. *J Prosthet Dent* 2003;89(6):611-5.
68. Mericske-Stern R, Assal P, Mericske E, Burgin W. Occlusal force and oral tactile sensibility measured in partially edentulous patients with ITI implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1995;10(3):345-53.
69. Carr AB, Laney WR. Maximum occlusal force levels in patients with osseointegrated oral implant prostheses and patients with complete dentures. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1987;2(2):101-8.

70. Zitzmann N SP. Die prothetisch determinierte Implantatplanung. Quintessenz Implantologie 1998;4:363-379.
71. Marchack CB. A custom titanium abutment for the anterior single-tooth implant. J Prosthet Dent 1996;76(3):288-91.
72. Salinas TJ, Sadan A. Establishing soft tissue integration with natural tooth-shaped abutments. Pract Periodontics Aesthet Dent 1998;10(1):35-42; quiz 44.
73. Wichmann M. Neue CAD/CAM Technologie zur Herstellung individueller Distanzhülsen und Vollkeramikronen auf Implantaten. Quintessenz Implantologie 2000;3(Sonderdruck).
74. Van Iperen O. Der Einsatz individueller Keramikabutments in der Implantatprothetik. Quintessenz Zahntechnik 2001:744-754.
75. Al-Ansari BH, Morris RR. Placement of dental implants without flap surgery: a clinical report. Int J Oral Maxillofac Implants 1998;13(6):861-5.
76. Saadoun AP. Single tooth implant restoration: surgical management for aesthetic results. Int J Dent Symp 1995;3(1):30-5.
77. Lazzara RJ. Managing the soft tissue margin: the key to implant aesthetics. Pract Periodontics Aesthet Dent 1993;5(5):81-8.
78. Parel SM. Aesthetics and osseointegration. Dent Today 1990;9(1):50-1.
79. Campelo LD, Camara JR. Flapless implant surgery: a 10-year clinical retrospective analysis. Int J Oral Maxillofac Implants 2002;17(2):271-6.
80. Gaggl ASG. Die Verwendung einer Schleimhautstanze bei der Insertion von Implantaten. Quintessenz Implantologie 2001:63-69.
81. Gaggl A, Schultes G, Rainer H, Karcher H. The transgingival approach for placement of distraction implants. J Oral Maxillofac Surg 2002;60(7):793-6.

82. Auty C, Siddiqui A. Punch technique for preservation of interdental papillae at nonsubmerged implant placement. *Implant Dent* 1999;8(2):160-6.
83. Kan JY, Rungcharassaeng K, Ojano M, Goodacre CJ. Flapless anterior implant surgery: a surgical and prosthodontic rationale. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 2000;12(5):467-74; quiz 476.
84. Tarnow DP, Magner AW, Fletcher P. The effect of the distance from the contact point to the crest of bone on the presence or absence of the interproximal dental papilla. *J Periodontol* 1992;63(12):995-6.
85. Grunder U. The inlay-graft technique to create papillae between implants. *J Esthet Dent* 1997;9(4):165-8.
86. Adell R, Lekholm U, Rockler B, Branemark PI. A 15-year study of osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. *Int J Oral Surg* 1981;10(6):387-416.
87. Abbou M. Primary stability and osseointegration: preliminary clinical results with a tapered diminishing-thread implant. *Pract Proced Aesthet Dent* 2003;15(2):161-8; quiz 170.
88. Friberg B, Jemt T, Lekholm U. Early failures in 4,641 consecutively placed Branemark dental implants: a study from stage 1 surgery to the connection of completed prostheses. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1991;6(2):142-6.
89. Lekholm UZG. Patient selection and preparation; 1985.
90. Misch CE. Density of bone: effect on treatment plans, surgical approach, healing, and progressive boen loading. *Int J Oral Implantol* 1990;6(2):23-31.
91. Quirynen M, Lamoral Y, Dekeyser C, Peene P, van Steenberghe D, Bonte J, et al. CT scan standard reconstruction technique for reliable jaw bone volume determination. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1990;5(4):384-9.

