



360

Peter Michael Seebach

**Topologieoptimierte, patientenindividuelle Osteosyntheseplatten
für die Rekonstruktion der Mandibula**

Peter Michael Seebach

**Topologieoptimierte, patientenindividuelle
Osteosyntheseplatten für die Rekonstruktion
der Mandibula**

utzverlag · München 2021

Forschungsberichte iwb
Band 360

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7637-8 Version: 1 vom 26.02.2021
Copyright© utzverlag 2021

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4894-8
Copyright© utzverlag 2020

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Topologieoptimierte, patientenindividuelle Osteosynthese- platten für die Rekonstruktion der Mandibula

Peter Michael Seebach

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. apl. Prof. Dr. med. Rainer Burgkart

Die Dissertation wurde am 18.06.2020 bei der Technischen Universität München ein-
gereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 23.09.2020 angenommen.

Peter Michael Seebach

**Topologieoptimierte, patientenindividuelle
Osteosyntheseplatten für
die Rekonstruktion der Mandibula**



Forschungsberichte IWB
Band 360

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2020

ISBN 978-3-8316-4894-8

Printed in Germany
utzverlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Michael Zäh

Gunther Reinhart

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern des Instituts, für die Möglichkeit der Promotion und die wohlwollende und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Weiterhin möchte ich mich bei meinem Zweitprüfer und langjährigen Forschungspartner, unter anderem in dem Projekt auf dessen Grundlage diese Promotion entstand, Herrn Prof. Dr. med. Rainer Burgkart, für die freundschaftliche und ertragreiche Zusammenarbeit bedanken. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die angeregte Diskussion der Forschungsinhalte.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des *iwb* und der vielzähligen Projekte bedanken, die für einen so angenehmen Arbeitsalltag gesorgt und mit ihrer tatkräftigen Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Für die immer abwechslungsreiche und ausgelassene Atmosphäre im Büro danke ich meiner Bürokollegin Tanja Mayer. Sepp Wimmer, Christian Fritz, Hannah Riedle, Christina Häußinger, Johanna Kerschreiter und Jan Lang spreche ich für ihre gewissenhafte und kritische Durchsicht der Dissertation und ihre konstruktiven Anmerkungen meinen besonderen Dank aus.

Auch bei den Studentinnen und Studenten, die mir als studentische Hilfskräfte und im Rahmen ihrer Studienarbeiten so tatkräftig bei der Erarbeitung der Ergebnisse geholfen haben, möchte ich mich herzlich bedanken. Besonders hervorzuheben sind Johanna Kerschreiter und Felix Theurer, die über mehrere Jahre hinweg durch ihre Zuarbeit wesentliche Beiträge für diese Arbeit geleistet haben.

Zudem möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die so bereitwillig für die ab und zu nötige Ablenkung gesorgt haben. Meiner Familie danke ich für den unentwegten Rückhalt und die fortwährende Unterstützung. Besonderer Dank gilt Monica Seebach, die meiner Arbeit stilistisch und schriftlich den letzten Schliff verliehen hat. Von ganzem Herzen danke ich Lucie Stangl, dass sie insbesondere in der arbeitsintensiven Phase des Schreibens immer für mich da war und mit ihrem positiven Zuspruch mein Durchhaltevermögen immer wieder aufs Neue gestärkt hat.

München, im Oktober 2020

Michael Seebach

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Medizinische Fachbegriffe	IX
Formelzeichen	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Allgemeine Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Inhaltlicher Aufbau der Arbeit	3
2 Behandlung zur Mandibularekonstruktion	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Anatomische Grundlagen	6
2.3 Platten-Osteosynthese und Reaktion des biologischen Systems	10
2.4 Rekonstruktion der Mandibula mittels eines autogenen Transplantats der Fibula	13
2.5 Osteosyntheseplatten für die Mandibularekonstruktion	17
2.6 Indikationshäufigkeiten, Anwenderverteilung und Komplikationsraten der Mandibularekonstruktion	19
2.7 Zusammenfassung	22
3 Technische Grundlagen	23
3.1 Allgemeines	23
3.2 Rechnergestützte Entwicklung mittels simulationsbasierter Optimierungsmethoden	23
3.2.1 Finite-Elemente-Methode	25
3.2.2 Simulationsbasierte Optimierung	26
3.3 Rechnergestützte Fertigungsplanung zum Fräsen von komplexen Bauteilen	27
3.4 Pulverbettbasierte, additive Fertigungsverfahren	30
4 Stand der Forschung und Technik	33
4.1 Allgemeines	33

