

Dentalimplantate

Prof. Dr.rer.nat. Dipl.-Phys. Christoph Bourauel
Stiftungsprofessur für Oralmedizinische Technologie,
Universität Bonn



♦ Übersicht

Einleitung und Historie
Klassifizierungen und Implantattypen
Werkstoffe
Implantatplanung und Insertion
Spezielle Aspekte der Biomechanik von
Dentalimplantaten
Literatur
Links zu Fachgesellschaften der Dentalen
Implantologie

Einleitung und Historie

♦ Dentale Implantate



Zahnärztliche Implantate haben mittlerweile eine enorme Verbreitung gefunden.

Sie eignen sich sowohl für den Einzelzahnersatz als auch für die Unterstützung und Verankerung von Brückenkonstruktionen oder Totalprothesen.

♦ Dentale Implantate



Zahnärztliche Implantate haben mittlerweile eine enorme Verbreitung gefunden.

Sie eignen sich sowohl für den Einzelzahnersatz als auch als für die Unterstützung und Verankerung von Brückenkonstruktionen oder Totalprothesen.

♦ Dentale Implantate

Versorgungsmöglichkeiten
für den zahnlosen Kiefer

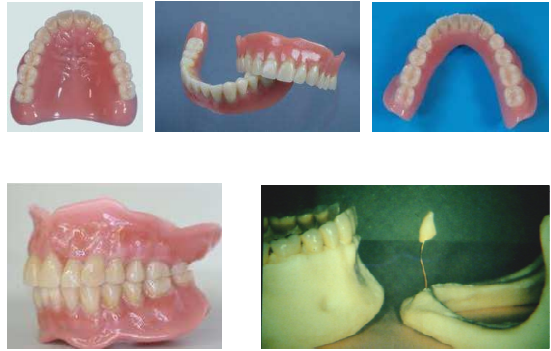


◆ Totalprothetik

Guter Halt?
Ästhetik oft problematisch – „Funktionsprothesen“



◆ Totalprothetik



◆ Anatomie und Altersveränderungen

Unterkiefer

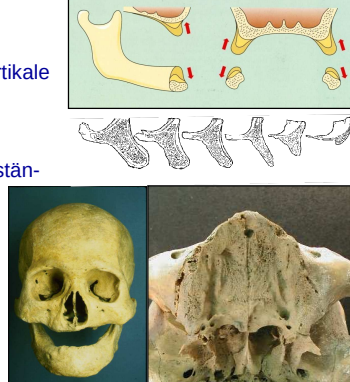
- Zentrifugaler Abbau
- Kamm frontal höher
- Seitlich flach
- „knife-edge-ridge“
- Bei extremer Resorption oberflächliche Lage von canalis mandibulae und foramen mentale



◆ Anatomie und Altersveränderungen

Oberkiefer

- Zentripetaler Abbau
- Begrenzung durch kortikale Strukturen (z.B. spina nasalis ant.)
- Oft dicke Mukosa
- Im Extremfall fast vollständige Resorption, da kein Basalknochen



◆ Anatomie und Altersveränderungen

Lösung der Verankerungsprobleme durch Implantate?

◆ Kurzer historischer Abriss

Historische Anzeichen menschlichen Einfallsreichtums:

- vor ca. 2000 Jahren: Menschen- oder Tierzähne und Knochenfragmente wurden in die Lücken verlorengegangener Zähne gesetzt – kein funktioneller Ersatz!
- vor ca. 1300 Jahren: Ein schwarzer Stein (Obsidian) wurde als Ersatz eines UK-Schneidezahns eingesetzt (Maya).
- vor ca. 1000 Jahren: Der Spanier *Alabucasim* beschreibt die Möglichkeit, fehlende Zähne durch Transplantation zu ersetzen. Misserfolge, Infektionen!
- vor 200 Jahren: *Maggiolo* verwendet nicht-biologische Materialien wie Kautschuk, Silber, Gold, Porzellan und Elfenbein. Die Form wird wie Zahnwurzeln gestaltet und in künstlich geschaffene Alveolen gelegt. Auch hier: Infektionen und Misserfolge!

◆ Kurzer historischer Abriss

Historische Anzeichen menschlichen Einfallsreichtums:

- ab etwa 1930: Entwicklung enossaler (im Knochen verankerter) als auch subperiostaler, also dem Kieferknochen aufliegender, Implantate aus verschiedenen Materialien.
- 1968: Blattimplantat nach *Linkow*.
- Problem der ersten enossalen und subperiostalen Implantate: Keine Osseointegration, sondern fibro-osseale Integration, Verbindung mit dem Kieferknochen über ein kollagenreiches Bindegewebe, das das Implantat umgibt.

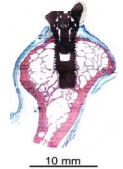
Mittlerweile haben sich osseointegrierende, enossale Implantate durchgesetzt.



◆ Osseointegration

Osseointegration nach *Brånemark*:

- 1965: Setzte er erstmals Titan als Implantatmaterial in Kombination mit einer Schraubenform bei einem Patienten ein und beobachtete die Osseointegration zwischen Titan und dem Peri-Implantatknochen.
- Osseointegration nach *Brånemark* bedeutet die knöcherne Einheilung der Implantatoberfläche in den Alveolarknochen. Es entwickelt sich also eine feste Verbindung zwischen dem Knochen und dem nicht-biologischen Material.
- 1986 wurde seine Methode von der American Dental Association anerkannt!



Osseointegration im Tierversuch
Watzak et al., 2005

Klassifizierungen und Implantattypen

◆ Klassifizierung Dentaler Implantate



Implantate können nach ihrem ‚Einheilmodus‘ unterschieden werden:

- **Zu Anfang:** bis zu sechsmonatige Einheilphase vor Versorgung der Implantate mit einer Suprakonstruktion – gedeckte Einheilung
- **‚Early loaded implants‘:** Versorgung bereits nach wenigen Wochen - Frühbelastung
- **‚Immediately loaded implants‘:** sofortiger Einsatz einer provisorischen prothetischen Versorgung - Sofortbelastung

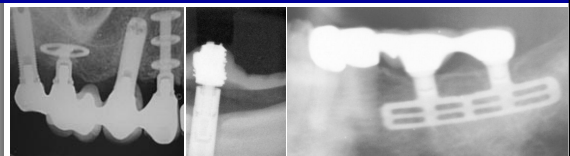


◆ Klassifizierung Dentaler Implantate



Für die verschiedenen Anwendungsfälle wurden die unterschiedlichsten Designs entwickelt. Heutzutage werden praktisch ausschließlich schrauben- oder zylinderförmige Implantate eingesetzt. Teilweise sind die Geometrien der Schrauben an die Dimensionen der zu ersetzenden Zähne angepasst. Eine Klassifizierung kann hiernach erfolgen.

◆ Klassifizierung Dentaler Implantate



?

Zylinder

Blatt

- Schließlich können die Implantate noch nach dem verwendeten Material unterschieden werden.

◆ Prinzipieller Aufbau eines Implantats

Typische zweiteilige Implantate



1 Implantatkörper, auch Fixtur oder einfach Implantat genannt, bildet die künstliche Zahnwurzel, die im Knochen (2) verankert wird. 3 Zahnkrone (Keramik, Gold, Kunststoff), 4 Implantataufbau oder Abutment, 5 Gingiva.

◆ Prinzipieller Aufbau eines Implantats

Einteilige Implantate



Prinzipiell gleicher Aufbau wie zuvor. Das Abutment ist jedoch mit dem Schraubenkörper fest verbunden. Dadurch hat man keinen Spalt zwischen Abutment und Implantat (Infektionen). Das Abutment muss aber unterschiedlich gestaltet sein.

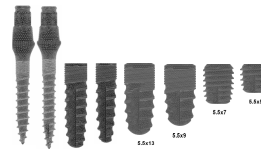
◆ Typische Implantatdesigns



Heutzutage überwiegend schraubenförmig, Längen und Durchmesser sind an den Insertions-situs (Zahngattung) angepasst, extrem unterschiedliche Schraubendesigns und patentgeschütztes Oberflächenfinish.

◆ Typische Implantatgeometrien (tioLogic)

Typ	Durchmesser [mm]	Länge [mm]
S	3,3	11
S	3,3	13
M	3,7	13
M	4,2	13
M-OFG	4,2	13
L	4,8	13
L	5,5	13



◆ Implantate für die Sofortbelastung

Sofortbelastung bedeutet, dass das Implantat/die Implantate unmittelbar nach Insertion mit einer provisorischen Suprakonstruktion versorgt wird. Es muss für eine hinreichende Primärstabilität gesorgt werden.



tioLox / tioLogic
- laserstrukturierte Oberfläche
- ohne/mil Feingewinde



Ankylos
- sandgestrahlte Oberfläche
- spezielles Gewindedesign



Astra
- Fluorid-modifizierte Oberfläche
- Mikrofeingewinde



Straumann
- Sandgestrahlte, angeätzte Oberfläche
- pollierter Hals

Hierfür haben die Implantate häufig eine Feinstrukturierung (Feingewinde) im Halsbereich oder speziell bearbeitete Oberflächen.