92. Hounsfield GN. Nobel Award address. Computed medical imaging. *Med Phys* 1980;7(4):283-90.
93. Jaffin RA, Berman CL. The excessive loss of Branemark fixtures in type IV bone: a 5-year analysis. *J Periodontol* 1991;62(1):2-4.
94. Trisi P, Rao W. Bone classification: clinical-histomorphometric comparison. *Clin Oral Implants Res* 1999;10(1):1-7.
95. Friberg B, Sennerby L, Roos J, Lekholm U. Identification of bone quality in conjunction with insertion of titanium implants. A pilot study in jaw autopsy specimens. *Clin Oral Implants Res* 1995;6(4):213-9.
96. Davies JE. Mechanisms of endosseous integration. *Int J Prosthodont* 1998;11(5):391-401.
97. Buser D, Nydegger T, Hirt HP, Cochran DL, Nolte LP. Removal torque values of titanium implants in the maxilla of miniature pigs. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1998;13(5):611-9.
98. Johnson BW. HA-coated dental implants: long-term consequences. *J Calif Dent Assoc* 1992;20(6):33-41.
99. Cheang P, Khor KA. Addressing processing problems associated with plasma spraying of hydroxyapatite coatings. *Biomaterials* 1996;17(5):537-44.
100. O'Sullivan D, Sennerby L, Meredith N. Measurements comparing the initial stability of five designs of dental implants: a human cadaver study. *Clin Implant Dent Relat Res* 2000;2(2):85-92.
101. Langer B, Langer L, Herrmann I, Jorneus L. The wide fixture: a solution for special bone situations and a rescue for the compromised implant. Part 1. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1993;8(4):400-8.

102. Davarpanah M, Martinez H, Tecucianu JF, Celletti R, Lazzara R. Small-diameter implants: indications and contraindications. *J Esthet Dent* 2000;12(4):186-94.
103. DelBalso AM, Greiner FG, Licata M. Role of diagnostic imaging in evaluation of the dental implant patient. *Radiographics* 1994;14(4):699-719.
104. Glauser R NR. Die Osteotomietechnik- eine Alternative Aufbereitungsmethode des Implantatlagers in der posterioren Maxilla. *Quintessenz Implantologie* 1998:103-120.
105. Orenstein IH, Tarnow DP, Morris HF, Ochi S. Factors affecting implant mobility at placement and integration of mobile implants at uncovering. *J Periodontol* 1998;69(12):1404-12.
106. Martinez H, Davarpanah M, Missika P, Celletti R, Lazzara R. Optimal implant stabilization in low density bone. *Clin Oral Implants Res* 2001;12(5):423-32.
107. Piattelli A, Trisi P, Romasco N, Emanuelli M. Histologic analysis of a screw implant retrieved from man: influence of early loading and primary stability. *J Oral Implantol* 1993;19(4):303-6.
108. Meredith N. Assessment of implant stability as a prognostic determinant. *Int J Prosthodont* 1998;11(5):491-501.
109. Ericsson I, Randow K, Nilner K, Peterson A. Early functional loading of Branemark dental implants: 5-year clinical follow-up study. *Clin Implant Dent Relat Res* 2000;2(2):70-7.
110. Henry P, Rosenberg I. Single-stage surgery for rehabilitation of the edentulous mandible: preliminary results. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 1994;6(9):15-22; quiz 24.
111. Degidi M, Piattelli A. Immediate functional and non-functional loading of dental implants: a 2- to 60-month follow-up study of 646 titanium implants. *J Periodontol* 2003;74(2):225-41.

112. Becker W, Wong J. Early functional loading in the fully edentulous mandible after mandibular resection and reconstruction due to an ameloblastoma: case report. *Clin Implant Dent Relat Res* 2003;5(1):47-51.
113. Austin BW, Stevenson AR, Hogan PF, Walton TR. Same day teeth--Sydney style: immediate functional loading of Branemark dental implants in the anterior mandible. *Ann R Australas Coll Dent Surg* 2000;15:340-2.
114. Chee W, Jivraj S. Efficiency of immediately loaded mandibular full-arch implant restorations. *Clin Implant Dent Relat Res* 2003;5(1):52-6.
115. Szmukler-Moncler S, Piattelli A, Favero GA, Dubruille JH. Considerations preliminary to the application of early and immediate loading protocols in dental implantology. *Clin Oral Implants Res* 2000;11(1):12-25.
116. Vassos DM. Single-stage surgery for implant placement: a retrospective study. *J Oral Implantol* 1997;23(4):181-5.
117. Horiuchi K, Uchida H, Yamamoto K, Sugimura M. Immediate loading of Branemark system implants following placement in edentulous patients: a clinical report. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2000;15(6):824-30.
118. Degidi M, Piattelli A. Immediately loaded bar-connected implants with an anodized surface inserted in the anterior mandible in a patient treated with diphosphonates for osteoporosis: a case report with a 12-month follow-up. *Clin Implant Dent Relat Res* 2003;5(4):269-72.
119. Degidi M, Pieri F, Marchetti C, Piattelli A. Immediate loading of dental implants placed in distracted bone: a case report. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2004;19(3):448-54.
120. McKibbin B. The biology of fracture healing in long bones. *J Bone Joint Surg Br* 1978;60-B(2):150-62.