4.2	Simulationsmodelle und Topologieoptimierung von Osteosyntheseplatten	33
4.3	Patientenindividualisierung von Osteosyntheseplatten	39
4.4	Herstellung von patientenindividuellen Osteosyntheseplatten	45
4.4.1	Herstellung mittels Fräsen	46
4.4.2	Herstellung mittels additiver Fertigungsverfahren	48
4.5	Erkenntnisse zum Einsatz patientenindividueller Osteosyntheseplatten in der Mandibularekonstruktion	51
4.6	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	52
5	Osteosyntheseverfahren unter Nutzung topologieoptimierter, patientenindividueller Osteosyntheseplatten	55
5.1	Allgemeines	55
5.2	Anforderungsspezifikation und Lösungskonzept	55
5.3	Erweiterung der Behandlung für die Mandibularekonstruktion	57
5.4	Vorgehensweise zur Umsetzung des Osteosyntheseverfahrens	58
6	Entwicklung topologieoptimierter, patientenindividueller Osteosyntheseplatten	61
6.1	Allgemeines	61
6.2	Medizinische Ausgangsdaten und Anforderungen	62
6.3	Simulationsmodell des rekonstruierten Kiefers	66
6.4	Topologieoptimierung der Osteosyntheseplatten	70
6.4.1	Optimierungsziele und Bedingungen	71
6.4.2	Optimierungsergebnis für die Versorgung eines LC-Defekts	72
6.5	Konstruktion der Plattengeometrien	74
6.6	Simulative Evaluation und Vergleich mit konventionellen Plattentypen	77
6.6.1	Allgemeines	77
6.6.2	Erstellung der Simulationsmodelle	78
6.6.3	Kriterien für die Evaluation und Vergleichsanalyse zwischen den Plattentypen	81
6.6.4	Auswertung der Funktionswiederherstellung und des Einflusses auf den Heilungsprozess	82
6.6.5	Auswertung der Festigkeit des Osteosyntheseverbunds	85

6.7	Verfahren zur automatisierten Individualisierung der Osteosyntheseplatten	90
6.7.1	Allgemeines	90
6.7.2	Vorbereitung und Positionierung der Osteosyntheseplatten	91
6.7.3	Anpassung der Osteosyntheseplatten an die Patientenanatomie	92
6.8	Zusammenfassung	95
7	Herstellung topologieoptimierter, patientenindividueller Osteosyntheseplatten	97
7.1	Allgemeines	97
7.2	Automatisierte Fertigungsplanung für das Fräsen individueller Osteosyntheseplatten	98
7.2.1	Allgemeines	98
7.2.2	Struktur des Fräsprogramms zur Fertigung topologieoptimierter Osteosyntheseplatten	98
7.2.3	Automatisierte Adaption des Fräsprogramms an die Individualisierung der Osteosyntheseplatten	100
7.3	Evaluation der Bauteilqualitäten der Fertigungsverfahren	104
7.3.1	Allgemeines	104
7.3.2	Formtreue	107
7.3.3	Oberflächenrauheit	111
7.4	Wirtschaftliche Bewertung der Fertigungsverfahren	117
7.4.1	Allgemeines	117
7.4.2	Marktpotenzialanalyse und Produktionsszenarien	118
7.4.3	Zeit- und Kostenmodelle	122
7.4.4	Wirtschaftlichkeitsanalyse und Verfahrensvergleich	124
7.5	Zusammenfassung	130
8	Biomechanische Prüfung und Studie an Humanpräparaten	133
8.1	Allgemeines	133
8.2	Vorbereitende Schritte	133
8.3	Rekonstruktion der Mandibulae	138
8.4	Versuchsaufbau und -durchführung	141
8.5	V Versuchsergebnisse	146