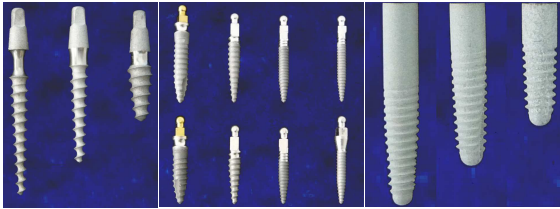
◆ Selbstschneidendes Implantatdesign

Durch selbstschneidende Gewinde soll der Aufwand des operativen Eingriffs reduziert werden. Stichworte: Belastung des Patienten, 'minimalinvasiv', geringere zeitliche Belastung.



Meist werden selbstschneidende Systeme auch für die Sofortbelastung empfohlen, da sie beim Eindrehen den Knochen komprimieren und so eine hohe Primärstabilität sicher stellen.

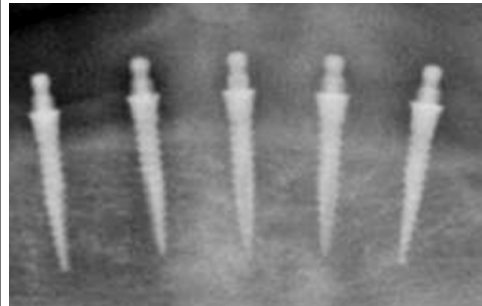
◆ Minis und Shorties



Mini Dental Implants (MDI) sind durchmesserreduzierte Implantate. Sie sind fast durchgängig einteilig, haben also ein integriertes Abutment. Je nach Anwendungszweck ist dieses sehr unterschiedlich gestaltet.

z.B.: Klebepfosten, Kugelanker, Druckknopfanker, etc.

◆ Minis



- Minis werden bevorzugt im UK-Frontbereich in 'bikortikaler' Verankerung eingesetzt, um dem extrem schmalen Kieferkamm Rechnung zu tragen.

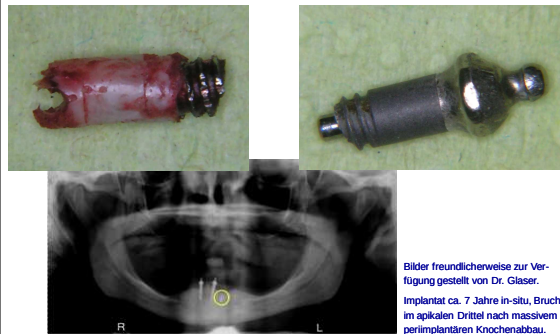
◆ Shorties



- Shorties werden sehr kurze Implantate mit Durchmessern über 5 mm genannt. Sie sind für den Einsatz im posterioren Bereich bei stark atrophiertem Knochen im Ober- und Unterkiefer geeignet.

◆ Bruchgefahr? Knochenüberbelastung?

- Verschiedentlich wurde über Frakturen von Mini-Implantaten berichtet.



Bilder freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Dr. Glaser.
Implantat ca. 7 Jahre in-situ, Bruch im apikalen Drittel nach massivem perimplantären Knochenabbau.

◆ Das All-on-Four-Implantatkonzept



-> Behandlungskonzept für Patienten mit zahnlosem Kiefer

◆ Implantatprothetische Versorgung

Herausnehmbar

- a) rein implantatgetragen b) tegmental mitgetragen

- Einzelstehend (Kugelknöpfe, Doppelkronen)
- Verblockt (Stege)

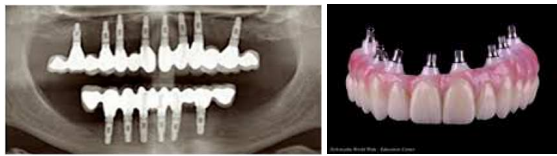


OK: 6 Implantate
UK: 2-4 Implantate

◆ Implantatprothetische Versorgung

Festsitzend

verschraubt oder zementiert
i.d.R. Kunststoff – oder keramikverblendete Metallgerüste



OK: 8 Implantate

UK: 6 Implantate

◆ Individuelles fallspezifisches Risiko

Einschätzung der Knochenträgerkapazität

- Knochenquantität
- Knochenqualität
- Implantatzahl
- Implantatlänge
- Implantatdurchmesser

Evaluation von Risikofaktoren

- Allgemein
- Mikrobiologisch
- Geometrisch
- okklusal

-> individuelles Risiko

-> Risikominderung

◆ Möglichkeiten der Risikominderung

Erhöhung der knöchernen Verankerungsfläche

- Implantatzahl
- Implantatdurchmesser
- Implantatlänge

NICOLE - Actual Client - All On 4 Permanent Teeth In A Day (Dental Implants)

Nicole came in wearing a complete upper denture with natural teeth on the lower. She left the same day with her dental implants and a new smile.

5:00pm Day Of Surgery 3 Months Later

All-on-4 Teeth in a day
Get permanent dental implants.

All on 4
Same day implants so you can smile again in just 1 day. So many benefits. [more info >](#)

*All on 4
Innovative Versorgung
bei zahnlosem Kiefer*

◆ Das All-on-four-Konzept

- Vollständige Versorgung auf vier Implantaten
- zwei im Frontzahnbereich und zwei schräg gesetzt im Seitenzahnbereich
- Sofortbelastung mit einer provisorischen, festsitzenden, zirkulären Brücke



◆ Vorteile im Überblick

- Vollständige Versorgung mit nur vier Implantaten
- Geringere Notwendigkeit einer Augmentation
- Sofortbelastung möglich
- Festsitzende Versorgung möglich
- Nur ein operativer Eingriff

◆ Vorteile schräg gesetzter Implantate

- Verwendung längerer Implantate bei reduziertem Knochenangebot möglich
- Damit verbunden größerer Kontaktbereich zwischen Knochen und Implantat, reduziert die Notwendigkeit einer Augmentation
- Verankerung im qualitativ hochwertigeren anterioren Knochen – somit besserer Halt



- Umgehung von Nervus mandibularis und Sinus maxillaris

◆ 'Knochenqualitäten'

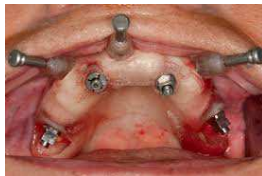
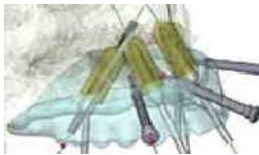
Klassifikation der Knochendichte nach Mish und Judy

- D1 Dichte Kompakta und geringer Spongiosaanteil
- D2 Kompaktalamelle und feinmaschige dichte Spongiosa
- D3 Dünne Kompakta mit grobmaschiger Spongiosa
- D4 Grobmaschige Spongiosa

Topographie der Knochendichten

- D1 Atrophierte interforaminale Region, Unterkieferseitenzahnregion
- D2 Anteriore Oberkieferregion
- D3 Posteriore Oberkieferregion, Unterkieferseitenzahnregion
- D4 Posteriore Oberkieferregion

◆ All-on-four Versorgung im OK



Werkstoffe

◆ Werkstoffe für Implantate

Das Implantat sollte eine mit dem Zahn vergleichbare Steifigkeit aufweisen.

Reintitan: Grade 1 bis 4, unterschiedliche Reinheitsgrade
Titanlegierungen (Ti-Al-Va in unterschiedlicher Zusammensetzung): Grade 5

Keramiken

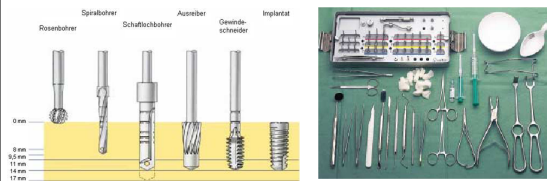
Hochleistungspolymere

Titan und Titanlegierungen weisen eine hervorragende Biokompatibilität auf. Zudem erlauben sie das Einheilen des Knochens in eine mikrostrukturierte Oberfläche (Osseointegration).

Bei Keramiken und Polymeren ist dies noch nicht in vergleichbarer Qualität gelungen.

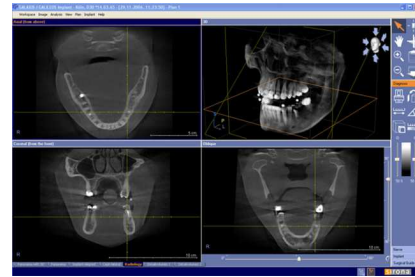
Implantatplanung und Insertion

◆ Implantatinserktion



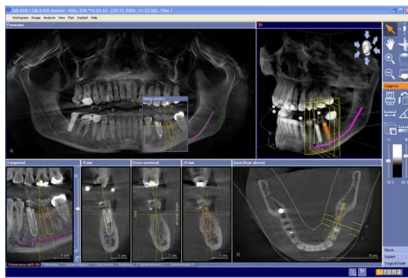
- Nach Präparation der Schleimhaut erfolgt das schrittweise Aufbereiten des Implantatbetts. Meist haben die Instrumente einen einstellbaren Tiefenanschlag, um z.B. Schädigungen des Nervs vorzubeugen. Dies bedarf sorgfältiger Planung! Dies gilt insbesondere bei Sofortbelastung, die möglichst mit einer navigierten Implantation durchgeführt werden sollte.