121. Albrektsson T, Branemark PI, Hansson HA, Lindstrom J. Osseointegrated titanium implants. Requirements for ensuring a long-lasting, direct bone-to-implant anchorage in man. *Acta Orthop Scand* 1981;52(2):155-70.
122. Carlsson L, Rostlund T, Albrektsson B, Albrektsson T. Implant fixation improved by close fit. Cylindrical implant-bone interface studied in rabbits. *Acta Orthop Scand* 1988;59(3):272-5.
123. Schnitman PA, Wohrle PS, Rubenstein JE, DaSilva JD, Wang NH. Ten-year results for Branemark implants immediately loaded with fixed prostheses at implant placement. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1997;12(4):495-503.
124. Bahat O. Treatment planning and placement of implants in the posterior maxillae: report of 732 consecutive Nobelpharma implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1993;8(2):151-61.
125. Schliephake H. Konzepte zur Verkürzung der Behandlungsdauer. *Quintessenz Implantologie* 2001:357-372.
126. Tjellstrom A, Granstrom G. One-stage procedure to establish osseointegration: a zero to five years follow-up report. *J Laryngol Otol* 1995;109(7):593-8.
127. McCutchen JW, Collier JP, Mayor MB. Osseointegration of titanium implants in total hip arthroplasty. *Clin Orthop* 1990(261):114-25.
128. Whiteside LA, Arima J, White SE, Branam L, McCarthy DS. Fixation of the modular total hip femoral component in cementless total hip arthroplasty. *Clin Orthop* 1994(298):184-90.
129. Pogrel MA, Kaban LB. Injuries to the inferior alveolar and lingual nerves. *J Calif Dent Assoc* 1993;21(1):50-4.
130. Dao TT, Mellor A. Sensory disturbances associated with implant surgery. *Int J Prosthodont* 1998;11(5):462-9.

131. Ellies LG, Hawker PB. The prevalence of altered sensation associated with implant surgery. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1993;8(6):674-9.
132. Bartling R, Freeman K, Kraut RA. The incidence of altered sensation of the mental nerve after mandibular implant placement. *J Oral Maxillofac Surg* 1999;57(12):1408-12.
133. Nazarian Y, Eliav E, Nahlieli O, Wismeijer D, van Waas MA, Vermeeren JI, et al. [Nerve injury following implant placement: prevention, diagnosis and treatment modalities]. Patients' perception of sensory disturbances of the mental nerve before and after implant surgery: a prospective study of 110 patients. *Refuat Hapeh Vehashinayim* 2003;20(3):44-50, 101.
134. Laboda G. Life-threatening hemorrhage after placement of an endosseous implant: report of case. *J Am Dent Assoc* 1990;121(5):599-600.
135. Mason ME, Triplett RG, Alfonso WF. Life-threatening hemorrhage from placement of a dental implant. *J Oral Maxillofac Surg* 1990;48(2):201-4.
136. Boyes-Varley JG, Lownie JF. Haematoma of the floor of the mouth following implant placement. *Sadj* 2002;57(2):64-5.
137. Weibrich G, Foitzik C, Kuffner H. [Life threatening oral hemorrhage after implantation into the distal right mandible]. *Mund Kiefer Gesichtschir* 2002;6(6):442-5.
138. Walton JN. Altered sensation associated with implants in the anterior mandible: a prospective study. *J Prosthet Dent* 2000;83(4):443-9.
139. Ellies LG, Walton JN, Dao TT, Mellor A, Bartling R, Freeman K, et al. Altered sensation following mandibular implant surgery: a retrospective study. Altered sensation associated with implants in the anterior mandible: a prospective study. Sensory disturbances associated with implant surgery. The incidence of altered sensation of the mental nerve after mandibular implant placement. *J Prosthet Dent* 1992;68(4):664-71.