8.6	Zusammenfassung	151
9	Zusammenfassung und Ausblick	153
9.1	Zusammenfassung	153
9.2	Ausblick	155
10	Literaturverzeichnis	157
11	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	183
12	Anhang	185
A1	Daten zur Evaluation und Vergleichsanalyse zwischen den optimierten Platten und aktuellen Plattentypen (zu Abschnitt 6.6)	185
A2	Daten zur Herstellung der topologieoptimierten, patientenindividuellen Osteosyntheseplatten (zu Abschnitt 7.3.1)	187
A3	Daten zur Evaluation der Bauteilqualitäten der Fertigungsverfahren (zu Abschnitt 7.3.3)	188
A4	Daten zur wirtschaftlichen Bewertung der Fertigungsverfahren (zu Abschnitt 7.4)	189
A5	Daten zur biomechanischer Prüfung und Studie an Humanpräparaten (zu Kapitel 8)	197

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2-D	zweidimensional
3-D	dreidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ASCII	Amerikanischer Standard-Code für den Informationsaustausch (engl. <i>American Standard Code for Information Interchange</i>)
BAZ	5-Achs-Bearbeitungszentrum
CAD	Rechnerunterstützte Konstruktion (engl. <i>Computer-Aided Design</i>)
CAE	Rechnergestützte Entwicklung (engl. <i>Computer-Aided Engineering</i>)
CAM	Rechnergestützte Fertigungsplanung bzw. Fertigung (engl. <i>Computer-Aided Manufacturing</i>)
C-Defekt	Defekt der Mandibula mit zentraler Lage
CM-Ebene	Resektionsebene zwischen Mandibula und zentralem Fibulasegment
CoCr	Cobalt-Chrom
CPF	benutzerdefiniertes Prozess-Feature (engl. <i>Customized Process Feature</i>)
CT	Computertomografie
D	Durchläufer
D-A-CH	Länder mit vorherrschend deutscher Sprache (Deutschland, Österreich und Schweiz)
DFM	Dentalfräsmaschine
DICOM	Digitale Bildgebung und -kommunikation in der Medizin (engl. <i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i>)
DRG	diagnosebezogene Fallgruppen (engl. <i>Diagnosis Related Groups</i>)
EBM	Elektronen-Strahlschmelzen (engl. <i>Electron Beam Melting</i>)
ELI	Extra Low Interstitial elements (dt. extra niedrige Anzahl interstitieller Elemente)
FE	Finites Element
FE-Analyse	Finite-Elemente-Analyse

Abkürzung	Bedeutung
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFF	Herstellung mit verschmolzenem Filament (engl. <i>Fused Filament Fabrication</i>)
I	Ingenieur(in)
ID	Indikator
inf.	unten (lat. <i>inferior</i>)
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München
K	Knochen (Versagensart)
LBM	Laser-Strahlschmelzen (engl. <i>Laser Beam Melting</i>)
LC-Defekt	kombinierter, einseitiger Defekt der Mandibula mit zentraler und lateraler Lage
LC-Ebene	Resektionsebene zwischen zentralem und lateralem Fibulasegment
LCL-Defekt	Defekt der Mandibula mit vollständigem Fehlen des Corpus mandibulae
L-Defekt	Defekt der Mandibula mit lateraler Lage
Lig.	Band (lat. <i>Ligamentum</i>)
M.	Muskel (lat. <i>Musculus</i>)
Ma.	Maschine(n)
MDR	Medizinprodukteverordnung (engl. <i>Medical Device Regulation</i>)
MKG	Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
ML-Ebene	Resektionsebene zwischen Mandibula und lateralem Fibulasegment
MRT	Magnetresonanztomografie
N.	Nerv (lat. <i>Nervus</i>)
NC	Numerische Steuerung (engl. <i>Numerical Control</i>)
OBJ	<i>Wavefront Object Format</i> (dt. Dateiformat zur Beschreibung von dreidimensionalen, geometrischen Formen mittels ASCII-Code)
OP	Operation
P	Platte (Versagensart)
PA	Polyamid

