

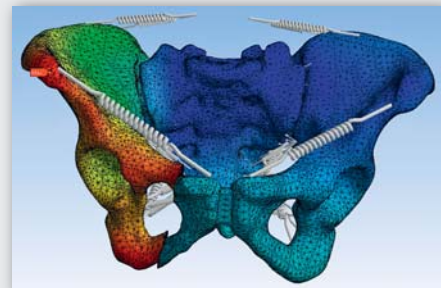
L. Wolter, A. Volf, L. Bonitz, M. Eblenkamp, E. Wintermantel

**Simulation der forcierten Gaumennahterweiterung
mittels FEM**

Leseprobe

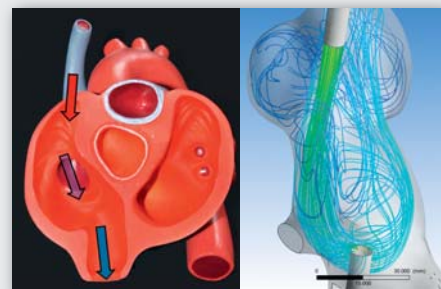
*P. Pieroh, A. Nolte, S. Kurz, D. Schreiber,
C. Josten, J. Böhme*

**Finite-Elemente-Berechnungen
in der Beckenchirurgie**



*M. Bongert, M. Geller, J. Strauch, D. Buchwald,
V. Nicolas, U. Aschenbrenner*

**Strömungssituation
bei einer ECMO (extrakorporale
Membranoxigenation)**



Editorial

5 Jahre **CAME**: Simulation in der Medizin und Biomechanik

Erstmals präsentiert wurde die **came**-Zeitschrift im Frühjahr 2010 auf der Veranstaltung „Vom Automobil zum Patienten. Technologie und Medizin finden zusammen“, die im Rahmen der Reihe „Deutschland – Land der Ideen“ durchgeführt wurde. **came** steht für

Computer Aided Medical Engineering und beschäftigt sich mit dem Transfer der Simulationstechnologie raus aus den klassischen ingenieurtechnischen Fragestellungen hin zu den medizinischen Anwendungen.

Die **came**-Zeitschrift ist Teil unserer **came**-Initiative. Diese bietet eine Plattform, um Vertrauen, Akzeptanz

und marktfähige Anwendungen für die numerischen Simulationstechnologien in dem neuen, vielversprechenden Anwendungsgebiet der Medizin zu schaffen.

Das Ansinnen der **came**-Zeitschrift ist es, das Potential der CAE-Simulation für medizinische Fragestellungen aufzuzeigen. Wir akquirieren daher Beiträge aus dem Forschungsumfeld, die nach unserer Meinung interessante Ansätze für spätere Anwendungen haben, z. B. für eine Operationsplanung. Ebenso zeigen wir für die Medizintechnik-Industrie neue Ansätze auf, wie die numerische Simulation helfen kann, Produkte zu verbessern, die mit dem menschlichen Körper interagieren. Dass nicht nur wir die Vorteile der Simulation in der Medizin sehen, sondern der Simulation auch von anderer Seite ein großes Potential zugesprochen wird, unter anderem für die FDA-Zulassung medizinischer Produkte, beschreibt z. B. der Kurzbeitrag auf Seite 8 und 9.

Auch unsere **came**-Konferenz ist ein Teil der **came**-Initiative. Die **came**-Konferenz findet im Rahmen der ANSYS Conference und des 33. CADFEM Users' Meeting (www.usersmeeting.com) am 25. Juni 2015 in Bremen statt. Dort haben Sie die Möglichkeit, sich über CAE-Simulationen zu informieren und direkt mit den Vortragenden zu diskutieren und Erfahrungen auszutauschen.

Wir hoffen, dass Sie diese Ausgabe der **came**-Zeitschrift mit Freude lesen, viele interessante Informationen finden und dass wir Sie vielleicht in Bremen begrüßen dürfen.