140. Mason ME, Triplett RG, Van Sickels JE, Parel SM. Mandibular fractures through endosseous cylinder implants: report of cases and review. *J Oral Maxillofac Surg* 1990;48(3):311-7.
141. Schug T, Dumbach J, Rodemer H. [Mandibular fracture. An unusual implantation complication]. *Mund Kiefer Gesichtschir* 1999;3(6):335-7.
142. Meijer HJ, Raghoobar GM, Visser A. Mandibular fracture caused by peri-implant bone loss: report of a case. *J Periodontol* 2003;74(7):1067-70.
143. Worthington P. Medicolegal aspects of oral implant surgery. *Aust Prosthodont J* 1995;9 Suppl:13-7.
144. Curley AW. Dental implant jurisprudence: avoiding the legal failures. *J Indiana Dent Assoc* 2002;81(3):29-34.
145. Scribano E, Ascenti G, Mazziotti S, Blandino A, Racchiusa S, Gualniera P. Computed tomography in dental implantology: medico-legal implications. *Radiol Med (Torino)* 2003;105(1-2):92-9.
146. Givol N, Taicher S, Halamish-Shani T, Chaushu G. Risk management aspects of implant dentistry. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2002;17(2):258-62.
147. Petropoulos VC, Balshi TJ, Balshi SF, Wolfinger GJ. Extractions, implant placement, and immediate loading of mandibular implants: a case report of a functional fixed prosthesis in 5 hours. *Implant Dent* 2003;12(4):283-90.
148. Schermeier O, Lueth T, Glagau J, Szymanski D, Tita R, Hildebrand D, et al. Automatic patient registration in computer assisted maxillofacial surgery. *Stud Health Technol Inform* 2002;85:461-7.
149. Fortin T, Bosson JL, Coudert JL, Isidori M. Reliability of preoperative planning of an image-guided system for oral implant placement based on 3-dimensional images: an in vivo study. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003;18(6):886-93.

150. Kramer FJ, Baethge C, Swennen G, Rosahl S. Navigated vs. conventional implant insertion for maxillary single tooth replacement. *Clin Oral Implants Res* 2005;16(1):60-8.
151. Wanschitz F, Birkfellner W, Watzinger F, Schopper C, Patruta S, Kainberger F, et al. Evaluation of accuracy of computer-aided intraoperative positioning of endosseous oral implants in the edentulous mandible. *Clin Oral Implants Res* 2002;13(1):59-64.
152. Siessegger M, Schneider BT, Mischkowski RA, Lazar F, Krug B, Klesper B, et al. Use of an image-guided navigation system in dental implant surgery in anatomically complex operation sites. *J Craniomaxillofac Surg* 2001;29(5):276-81.
153. Gaggl A, Schultes G. Assessment of accuracy of navigated implant placement in the maxilla. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2002;17(2):263-70.
154. Bahat O. Surgical planning. *J Calif Dent Assoc* 1992;20(5):31-46.
155. Zinner ID, Small SA, Panno FV. Presurgical prosthetics and surgical templates. *Dent Clin North Am* 1989;33(4):619-33.
156. Peters P, Langlotz F, Nolte LP. Computer assisted screw insertion into real 3D rapid prototyping pelvis models. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2002;17(5):376-82.
157. Parel SM, Triplett RG. Interactive imaging for implant planning, placement, and prosthesis construction. *J Oral Maxillofac Surg* 2004;62(9 Suppl 2):41-7.
158. Casap N, Wexler A, Persky N, Schneider A, Lustmann J. Navigation surgery for dental implants: assessment of accuracy of the image guided implantology system. *J Oral Maxillofac Surg* 2004;62(9 Suppl 2):116-9.
159. Sarment DP, Sukovic P, Clinthorne N. Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2003;18(4):571-7.