Abkürzung	Bedeutung
PBF	Pulverbettbasiertes Schmelzen (engl. <i>Powder Bed Fusion</i>)
PU	Polyurethan
RBE	Starrkörper-Element (engl. <i>Rigid Body Element</i>)
Rekon NP	manuell gebogene Rekonstruktionsplatte (nicht patientenindividuell)
Rekon P	patientenindividuelle Rekonstruktionsplatte
REM	Rasterelektronenmikroskop
SPC	Knoten-Randbedingung (engl. <i>Single Point Constraint</i>)
STEP	Standard zur Beschreibung von Produktdaten (engl. <i>Standard for the Exchange of Product Model Data</i>)
STL	Format zur Beschreibung der dreidimensionalen Oberfläche von Geometrien mithilfe von Dreiecksfacetten (engl. <i>Standard Triangulation/Tesselation Language</i>)
sup.	oben (lat. <i>superior</i>)
Ti 6Al 4V	Titan 6-Aluminium 4-Vanadium
TiO ₂	Titandioxid; Titan(IV)-Oxid
TP-Platte	topologieoptimierte, patientenindividuelle Osteosyntheseplatte
TUM	Technischen Universität München
VBA	Visual Basic for Applications
VHM	Vollhartmetall
W	Werker(in)

Medizinische Fachbegriffe

Stichwort	Erklärung
<i>Adduktion</i>	Heben
<i>Angulus mandibulae</i>	Kieferwinkel
<i>apikal</i>	Seite einer Struktur, die zu einem <i>Lumen</i> (Hohlraum) hin liegt
<i>Arcus zygomaticus</i>	Jochbogen
<i>Atrophie</i>	Gewebeschwund
<i>autogen</i>	körpereigen
<i>basal</i>	zur Basis hin orientiert
<i>Basis</i>	basaler Teil des <i>Corpus mandibulae</i>
<i>bikortikal</i>	in beiden Kortikalisschichten eines Röhrenknochens verankert
<i>Bone remodeling</i>	Umbau des Knochens aufgrund der wirkenden Belastungen
<i>Bruxismus</i>	unbewusstes Zubeißen und Zähneknirschen
<i>bukkal</i>	zur Wange hin weisend
<i>Caninus</i>	Eckzahn
<i>Caput fibulae</i>	Fibulakopf
<i>Caput mandibulae</i>	Gelenkkopf
<i>Cavitas medullaris</i>	Markhöhle
<i>Corpus fibulae</i>	Fibulaschaft
<i>Corpus mandibulae</i>	vorderer Teil der Mandibula
<i>Crista iliaca</i>	Beckenkamm
<i>distal</i>	vom Rumpf weg
<i>dorsal</i>	zur Rückfläche hin
<i>Explantation</i>	Entnahme aus dem Körper
<i>Exposition</i>	Freilegung
<i>Femur</i>	Oberschenkel
<i>Fibula</i>	Wadenbein

Stichwort	Erklärung
<i>Fixateur externe</i>	externes Fixationssystem zur Osteosynthese
<i>Foramen mentale</i>	Durchtritt des N. mentalis
<i>Fraktur</i>	Knochenbruch
<i>in vivo</i>	am lebenden Organismus
<i>inferior, -ius; kaudal</i>	unterhalb, zum Steißende hin
<i>innervieren</i>	ein Organ/einen Körperteil mit Nerven ausstatten oder mit Nervenreizen versorgen
<i>interfragmentär</i>	zwischen den Knochensegmenten
<i>Kallus</i>	Narbgewebe des Knochens
<i>Knochenzyste</i>	Hohlraum im Knochen
<i>konservativ</i>	nicht-operativ
<i>kraniofazial</i>	den Schädel-Gesichts-Bereich betreffend
<i>lateral</i>	seitlich, von der Medianebene weg
<i>Lig. calcaneofibulare</i>	Außenband des Sprunggelenks; Bestandteil des Syndesmosis tibiofibularis
<i>Lig. tibiofibulare anterius</i>	vorderes Schienbein-Wadenbein-Band; Bestandteil des Syndesmosis tibiofibularis
<i>Lig. tibiofibulare posterius</i>	hinteres Schienbein-Wadenbein-Band; Bestandteil des Syndesmosis tibiofibularis
<i>Lumen</i>	Hohlraum (das Innere eines Organs)
<i>M. masseter</i>	Bestandteil der Kaumuskulatur zum Schließen des Kiefers
<i>M. pterygoideus lateralis</i>	Bestandteil der Kaumuskulatur zum Öffnen des Kiefers
<i>M. pterygoideus medialis</i>	Bestandteil der Kaumuskulatur zum Schließen des Kiefers
<i>M. temporalis</i>	Bestandteil der Kaumuskulatur zum Schließen des Kiefers
<i>Malignität</i>	Bösartigkeit (von Tumoren)
<i>Malleolus lateralis</i>	Knöchelbereich der Fibula
<i>Mandibula</i>	Unterkiefer
<i>Mastikation</i>	Zubeißen des Kauaktes