◆ Planungssysteme



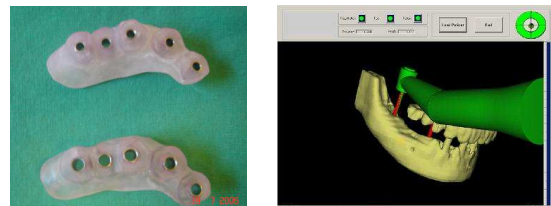
Dreidimensionale bildgebende Verfahren (CT, DVT/CB-CT) haben die Planungsmöglichkeiten in der dentalen Implantologie erweitert und deutlich verbessert.

◆ Planungssysteme



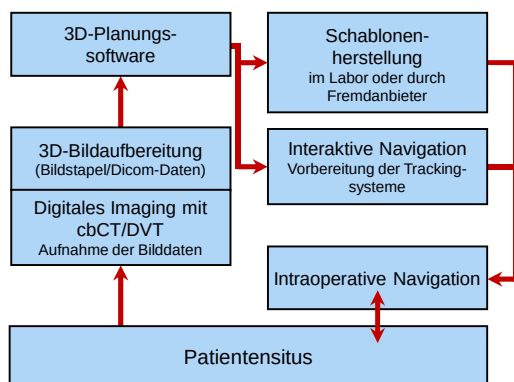
Gegenüber zweidimensionalen Röntgenverfahren ermöglichen sie eine genauere Beurteilung der anatomischen Situation und eine sorgfältige Planung des Implantationsortes.

◆ Navigationshilfen



Die Umsetzung der computergestützten Planung mittels einer intraoperativen Positionierungshilfe (Bohrschablone oder Navigationssystem) ist eine logische Konsequenz und erlaubt die Realisierung der Implantation mit hoher Genauigkeit.

◆ Prinzipieller Ablauf



◆ Navigationsstrategien

- Bohrschablonen, hergestellt mit Rapid Prototyping Methoden, Stereo-Lithographie



◆ Marktübersicht

- coDiagnostiX mit gonyX (IVS-Solutions, Chemnitz)
- GALILEOS^{Implant} (Sirona/siCAT, Bensheim/Bonn)
- IMPLA3D (Schütz Dental, Rosbach)
- implant3D/CeHaimPLANT (med 3D, Heidelberg)
- NobelGuide (Nobel Biocare)
- SimPlant/SurgiGuide (Materialise, Leuven)

(ohne Anspruch auf Vollständigkeit!)

◆ Navigationsstrategien

- Bohrschablonen, hergestellt mit Rapid Prototyping Methoden, Lithographie
- Optische, interaktive Navigations- und Nachführsysteme – Tracking-Systeme



◆ Marktübersicht

- coDiagnostiX mit coNaviX (IVS-Solutions, Chemnitz)
- MONA_DENT (IMT, Dortmund)
- RoboDent (RoboDent, Berlin)

(ohne Anspruch auf Vollständigkeit!)

◆ Navigationsstrategien

- Bohrschablonen, hergestellt mit Rapid Prototyping Methoden
- Optische, interaktive Navigations- und Nachführsysteme
- Vollautomatische Robotersysteme?



ROBODOC



CASPAR

◆ Regelrecht ausgebeint?

... Der Operationsroboter CASPAR, ein deutsches Produkt, stand in Konkurrenz zu ROBODOC. Er war zwar in geringerer Zahl im Einsatz, aber die schweren irreparablen Verletzungen von Muskeln und Nerven standen denen von ROBODOC wenig nach.

Erst im Jahr 2003 haben viele Patienten erfahren warum sie nach der Operation nicht wieder auf die Beine kamen, als sie im Magazin „Der Spiegel“ den Bericht „Regelrecht ausgebeint“, ...

Klage wurde 2006 letztinstanzlich abgewiesen!

◆ Navigationsstrategien

- Bohrschablonen, hergestellt mit Rapid Prototyping Methoden
- Optische, interaktive Navigations- und Nachführsysteme
- Vollautomatische Robotersysteme?

Diese Option wird in der zahnärztlichen Implantologie nicht mehr verfolgt!

Systemkomponenten

1. Schablonengestützte Systeme

◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Prothetische Planung ‚Wax-Up‘ im Labor

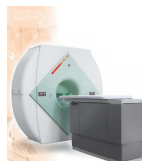


- CT-Schablone mit Bariumsulfatmarkierung und/oder ‚Präzisionsmarker‘ (Labor)



◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- 3D-Scan im Computertomograph/DVT

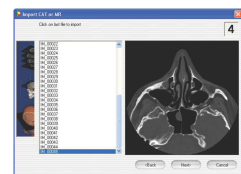


- CT-Schablone mit Markierung zur Positionsrekonstruktion in situ!



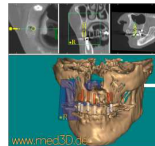
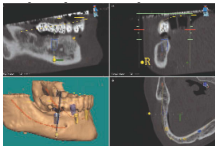
◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- 3D-Bildrekonstruktion



◆ Komponenten und Arbeitsablauf

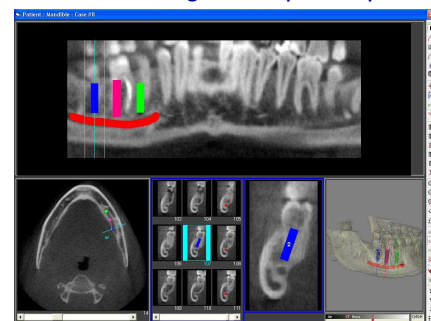
- Übergabe an die Planungssoftware



- Es handelt sich im Wesentlichen um 3D-Bildverarbeitungsprogramme, die durch die enorme Leistungssteigerung der Rechner in den letzten Jahren sehr umfangreiche und schnelle Planungsmöglichkeiten bieten. **Alle Planungspakete ähneln sich sehr!**

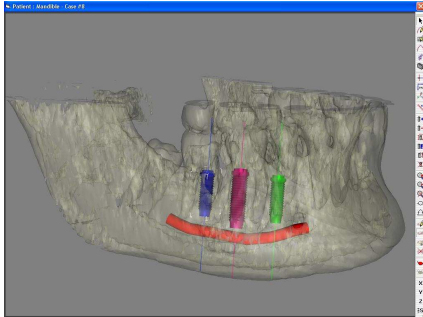
◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Identifikation und Rekonstruktion relevanter Strukturen, Planung der Implantatpositionen



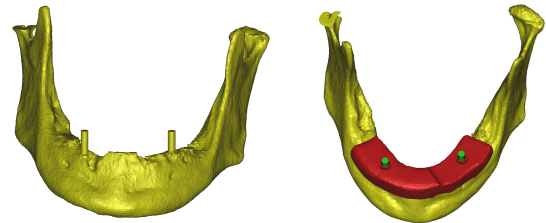
◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Identifikation und Rekonstruktion relevanter Strukturen, Planung der Implantatpositionen



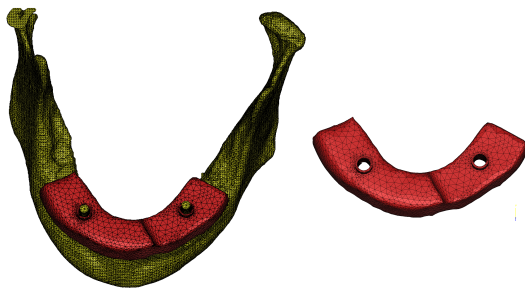
◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Schablonendesign auf Basis der Implantatpositionen



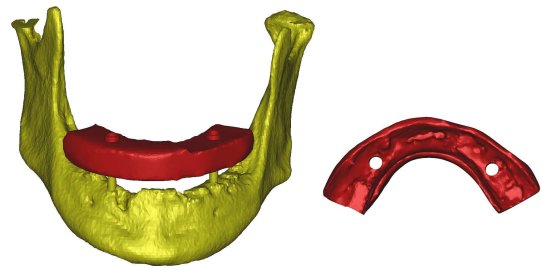
◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Schablonendesign auf Basis der Implantatpositionen



◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Schablonendesign auf Basis der Implantatpositionen



◆ Herstellung der Schablone

- Nobel Guide Guide und Simplant/SurgiGuide verlangen die Herstellung der Schablone durch Nobel Biocare bzw. Materialise im Auftrag.
- Senden der Daten an Nobel Biocare oder Materialise. Die Herstellung und Zusendung der Schablone erfolgt innerhalb weniger Tage.
- Bei coDiagnostix, IMPLA3D, implant3D anderen kann die Schablone im Labor hergestellt werden!

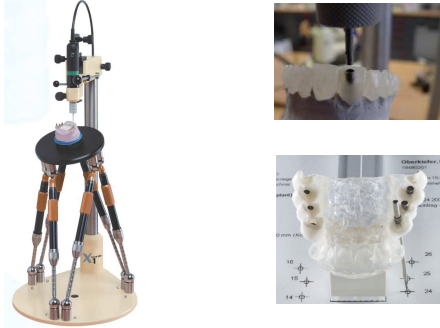
◆ Herstellung der Schablone im Labor

Nach Herstellung der Schablone im Stereolithografie- oder Stanzverfahren müssen die Bohrungen und die Hülzen sowie die Tiefenanschlüge angebracht werden. Hierfür muss eine 'definierte Lage in der realen Welt' identifiziert werden!