160. Walton JN, Huizinga SC, Peck CC. Implant angulation: a measurement technique, implant overdenture maintenance, and the influence of surgical experience. *Int J Prosthodont* 2001;14(6):523-30.
161. Khoury G. Ein neues, flexibel einsetzbares Parallelimplantat-Bohrungsinstrument. *Quintessenz Implantologie* 1999:309-11.
162. Solar P, Gahleitner A. [Dental CT in the planning of surgical procedures. Its significance in the oro-maxillofacial region from the viewpoint of the dentist]. *Radiologe* 1999;39(12):1051-63.
163. Wheeler SL, Vogel RE, Casellini R. Tissue preservation and maintenance of optimum esthetics: a clinical report. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2000;15(2):265-71.
164. Goodacre CJ, Kan JY, Rungcharassaeng K. Clinical complications of osseointegrated implants. *J Prosthet Dent* 1999;81(5):537-52.
165. Wismeijer D, van Waas MA, Vermeeren JI, Kalk W. Patients' perception of sensory disturbances of the mental nerve before and after implant surgery: a prospective study of 110 patients. *Br J Oral Maxillofac Surg* 1997;35(4):254-9.
166. Takacs G. [Preoperative and surgical protocols for better implant integration]. *Int J Dent Symp* 1994;2(1):28-31.
167. Rosenfeld AL, Mecal RA. The use of interactive computed tomography to predict the esthetic and functional demands of implant-supported prostheses. *Compend Contin Educ Dent* 1996;17(12):1125-8, 1130-2 passim; quiz 1146.
168. Witkowski S WD. Röntgenschablonen und bildgebende Verfahren in der prothetisch orientierten Implantologie. *Quintessenz Zahntech* 1996:1298-1316.
169. Saba S. Occlusal stability in implant Prosthodontics. *J Can Dent Assoc* 2001:522-6.
170. Melsen B, Lang NP. Biological reactions of alveolar bone to orthodontic loading of oral implants. *Clin Oral Implants Res* 2001;12(2):144-52.

171. Sahin S, Cehreli MC, Yalcin E. The influence of functional forces on the biomechanics of implant-supported prostheses--a review. *J Dent* 2002;30(7-8):271-82.
172. Balshi TJ, Wolfinger GJ. Immediate loading of dental implants in the edentulous maxilla: case study of a unique protocol. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2003;23(1):37-45.
173. Ganeles J, Rosenberg MM, Holt RL, Reichman LH. Immediate loading of implants with fixed restorations in the completely edentulous mandible: report of 27 patients from a private practice. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2001;16(3):418-26.
174. Marchack CB. An immediately loaded CAD/CAM-guided definitive prosthesis: a clinical report. *J Prosthet Dent* 2005;93(1):8-12.
175. Kosinski TE, Skowronski R, Jr., Wolfinger GJ, Balshi TJ, Rangert B. Immediate implant loading: a case report. Immediate functional loading of Branemark system implants in edentulous mandibles: clinical report of the results of developmental and simplified protocols. *J Oral Implantol* 2002;28(2):87-91.
176. Engstrand P, Grondahl K, Ohrenell LO, Nilsson P, Nannmark U, Branemark PI. Prospective follow-up study of 95 patients with edentulous mandibles treated according to the Branemark Novum concept. *Clin Implant Dent Relat Res* 2003;5(1):3-10.
177. Brunski JB. Biomechanical factors affecting the bone-dental implant interface. *Clin Mater* 1992;10(3):153-201.
178. Brunski JB. In vivo bone response to biomechanical loading at the bone/dental-implant interface. *Adv Dent Res* 1999;13:99-119.
179. Glauser R, Ree A, Lundgren A, Gottlow J, Hammerle CH, Scharer P. Immediate occlusal loading of Branemark implants applied in various jawbone regions: a prospective, 1-year clinical study. *Clin Implant Dent Relat Res* 2001;3(4):204-13.

