

## 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 Behandelnden 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].

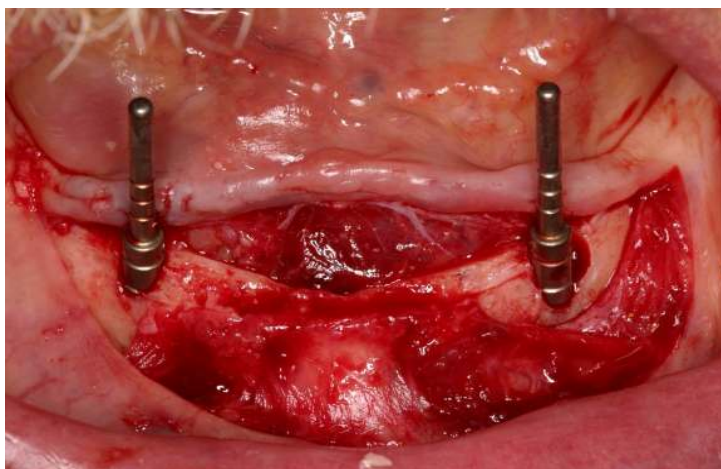


Abb. 1: Aufklappung der Schleimhaut regio 33-43 zur Aufnahme mehrerer Implantate (Quelle: Enrico Trilck, MSc)



### 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].

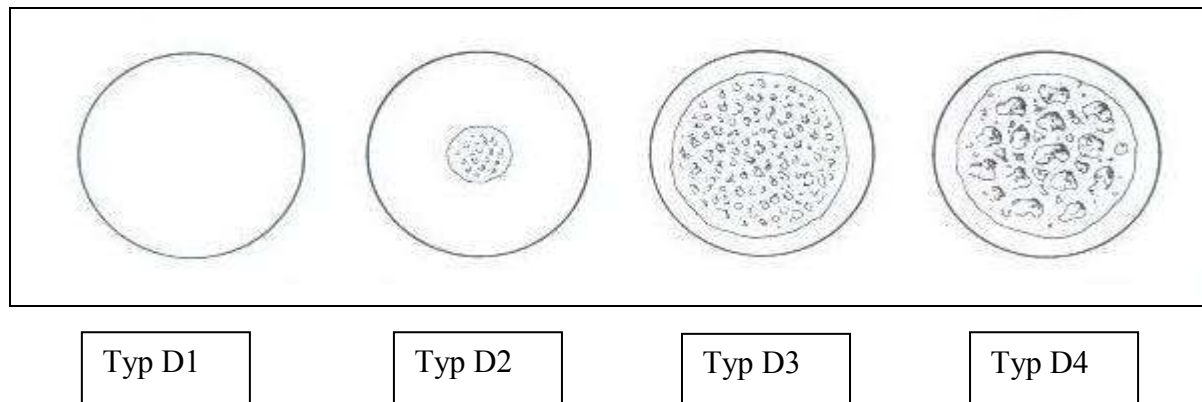
## **1.6 Primärstabilität von Implantaten**

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

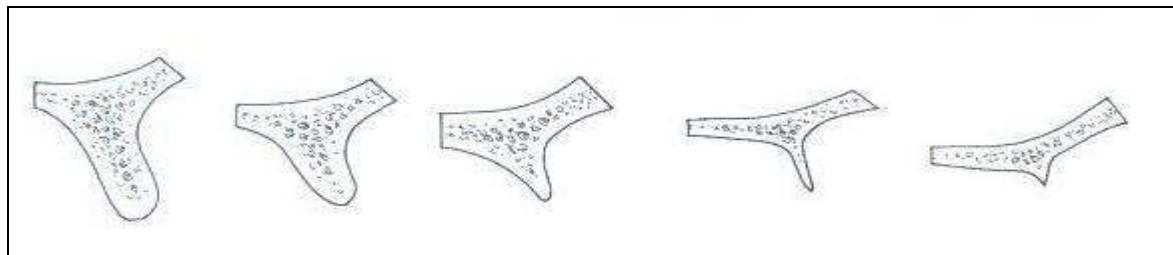


Die obige Einteilung wurde als „Misch System“ bekannt und teilt die Knochenqualität nach deren radiologischer Erscheinung in vier Klassen ein (Typ D1-D4) [90].

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.



Typ A      Typ B      Typ C      Typ D      Typ E

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 verschieden 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 spongiösem 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].