◆ Herstellung der Schablone im Labor

- Einbringen der Bohrungen und Positionierung der Hülzen

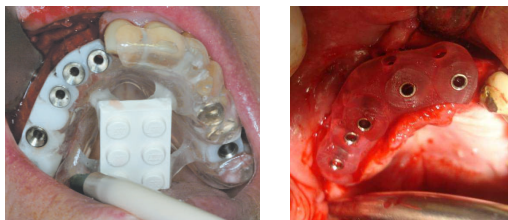


◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Mukosaübertragungsschablonen
- Restzahnübertragungsschablonen
- Knochengetragene Übertragungsschablonen

◆ Komponenten und Arbeitsablauf

Klinische Anwendung der Schablonen.



Mukosaübertragungsschablone

knochengetragene Schablone

Systemkomponenten

2. Navigationssysteme

◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Prothetische Planung ‚Wax-Up‘ im Labor



- CT-Schablone mit Bariumsulfatmarkierung und/oder ‚Präzisionsmarker‘ (Labor)



◆ Komponenten und Arbeitsablauf

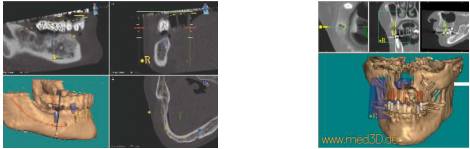
- 3D-Scan im Computertomograph/DVT



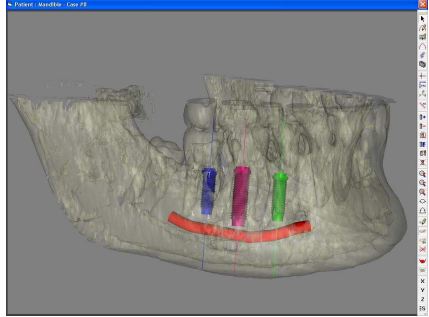
- CT-Schablone mit Markierung zur Positionsrekonstruktion in situ!



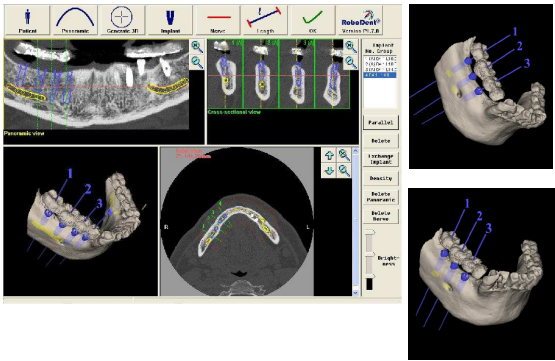
◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- 3D-Bildrekonstruktion
 
- Übergabe an die Planungssoftware (Zahnarzt)
 

◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Identifikation und Rekonstruktion relevanter Strukturen, Planung der Implantatpositionen
 

◆ Planungssoftware RoboDent



◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Übergabe an das Navigationssystem
 

Monadent

coNaviX

◆ Komponenten und Arbeitsablauf

- Übergabe an das Navigationssystem
 

Komponenten Navigationsmodul:

Infrarotsensoren zur Positionsbestimmung

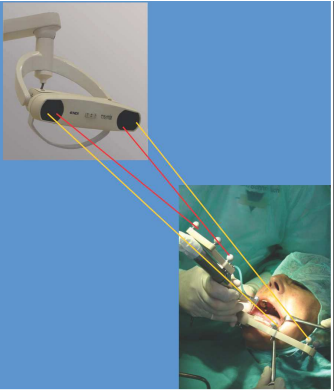
Bildschirm oder Laptop mit Planungs- und Navigationssoftware

Tracking-Display

Stromversorgung, Zentralrechner, Netzwerkanbindung

RoboDent

◆ Realisierung der Navigation



Mit den Infrarotsensoren werden Positionsmarker am Instrument und am Patienten registriert.

Es müssen stets 3 Marker im Sichtfeld liegen.

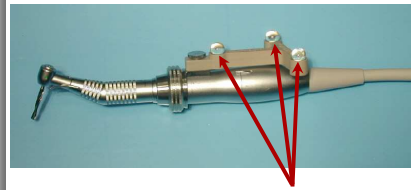
Die Position der Marker wird mit den in der Planung gespeicherten Positionen überlagert und so die Instrumentenführung berechnet

◆ Komponenten und Arbeitsablauf



Einzelteile des Tracking-Systems

◆ Tracking-System am Handstück



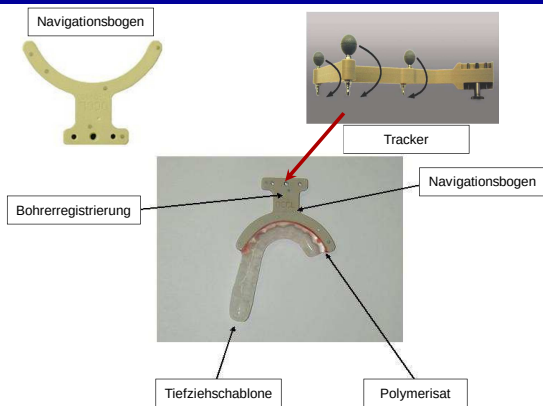
Anordnung UK

Glas- oder Saphirkugeln als Positionsmarker (Tracker)

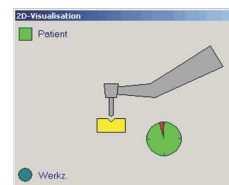


Anordnung OK

◆ Tracking-System am Patienten



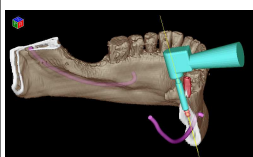
◆ Tracking-System am Patienten



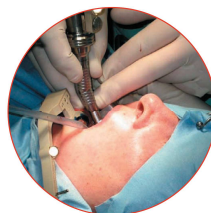
Registrierung der Bohrerlänge zur Definition der Tiefe



◆ Tracking-System am Patienten

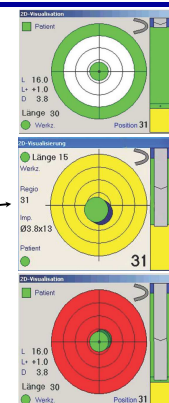


OP-Simulation mit Darstellung des Ners zur Kontrolle der Bohrtiefe.



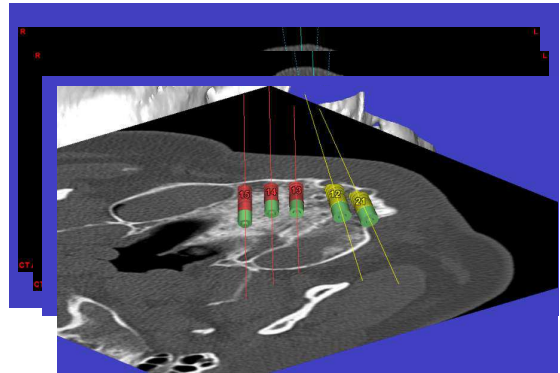
Intraoperative Situation.

◆ Tracking-Display



Ein klinisches Patientenbeispiel

♦ Planung am Beispiel SimPlant



♦ Planung am Beispiel SimPlant

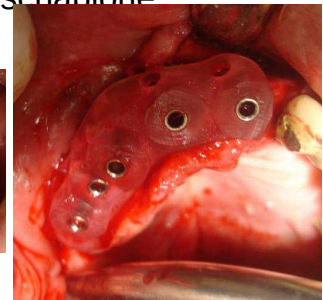


CT-Scanschablone, wird auch bei Erstellung der CT- oder DVT-Bilder getragen.



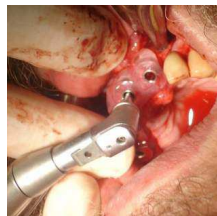
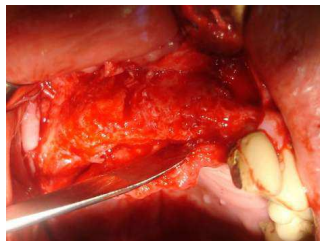
Bohrschablonen mit Metallhülsen und Höhenanschlag.

♦ Planung am Beispiel SimPlant Bohrschablone



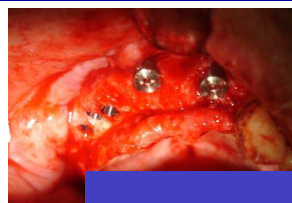
Freilegen des Implantationssitus und Anpassen der Schablone.