Stichwort	Erklärung
<i>Maxilla</i>	Oberkiefer, Bestandteil des Schädelknochens
<i>medial</i>	auf die Medianebene zu (Medianebene: vertikale Symmetrieebene des Körpers)
<i>Molar</i>	hinterer, großer Backenzahn
<i>monokortikal</i>	in einer Kortikalisschicht eines Röhrenknochens verankert
<i>Musculus</i>	Muskel
<i>Nervus</i>	Nerv
<i>N. mentalis</i>	Nerv, der die Haut im Bereich des Kinns und die Unterlippe <i>innerviert</i> (ausstattet und versorgt)
<i>Nekrose</i>	Zelltod
<i>Okklusion</i>	Schließfunktion
<i>Orthese</i>	äußerlich am Körper angebrachtes Hilfsmittel zur Stabilisation
<i>Osteoporose</i>	Abnehmen der Knochenmasse im Alter
<i>Osteosynthese</i>	operative Verbindung von zwei oder mehr Knochen oder Knochenfragmenten
<i>Osteotomie</i>	Durchtrennung von Knochen
<i>Pars alveolaris</i>	Alveolarfortsatz
<i>Pars profunda</i>	untenliegender Teil des M. masseter
<i>Pars superficialis</i>	oberflächlicher Teil des M. masseter
<i>Perfusion</i>	Durchblutung
<i>Periost</i>	Knochenhaut
<i>peripher</i>	auf die Oberfläche des Körpers oder eines Organs zu
<i>Processus condylaris</i>	Gelenkfortsatz am aufsteigenden Ast der Mandibula
<i>Processus coronoideus</i>	Knochenvorsprung am aufsteigenden Ast der Mandibula
<i>Protrusion</i>	Vorwärts gerichtete Schiebebewegung
<i>proximal</i>	zum Rumpf hin

Stichwort	Erklärung
<i>Pseudoarthrose</i>	bewegliche Verbindungen der Knochenfragmente bei einer Osteosynthese
<i>Radius</i>	Speiche (Unterarmknochen)
<i>Ramus mandibulae</i>	Kieferast
<i>Resektion</i>	operatives Entfernen
<i>Retrusion</i>	rückwärts gerichtete Schiebebewegung
<i>Revision</i>	erneuter Eingriff nach bereits erfolgter Therapie
<i>Scapula</i>	Schulterblatt
<i>Stress shielding</i>	Knochenabbau aufgrund geringer Lasten
<i>Substantia compacta</i>	Kortikalis; äußerer, unterhalb des Periosts gelegener, kompakter Teil des Knochens
<i>Substantia spongiosa</i>	Spongiosa; im Innenraum des Knochens schwammartig aufgebautes System aus feinen Knochenbälkchen
<i>superior, -ius; kranial</i>	oberhalb, auf das Kopfende zu
<i>Symphyse</i>	Bereich des medialen Corpus mandibulae
<i>Syndesmosis tibiofibularis</i>	am Malleolus lateralis angreifendes Band des Sprunggelenks
<i>Tibia</i>	Schienbein
<i>Tissue Engineering</i>	künstliche Herstellung biologischer Gewebe
<i>Knochen trabekel</i>	kleine Bälkchen aus Knochengewebe, aus denen die Spongiosa aufgebaut ist
<i>vaskularisiert</i>	mit Blutgefäßen versorgt
<i>ventral</i>	zur Vorderfläche hin
<i>vertikal</i>	parallel zur Körper- oder Extremitätenlängsachse
<i>zentral</i>	auf das Körperinnere oder das Innere eines Organs zu