Christoph Müller



Gerhard Friederici



Laszlo Kovacs



Lars Bonitz

Dr.-Ing. Christoph Müller Dipl.-Ing. Gerhard Friederici, M.A. PD Dr. med. Laszlo Kovacs Dr. med. Dr. med. dent. Lars Bonitz

came

Computer Aided **Medical** Engineering

News		4
<hr/>		
Kurzbeiträge:		6
<i>S. Wartzack, D. Krüger</i>		6
Biomechanische Menschmodelle in der Produktentwicklung		
<i>B. Murray, D. Bardot</i>		8
Simulation for Regulation		
<hr/>		
<i>P. Pieroh, A. Nolte, S. Kurz, D. Schreiber, C. Josten, J. Böhme</i>		10
Modellierung, Randbedingungen und resultierende Veränderungen der Bandbeanspruchung und Stresszonen an Implantaten bei der Simulation von Beckenringfrakturen		
<hr/>		
<i>M. Bongert, M. Geller, J. Strauch, D. Buchwald, V. Nicolas, U. Aschenbrenner</i>		15
Untersuchung der Rezirkulation der Blutströmung im rechten Vorhof beim Einsatz einer VV-ECMO		
<hr/>		
<i>L. Wolter, A. Volf, L. Bonitz, M. Eblenkamp, E. Wintermantel</i>		22
Simulation der forcierten Gaumennahterweiterung mittels FEM Optimierung der Osteotomieführung für eine symmetrische Distraction		
<hr/>		
<i>P. Lopes, M. Fremmer, C. Bichlmeier, P. Verschueren</i>		27
Patient-Specific Cardiovascular Models for Educational and Training Purposes		
<hr/>		
Serie		
Mechanische Eigenschaften eines Finite-Elemente-Modells des humanen Unterarmes		32
Veranstaltungen		38
Impressum/Veröffentlichungen		40
<hr/>		
Titel		
<i>Entwurf und Gestaltung: Ludwig-Kirn Layout, Ludwigsburg</i>		
<i>Bild: B.Sc. (TUM) Lennart Wolter, CADFEM GmbH</i>		

Release Update Mimics® Innovation Suite

Discover What's New in the Latest Release of Mimics 18.0 and 3-matic 10

Materialise is proud to announce the latest release of the Mimics Innovation Suite for Engineering on Anatomy! This software update celebrates Materialise's 25th anniversary! We're looking forward to engineering the future with you.

For the development of Mimics 18.0 and 3-matic 10.0 we focused heavily on user-friendliness to further improve your workflows. We've also included new tools to significantly speed up the segmentation process and expand your visualization capabilities. Discover what's new and see how you can incorporate the latest functionalities into your workflow.

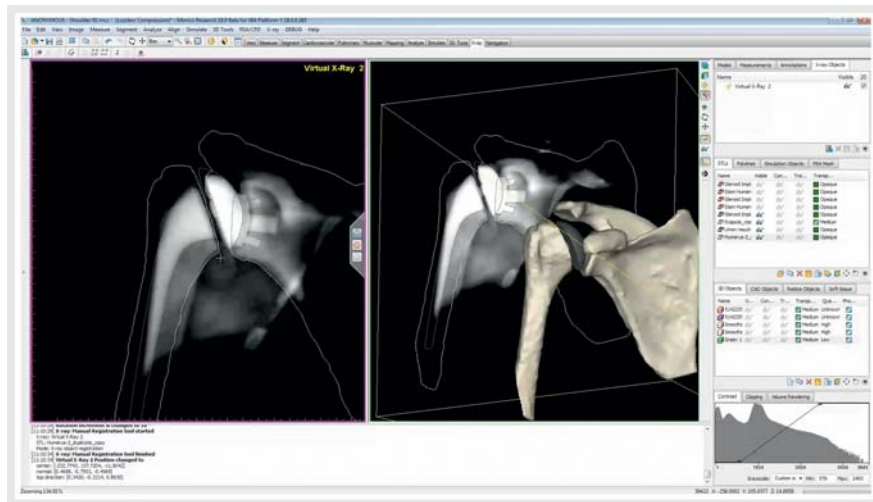
Why Choose the Mimics® Innovation Suite

Materialise strives to help you to stay on the cutting-edge of the biomedical industry by providing the most advanced tools available. With our Suite, you can achieve rapid, reliable image segmentation and accurate 3D reconstructions with our validated technology for „Engineering on Anatomy“. With the Mimics Innovation Suite and our team of „innovators you can count on“, the possibilities are endless.