♦ Planung am Beispiel SimPlant

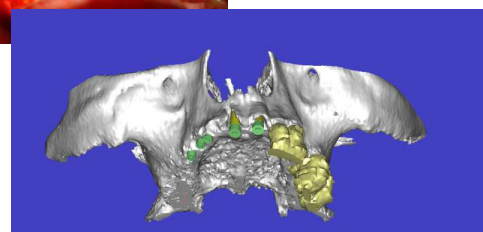


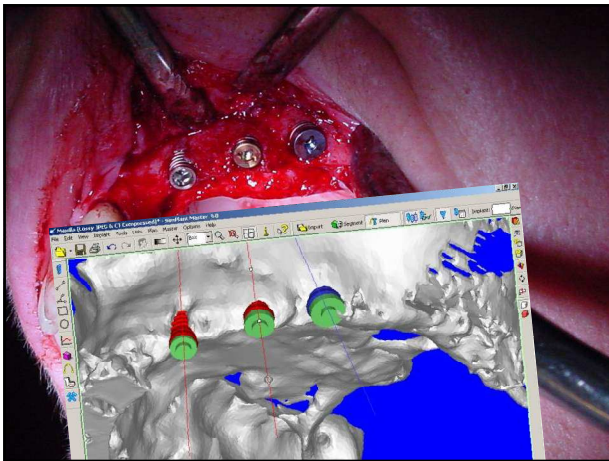
Knochengetragene Bohrerschablone! Durchführung der Pilotbohrungen und endgültige Kavitätenpräparation gemäß Vorschrift des verwendeten Im-plantatsystems.

♦ Planung am Beispiel SimPlant



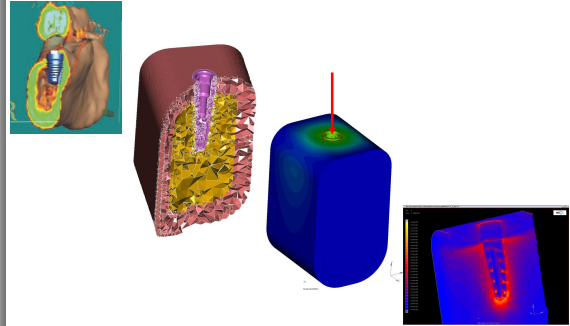
Implantatinserion





◆ Perspektive

- Umsetzung der Planungsdaten in eine biomechanische Analyse der Belastungssituation?



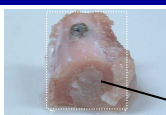
Spezielle Aspekte der Implantatbiomechanik

*als Anwendungsbeispiel für
biomechanische Methoden*

◆ Implantatbiomechanik

- Ziele: In-vitro-Messungen von Implantatauslenkungen im Knochenpräparat nach unterschiedlichen Einheilungsphasen, d.h. **mit und ohne Osseointegration**.
- Simulation von Knochenbelastungen zum Vergleich von Implantatsystemen.
- Simulation von Knochenumbauprozessen.
- **Es wird ein hochauflösender Messaufbau benötigt!**

◆ Messung der Implantatbeweglichkeit

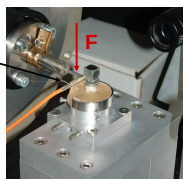


Schweinekiefersegment mit
insertertem Implantat.

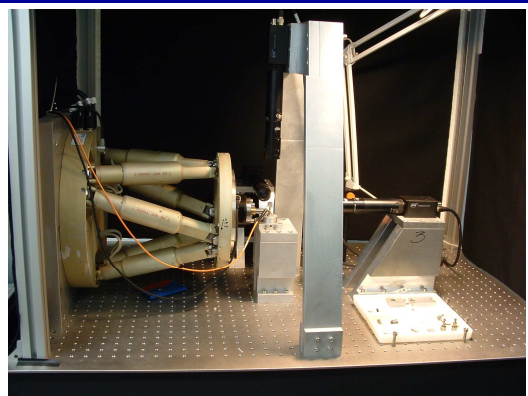
Einbettung der Seg-
mente und Veranke-
rung im Präparat-
halter.



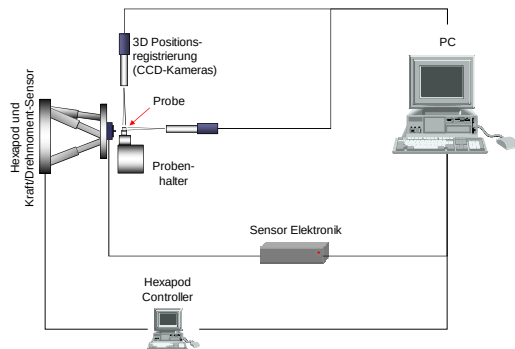
Belastung im
Versuchsaufbau.



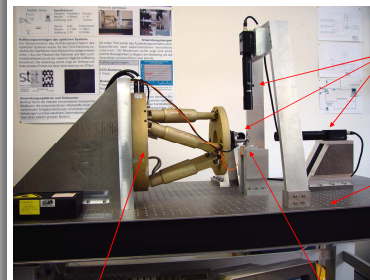
◆ Hexapod Measurement System



◆ Hexapod-Mess-System (HexMeS)



◆ Komponenten des HexMeS



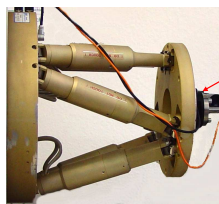
Orthogonal angeordnete CCD-Kameras

Schwingungsgedämpfter Experimentiertisch

Belastungseinheit (Hexapod, Kraft/Drehmoment-Sensor)

Präparathalter (Implantat, Teleskopkronen, Suprastrukturen)

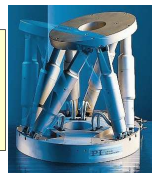
◆ Belastungseinheit



Kraft/Drehmoment-Sensor:
 $\pm 130,0 (0,1) \text{ N}$
 $\pm 10,000 (5) \text{ Nmm}$

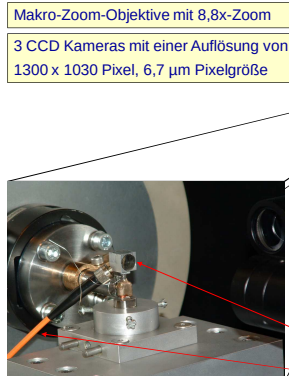
Hexapod :

Volle 3D-Beweglichkeit (3 Translationen, 3 Rotationen)
 $\pm 50 \text{ mm}$, $1 \mu\text{m}$
 $\pm 30^\circ$, 1 arcsec
 Steifigkeit: $33 \mu\text{m}/100 \text{ N}$



◆ Optisches System

Makro-Zoom-Objektive mit 8,8x-Zoom
 3 CCD Kameras mit einer Auflösung von $1300 \times 1030 \text{ Pixel}$, $6,7 \mu\text{m}$ Pixelgröße



Würfel mit 3 Positionsmarkern (Pinholes, $2 \mu\text{m}$ Durchmesser)

Faseroptik mit Laser (35 mW)

◆ Messbereich und Genauigkeit

■ Hexapod	Translation	Rotation
Bereich	$\pm 50 \text{ mm}$	$\pm 30^\circ$
Auflösung	$1 \mu\text{m}$	1 arcsec
■ Opt. System	Translation	Rotation
Bereich	$\pm 0,5 \text{ mm}$	$\pm 5^\circ$
Genauigkeit	$0,72 \mu\text{m}$	$0,02^\circ$
■ Sensor	Kraft	Drehmoment
Bereich	$\pm 130 \text{ N}$	$\pm 10 \text{ Nm}$
Genauigkeit	$0,1 \text{ N}$	$0,005 \text{ Nm}$

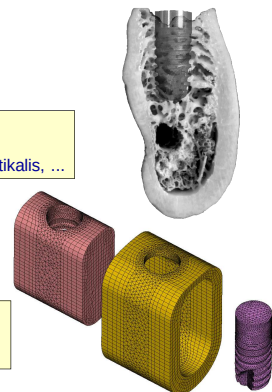
◆ Rechenmodell: Finite-Elemente-Analyse

Originalmaterie:
 Implantat, Spongiosa, Kortikalis

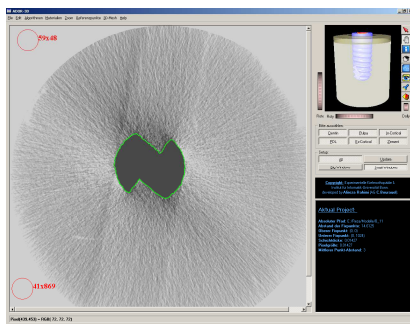
digitalisierte Geometrie:
 Begrenzungsflächen
 Implantat/Spongiosa, Implantat/Kortikalis, ...

FE-Oberflächen-Netz:
 über Knoten verbundene
 Drei- und Viereck-Elemente

FE-Volumen-Netz:
 über Knoten verbundene
 Vier- und Sechseck-Elemente



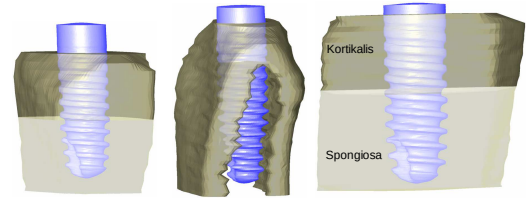
FEM-Studie – Modell-Generierung



Kontur-Extraktion aus μ CT-Scans mit einer eigens entwickelten Software.