180. Glauser R, Lundgren AK, Gottlow J, Sennerby L, Portmann M, Ruhstaller P, et al. Immediate occlusal loading of Branemark TiUnite implants placed predominantly in soft bone: 1-year results of a prospective clinical study. *Clin Implant Dent Relat Res* 2003;5 Suppl 1:47-56.
181. Kniha H. Die Konzeption der CT-gestützten Navigation bei der dentalen Implantatinsertion. *Quintessenz Zahntechnik* 2003:842-863.
182. Metson R, Gliklich RE, Cosenza M. A comparison of image guidance systems for sinus surgery. *Laryngoscope* 1998;108(8 Pt 1):1164-70.
183. Vougioukas VI, Hubbe U, Hochmuth A, Gellrich NC, Van Velthoven V. Perspectives and limitations of image-guided neurosurgery in pediatric patients. *Childs Nerv Syst* 2003.
184. Watzke O, Kalender WA. A pragmatic approach to metal artifact reduction in CT: merging of metal artifact reduced images. *Eur Radiol* 2004;14(5):849-56.

## 9 Anlagen

### 9.1 Liste der Abbildungen und Tabellen

<b>Abb. 1</b>	Aufklappung der Schleimhaut regio 33-43 zur Aufnahme mehrerer Implantate (Enrico Trilck, MSc)	<b>S. 23</b>
<b>Abb. 2</b>	Gestanzte Schleimhaut regio 36 zur Aufnahme eines Implantats (Enrico Trilck, MSc)	<b>S. 24</b>
<b>Abb. 3</b>	Schematische Darstellung der Knochendichte nach Lekholm/Zarb1985 [89]	<b>S. 27</b>
<b>Abb. 4</b>	Schematische Darstellung der fünf Knochenatrophiegrade im Oberkiefer nach Lekholm/ Zarb 1985 [89]	<b>S. 28</b>
<b>Abb. 5</b>	Implantate verschiedener Typen und Hersteller (Praxis Dr. Dr. Bonsmann, Dr. Diener, Düsseldorf)	<b>S. 30</b>
<b>Abb. 6</b>	Die Mobile RoboDent-Station (Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité)	<b>S. 43</b>
<b>Abb. 7</b>	Die Patientennavigationsschiene (Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité)	<b>S. 44</b>
<b>Abb. 8</b>	Der Handstücktracker (Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité)	<b>S. 44</b>
<b>Abb. 9</b>	Der Touchscreen mit Maus und Spaceball (Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité)	<b>S. 45</b>
<b>Abb. 10</b>	Der schwenkbare Miniaturmonitor an der Station (Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité)	<b>S. 46</b>
<b>Abb. 11-14</b>	Ansichten der RoboDent Software (Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité)	<b>S. 47</b>
<b>Abb. 15</b>	Altersverteilung der Patienten	<b>S. 64</b>

<b>Abb. 16</b>	Patientenbegründung zur Teilnahme an der RoboDent-Studie	<b>S. 65</b>
<b>Abb. 17</b>	Begründung der Patienten zur Versorgung mit RoboDent	<b>S. 66</b>
<b>Abb. 18</b>	Patientenzufriedenheit nach dem Einsatz des RoboDent-Systems	<b>S. 66</b>
<b>Abb. 19</b>	Diagnosen zur Morbidität der Patienten	<b>S. 67</b>
<b>Abb. 20</b>	Das Auftreten von pathologischen Veränderungen bei den Patienten	<b>S. 68</b>
<b>Abb. 21</b>	Regionen der gesetzten Implantate	<b>S. 69</b>
<b>Abb. 22</b>	Prozentuale Verteilung der Planungsumsetzung der Implantate	<b>S. 70</b>
<b>Abb. 23</b>	Vorhandene Primärstabilität der gesetzten Implantate in %	<b>S. 71</b>
<b>Abb. 24</b>	Häufigkeit der angewendeten OP-Technik bei der Implantation	<b>S. 72</b>
<b>Abb. 25</b>	Regionen der durchgeführten Stanzung (Implantate/ Region)	<b>S. 73</b>
<b>Abb. 26</b>	Regionen der durchgeführten Aufklappung (Implantate/ Region)	<b>S. 73</b>
<b>Abb. 27</b>	Postoperative Schmerzen durch die Implantation	<b>S. 74</b>
<b>Abb. 28</b>	Postoperative Schwellungen bei den verschiedenen OP-Techniken	<b>S: 75</b>
<b>Abb. 29</b>	Auftreten von Hämatomen bei den verschiedenen OP-Techniken	<b>S. 75</b>
<b>Abb. 30</b>	Art der eingesetzten Anästhesie bei Aufklappung	<b>S. 76</b>
<b>Abb. 31</b>	Art der eingesetzten Anästhesie bei Stanzung	<b>S. 76</b>
<b>Abb. 32</b>	Dauer der Beeinträchtigung der Patienten bei Implantation durch Aufklappung	<b>S. 77</b>
<b>Abb. 33</b>	Dauer der Beeinträchtigung der Patienten bei Implantation durch Stanzung	<b>S. 77</b>
<b>Abb. 34</b>	Die prothetische Versorgung der Patienten	<b>S. 78</b>
<b>Abb. 35</b>	Gründe für eine Sofortversorgung der Patienten	<b>S. 79</b>
<b>Abb. 36</b>	Gründe gegen eine Sofortversorgung der Patienten	<b>S. 80</b>
<b>Abb. 37</b>	Probleme, die bei der CT-Auswertung auftraten	<b>S. 81</b>
<b>Abb. 38</b>	Probleme, die bei der DVT-Auswertung auftraten	<b>S. 82</b>
<b>Abb. 39</b>	Probleme, die sich durch die Navigationsschiene ergaben	<b>S. 83</b>
<b>Tab. 1</b>	Strahlendosen der verschiedenen bildgebenden Verfahren [23, 25, 26]	<b>S. 14</b>