FEM-Studie – Modell-Generierung

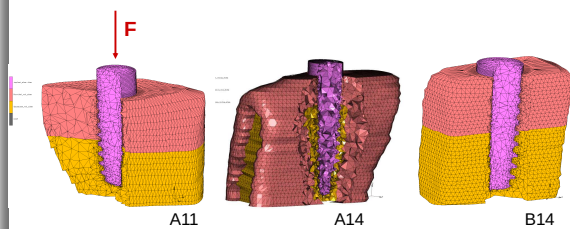
Rekonstruierte 3D-Oberflächen



Implantat:	A11	A14	B14
Durchmesser	3,5 mm	3,5 mm	4,5 mm
Länge	11 mm	14 mm	14 mm

Import in das FE-Paket

(MSC.Marc/Mentat 2005)



ca. 130.000 Tetraeder-Elemente,
60.000 Knoten

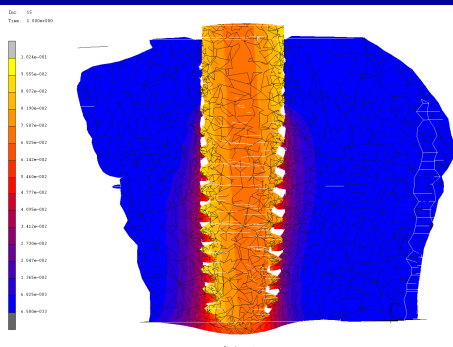
Kontaktanalyse zur Simulation der Knochen/Implantat-Grenzfläche vor der Osseointegration / Abgleich mit der Implantatbeweglichkeit im Experiment.

Materialparameter

Material	E-Modul N/mm ²	Querkontraktions- zahl
Titan (Implantat)	110.000	0,3
Kortikalis	15.000	0,3
Spongiosa	200	0,3

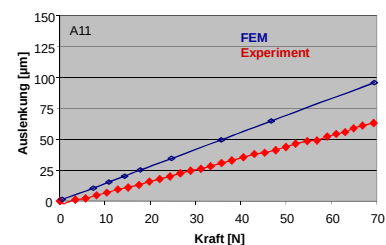
„Standard-Materialparameter“ aus der Literatur.

Ergebnisse: Implantat-Auslenkungen



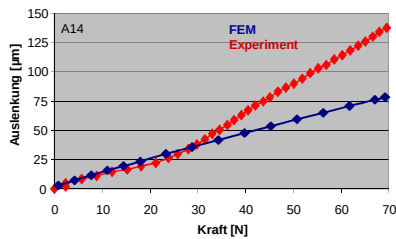
Mit der Kontaktanalyse kann die nicht-osseointegrierte Situation simuliert werden: Das Implantat löst sich vom Knochen.

Ergebnisse: Implantat-Auslenkungen



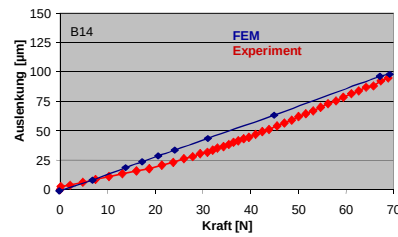
Die berechnete Auslenkung ist etwa 50% größer als im Experiment. Materialparameter des Knochens?
Kontaktparameter?

Ergebnisse: Implantat-Auslenkungen



Gute Übereinstimmung bis etwa 30 N. Löst sich das Implantat erst bei höherer Belastung vom Knochen?

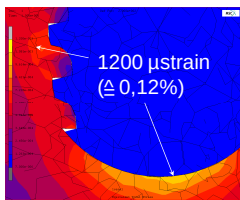
Ergebnisse: Implantat-Auslenkungen



Gute Übereinstimmung über den gesamten Belastungsbereich.

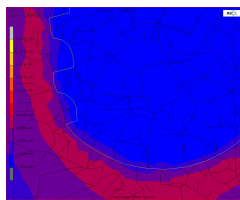
Ergebnisse: Verzerrungen im Knochen

Sofortbelastung
(ohne Osseointegration)



Die Implantatbeweglichkeit und die Spannungen/Verzerrungen in der Spongiosa sind vor Osseointegration höher. Das osseointegrierte Implantat wurde nur um 5µm ausgelenkt. Die Belastung ist gleichmäßiger verteilt. Die höchsten Verzerrungen sind aber im physiologischen Bereich (150 – 3000 µstrain).

Verhalten nach Wochen/
Monaten (mit Osseointegration)



Implantatbiomechanik

Resumee:

- Im Experiment zeigten die Implantate Auslenkungen bis zu 100 µm.
- Dies konnte nur mit der Kontaktanalyse simuliert werden, die den initialen klinischen Zustand darstellt.
- Die initiale klinische Beweglichkeit sollte in gleicher Größenordnung sein.
- Die Knochenbelastungen waren aber im physiologischen Bereich.

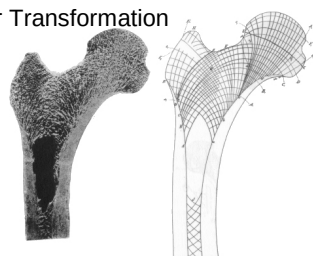
Bone-Remodelling: Knochenumbau

Der Knochen ist eine 'selbstoptimierende' Struktur. Dieser Vorgang läuft im gesamten Skelett ab. Entdeckung durch Julius Wolff (1892):

'Gesetz der Transformation
der Knochen'

oder

'Wolffsches Gesetz'



Bone-Remodelling: Knochenumbau

Bone-Modelling: A process that works in concert with bone growth and functions to alter the spatial distribution of accumulating tissue presented by growth (Jee & Frost, 1992).

- Bei der Knochenmodellierung werden **gezielt Osteoblasten und Osteoklasten aktiviert** (entweder zur Apposition oder Resorption von Knochen).

◆ Bone-Remodelling: Knochenumbau

Bone-Remodelling:

Ein Vorgang, bei dem gezielt Knochenbereiche abgebaut oder ersetzt werden.

Einzelschritte:

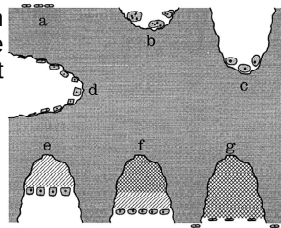
Aktivierung



Resorption



Knochenneubildung



Robert M, 1987

Darauf basierend wurden sogenannte **Bone-Remodelling-Theorien (BRT)** entwickelt.

◆ Orthopädische Biomechanik



► Hier wurden BRT erfolgreich zur Optimierung von Hüft-Endoprothesen eingesetzt.

◆ Ziel

■ Simulation von Knochenumbauprozessen und der trabekulären Struktur um Dentalimplantate als Funktion der Zeit in Abhängigkeit vom mechanischen Stimulus.

■ Probleme: Schraubengänge und Detailstrukturen auf der Implantatoberfläche sind in der Größenordnung einzelner Spongiosa-Trabekel.

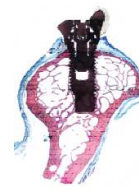
■ Spongiosa kann daher nicht mehr als homogene Struktur angesehen werden sondern es müssen einzelne Trabekel betrachtet werden.

■ Daher ist die Modellierung aufwändig.

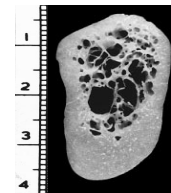
→ Es resultieren große Elementzahlen:

komplexes und zeitaufwändiges Rechenproblem

◆ Ziel



Watzak et al., 2005



Kingsmill et al., 1998

■ Jedes Trabekel muss in mindestens 4 einzelne Elemente zerlegt werden!

◆ Entwicklung der BR-Theorien

Adaptive BRT (Weinans & Huiskes, 1992)

Hierbei wird eine Änderung der Knochendichte als Funktion eines mechanischen Stimulus beschrieben:

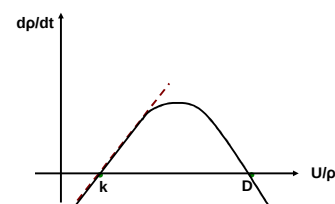
$$\frac{dp}{dt} = B \left(\frac{U}{\rho} - k \right), \quad 0 < \rho \leq \rho_{cb}$$

B: Konstante
U/ρ: mechanischer Stimulus (SED)
k: Referenzstimulus
ρ_{cb}: Maximale Dichte, also Dichte des kortikalen Knochens

◆ Entwicklung der BR-Theorien

Erweiterung der Funktion durch einen Term, der die Überlastresorption berücksichtigt (Li et al. 2006):

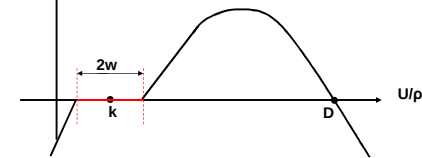
$$\frac{dp}{dt} = B \left(\frac{U}{\rho} - k \right) - D \left(\frac{U}{\rho} - k \right)^2, \quad 0 < \rho \leq \rho_{cb}$$



Entwicklung der BR-Theorien

Erweiterung auf die Mechanostat-Theorie (Frost 2003)

- Physiologische Belastungen: 200-3.000 $\mu\epsilon$.
- Pathologische Belastungen: > 3.000 $\mu\epsilon$.
- Disuse strains: < 200 $\mu\epsilon$. (Astronauten!)



2w: 'Dead Zone', wo Netto kein Bone-Remodelling stattfindet.

Entwicklung der BR-Theorien

Unter Beachtung der 'Dead Zone', erhält man für die Remodelling-Rate:

$$\frac{dp}{dt} = \begin{cases} B\left(\frac{U}{\rho} - k + w\right) - D\left(\frac{U}{\rho} - k + w\right)^2 & \text{falls } \frac{U}{\rho} < (k - w) \\ 0 & \text{falls } k - w \leq \frac{U}{\rho} \leq k + w \\ B\left(\frac{U}{\rho} - k - w\right) - D\left(\frac{U}{\rho} - k - w\right)^2 & \text{falls } \frac{U}{\rho} > (k + w) \end{cases}$$

w: Halbe Breite der 'Dead Zone'.

Entwicklung der BR-Theorien

Hieraus kann eine Vorschrift für die Berechnung der neuen Knochendichte hergeleitet werden:

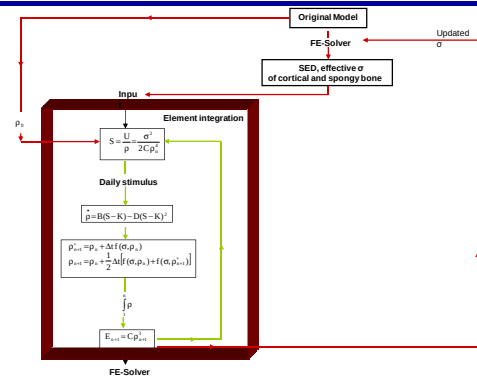
$$\rho_{n+1}^* = \rho_n + \Delta t f(\sigma, \rho_n)$$

$$\rho_{n+1} = \rho_n + \frac{1}{2} \Delta t [f(\sigma, \rho_n) + f(\sigma, \rho_{n+1}^*)]$$

Und daraus wiederum erhält man einen neuen Elastizitätsmodul:

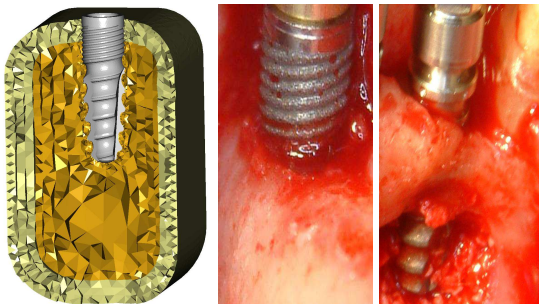
$$E = C \cdot \rho^3$$

Realisierung mit FE-Methoden



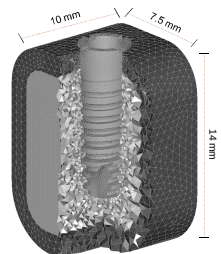
■ Zyklische Wiederholung, bis ein stabiler Zustand erreicht wird.

Randbedingungen

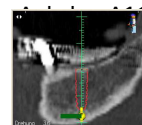


Sensitivity-Analyse: Vorgehen

Idealisiertes Knochen-Implantatmodell mit 1,5 mm dickem kortikalem Knochen, der einen Kern mit homogener Spongiosa umgibt.



Schraubenförmiges Implantat,



11 mm Kortikaler Knochen: $E = 20 \text{ GPa}$
 Spongioser Knochen: $E = 300 \text{ MPa}$
 Implantat: $E = 110 \text{ GPa}$

◆ Sensitivity-Analyse: Vorgehen

1. Elementkantenlänge:

0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8 mm

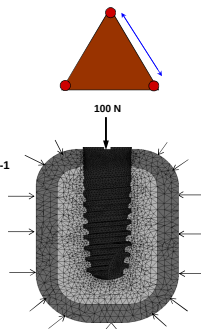
Konstante Remodelling-Parameter:

$$K = 0,0001 \text{ J/g}$$

$$B = 1,0 \text{ (g/cm}^3\text{)}^2 \cdot 1/\text{MPa} \cdot \text{t}^{-1}$$

$$D = 55,0 \text{ (g/cm}^3\text{)}^3 \cdot 1/(\text{MPa})^2 \cdot \text{t}^{-1}$$

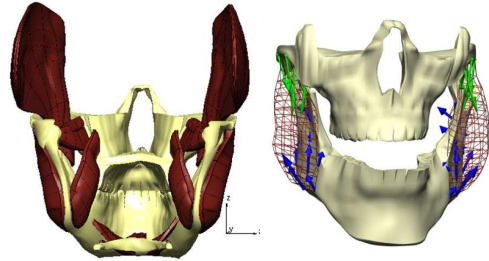
Konstante Randbedingungen bei der Variation der Elementgröße



■ Wichtig für realistische Struktur der simulierten Spongiosa!

◆ Sensitivity-Analyse: Vorgehen

2. Anatomische Randbedingungen:

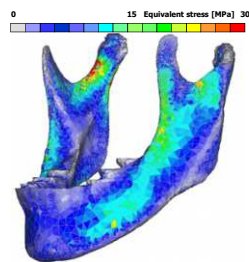


Röhrlé & Pullan, 2007

■ Wichtig für realistische Belastungsverhältnisse!

◆ Sensitivity-Analyse: Vorgehen

2. Anatomische Randbedingungen:

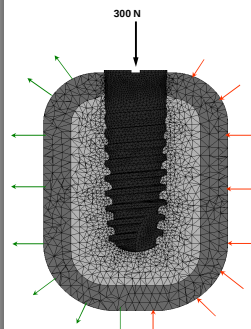


- Musculus masseter : 124,0 N
- M. pterygoideus med.: 106,0 N
- M. pterygoideus lat.: 11,7 N
- M. temporalis ant. : 54,3 N
- M. temporalis post. : 179,0 N

Koseki et al., 2005

◆ Sensitivity-Analyse: Vorgehen

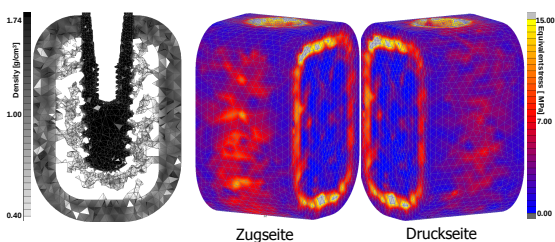
2. Anatomische Randbedingungen:



- Kompressionslast: 3,0 MPa.
- Zuglast: 4,0 MPa.
- Schnittflächen wurden in allen drei Raumrichtungen festgehalten.

◆ Sensitivity-Analyse: Vorgehen

2. Anatomische Randbedingungen:



Zugseite

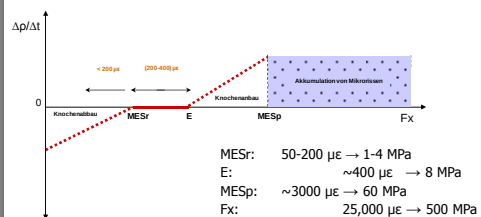
Druckseite

■ Wurden zur Simulation der Situation in der Front eingestellt!

◆ Sensitivity-Analyse: Vorgehen

3. Remodelling-Parameter:

- Basierend auf der Mechanostat Theory (Frost):



■ Einstellung und Wahl der Parameter nach Literaturangaben!

◆ Sensitivity-Analyse: Vorgehen

4. Richtung und Größe der aufgetragenen Kraft:

- Axiale Kräfte von 150, 200, 250, 300 N,
- Transversale Kräfte von 150, 200, 250, 300 N,
- Kombinierte axiale (150 - 300 N) und transversale (20 N) Kräfte.

■ Simulation verschiedener Attachments und Restaurationen!

◆ Sensitivity-Analyse: Vorgehen

5. Funktionaler Zusammenhang Dichte-E-Modul:

- *Carter & Hayes, 1977* :

$$E = 3790 \rho^3$$

- *Beaupré et al. 1990*:

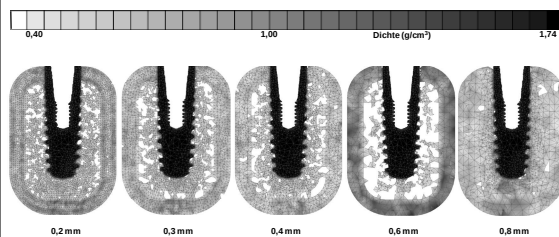
$$E = \begin{cases} 2014 \rho^{2.5} & \text{falls } \rho \leq 1.2 \text{ g/cm}^3, \\ 1763 \rho^{3.2} & \text{falls } \rho > 1.2 \text{ g/cm}^3, \end{cases}$$

- Randbedingungen: Druck 0,3 MPa,
Zug 0,7 MPa.

■ Beachtung unterschiedlicher Knochenqualitäten!