<b>Tab. 2</b>	Die vier Knochenqualitäten nach Lekholm/ Zarb 1985 [89]	<b>S. 27</b>
<b>Tab. 3</b>	Klassifikation der Knochenquantität (Zitzmann/Schärer) [70]	<b>S. 28</b>
<b>Tab. 4</b>	An der Studie beteiligte Kliniken und Praxen	<b>S. 63</b>

## 9.2 Danksagungen

Ich danke Herrn Univ. Prof. Dr. mult. h.c. Jürgen Bier für die Überlassung des Promotionsthemas und die persönliche Betreuung während der gesamten Arbeit.

Frau Dr. E.M. Fabricius möchte ich für ihre Unterstützung bei Lektüre und Korrektur des Manuskripts und für ihre Hilfsbereitschaft danken.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und klinische Navigation und Robotik der Charité für deren Unterstützung.

Herrn Enriko Trilck, MSc möchte ich für seine Hilfsbereitschaft und seinen fachlichen Rat danken.

Ferner gilt mein Dank Herrn Dr. Wolfgang Diener für seine Unterstützung.

### 9.3 Lebenslauf

#### Persönliche Daten

---

Name: Mosch  
Vorname: Florian Hermann Günter  
Geburtstag: 06.01.1977  
Familienstand: ledig

#### Schulbildung

---

1983-1987 Grundsule Nordschule, Karlsruhe  
1987-1997 Gymnasium Neureut, Karlsruhe

#### Zivildienst

---

1997-1998 Zivildienst beim Paritätischen Wohlfahrtsverband (DPWV)

#### Hochschulausbildung

---

10/ 1999 Beginn des Zahnmedizinstudiums an der Humboldt-Universität zu Berlin  
04/ 2002 Zahnärztliche Vorprüfung  
ab 07/ 2005 Staatsexamen

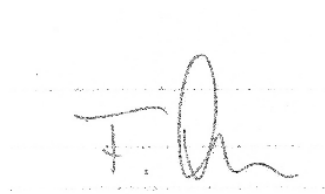
#### Weiterbildung

---

1989-1998 Tauchausbildung zum Padi Divemaster (non-teaching status)  
1998-1999 Famulatur im Städtischen Klinikum Karlsruhe, Abteilung Mund-,  
Kiefer-, Gesichtschirurgie und in der MKG-Praxis Dr. Dr. Bonsmann/  
Dr. Diener, Düsseldorf; Praktika bei Dialog-Marketing, Fellbach sowie  
Dentallabor Pehl & Partner, Karlsruhe

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass die vorliegende Dissertation von mir selbst und ohne die Hilfe Dritter verfasst wurde, auch in Teilen keine Kopie anderer Arbeiten darstellt und die benutzten Hilfsmittel, sowie die Literatur vollständig angegeben sind.

A handwritten signature in black ink on a white background with faint horizontal lines. The signature is written in a cursive style, starting with a large 'F' and ending with a long, sweeping tail.

Berlin, den 06. 12. 2005

Florian Mosch