◆ Sensitivity-Analyse: Ergebnisse

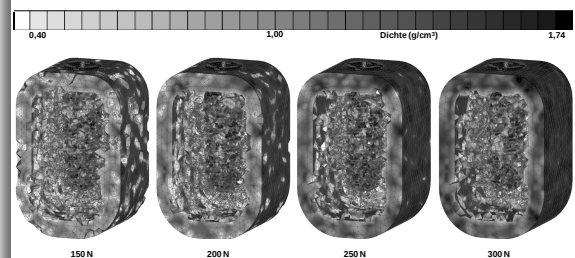
1. Elementkantenlänge:



◆ Sensitivity-Analyse: Ergebnisse

4. Richtung und Größe der aufgetragenen Kraft:

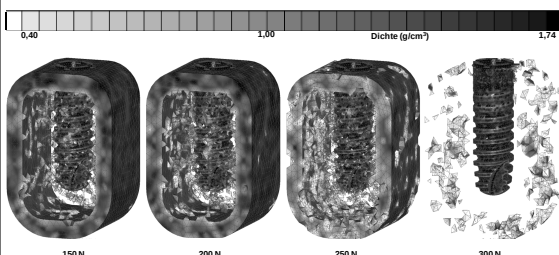
Axiale Kraft:



◆ Sensitivity-Analyse: Ergebnisse

4. Richtung und Größe der aufgetragenen Kraft:

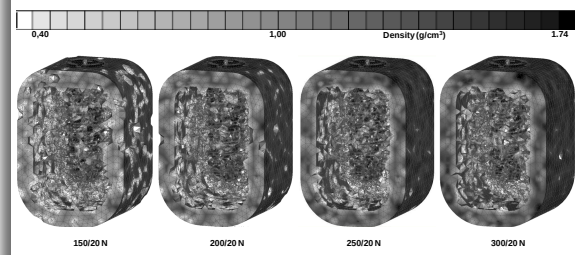
Transversale Kraft:



◆ Sensitivity-Analyse: Ergebnisse

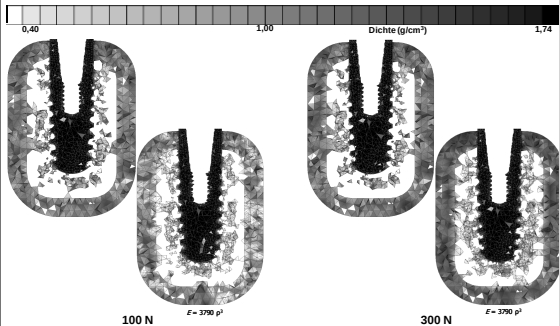
4. Richtung und Größe der aufgetragenen Kraft:

Axial-transversale Kraft:

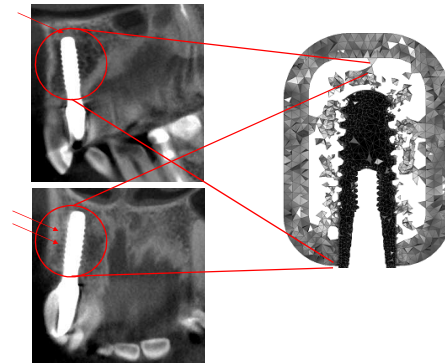


◆ Sensitivity-Analyse: Ergebnisse

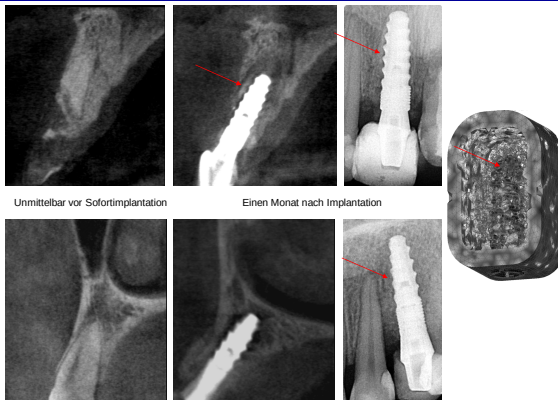
5. Funktionaler Zusammenhang Dichte-E-Modul:



◆ Vergleich mit klinischer Situation

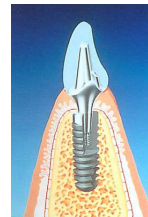


◆ Vergleich mit klinischer Situation



◆ Implantatbiomechanik: Ein Ausblick

Experimentelle und numerische Untersuchungen im Tierversuch ...



... zur Anpassung kieferknochenähnlichen Gewebes an die veränderten biomechanischen Bedingungen nach Einsetzen eines sofortbelasteten Dentalimplantats

◆ Implantatbiomechanik



Experimentelle Tierstudie
↓
Histologische Auswertung
↓
Experimentelle Biomechanik
↓
Theoretische Biomechanik

◆ Untersuchungsplan

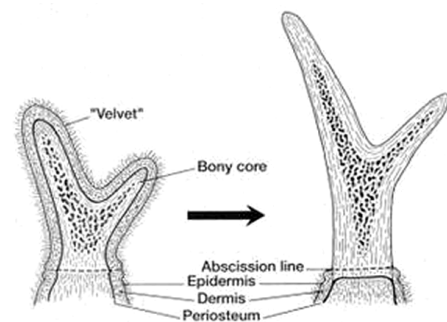
①	Entwicklung einer autonomen Belastungseinheit für das Rentiergeweih	Inserierung sofort-belasteter Implantate in Rentiergeweihe und kontrollierte Belastung	Histologische Studie an osseointegrierten und nicht-osseointegrierten Implantaten
②	Experimentelle Pilotstudie an Implantaten in Schweinekiefersegmenten	Messung von Proben aus Teil 1	Geometrie-Rekonstruktionen basierend auf histologischen Schnitten oder μ CT
③	Finite Elemente Simulationen	Simulation von Proben aus Studienteilen 1 und 2	Entwicklung einer 'Bone Remodeling Theorie' zur Simulation der Einheilung im Gewebe
④	Klinische Studie		

Warum Geweihstudie an Rentieren?

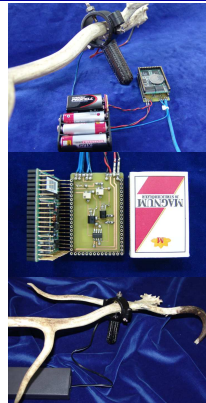
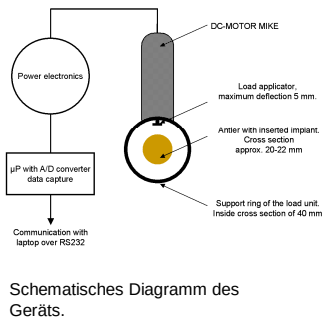


- Die Gewebestruktur ist vergleichbar mit Knochenstruktur.
- Sowohl männliche als auch weibliche Tiere tragen Geweih.
- Der Geweihabwurf ist nicht zeitlich gebunden.
- Rentiere sind sehr zahm.
- Es sollte eine Oberflächenanästhesie genügen.

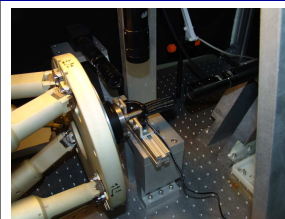
Struktur des Geweihs



Entwicklung einer Belastungseinheit



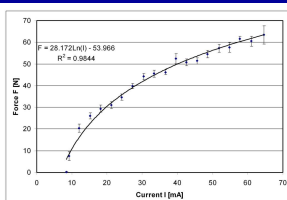
Kalibrierung des Geräts



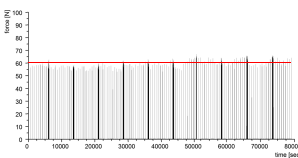
Einbau in das HexMeS.



Kalibrierung des Geräts



Die Kraft kann durch den Motorstrom geregelt werden.



Simulation eines Belastungsprotokolls über einen Tag mit einer vordefinierten Kraft von 60 N.

Experimentelle und numerische Studien

- Tierversuche im Rentiergeweih mit unterschiedlichen Belastungszeiten und Belastungsprotokollen, d.h. **mit und ohne Osseointegration**.
- Histologie des Geweihgewebes um die Implantate.
- Experimentelle Untersuchung der Implantatbeweglichkeit.
- Finite-Elemente-Simulationen und Simulation des 'Bone Remodelling'.
- Dies ist eine 'nichtverbrauchende' Tierstudie!

Literatur

♦ Literatur zur Dentalen Implantologie

Sliwowski, Christoph T. Implantologie Step by Step. 2., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin, 2013

Tetsch, Jan, Tetsch, Peter (Hrsgb). Zahnärztliche Implantate: Ein Ratgeber für Patienten [Broschiert]. Deutscher Zahnärzte Verlage, Köln, 2008

Links zu Fachgesellschaften der Dentalen Implantologie

♦ Links zu implantologischen Gesellschaften

DGZI: Deutsche Gesellschaft für Zahnärztliche Implantologie:
www.dgzi.de

DGI: Deutsche Gesellschaft für Implantologie im Zahn-, Mund- und Kieferbereich e.V.:
www.dginet.de/

BDIZ ED: The European Association of Dental Implantologists:
<http://www.bdizedi.org/>

**Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit!**