General Improvements

The Mimics Innovation Suite has been updated with various features to enhance your user experience:

- **Contour Editing:** Finish your segmentation faster and in a more intuitive way by interactively adjusting the object contours on the 2D image cross sections.
- **Snapping:** Create measurements and objects to intuitively aid in your analysis. Mimics will now automatically detect and let you snap to existing points, mid-points of lines, centers of 3D object contours and much more.
- **Improved Project Management:** Customize and speed up your workflows with adjustable „project management“ tabs in Mimics. With our new unlimited pro-



ject file size, you can also import large image stacks.

- **Fluoroscopy View:** Enhance the view of your region of interest by identifying optimal c-arm angles for fluoroscopy. You can even simulate the angiographic view you would have during surgery.
- **Remember Parameters:** Easily repeat a specific workflow on multiple objects. **Ruler:** Rapidly comprehend the dimension of the objects in your project.
- **Sharing Your 3D Project:** Add a logo to your design and export it for printing or as a customizable 3D PDF with a header or footer.

Improvements for Orthopaedic and CMF Professionals

We are broadening your „Engineering on Anatomy“ capabilities with expanded visualization capabilities. In addition, our improved design tools allow you to prepare more realistic custom implants with increased flexibility.

- **Optimize Your X-ray* Protocol:** Simplify your 2D/3D registration with the new „virtual X-ray“ Tool.
- **Design Plates with Variable Thickness:** Design more realistic cranial plates for a better fit with the surrounding bone.

- **Improve Your FEA Meshing:** Take your finite element analyses to a higher level with the enhanced mesh creation and unlimited material assignment.

Improvements for Cardiovascular Professionals

Whether you are designing stents, valves, CRM devices or benchtop models, there's no better way to begin than with medical image data.

- **Accelerate Heart Segmentation:** Automate your segmentation of the different heart chambers by defining the appropriate threshold. On a good quality dataset, this can be done in a few clicks.
- **Simplify Benchtop Model Creation:** Bridge between any two closed contours or sweep along a chosen path with multiple closed contours with the „Loft“ and „Sweep Loft“ tools.
- **Characterize the Mitral Valve:** Limit the number of design iterations and enter clinical trials with more confidence using this patent pending workflow!



Contact: mimics@materialise.be
or biomedical.materialise.com

Neue 3D-Menschmodell-Datenbank von Simpleware

Die britische Firma Simpleware entwickelt Softwarelösungen zur Visualisierung und Analyse von 3D-Bilddaten und deren Umwandlung in hochwertige CAD- und CAE-Modelle. Simpleware bietet nun auch analysefertige Modelle des menschlichen Körpers, die individuell an Kundenwünsche angepasst werden können. Die Sammlung besteht aus segmentierten anatomischen Modellen und basiert auf hochwertigen MRT- und CT-Scan-Daten. Die Simulationsmodelle sind in einer Vielzahl an Varianten erhältlich und reichen von Ganzkörpermodellen in verschiedenen Perzentilen bis zu einzelnen Teilen des menschlichen Körpers.

Die Menschmodelle basieren auf der einzigartigen CAE-Modellierungs-Software von Simpleware und können in viele CAD-, FEM- und CFD-Pakete (wie ANSYS, COMSOL, Abaqus CAE, LS-DYNA und

Nastran) importiert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, CAD-Modelle, zum Beispiel von Implantaten, problemlos in die anatomischen Geometrien zu integrieren.

Wissenschaftler und Ingenieure aus verschiedenen Anwendungsgebieten profitieren von den Simpleware-Simulationsmodellen, da sie über ein große Detailreue verfügen und an die jeweiligen kundenspezifischen Anforderungen anpassbar sind. Detaillierte Kopf- und Vollkörpermodelle wurden bereits erfolgreich von Organisationen wie dem US Naval Research Laboratory für Kopfaufprall-Analysen und ANSYS (Ansoft) für elektromagnetische Simulationen verwendet.

Weitere Informationen finden Sie unter:

www.humanbodymodels.com
www.simpleware.com



Beispiel eines Menschmodells von Simpleware

Patient-specific Musculoskeletal Modelling of Total Knee Arthroplasty using Force-dependent Kinematics

Congratulation to Michael Skipper Andersen (AnyBody Research Group, Aalborg University) and coworker for winning 2014 Grand Challenge competition 1st place for their study

What is the grand challenge competition?

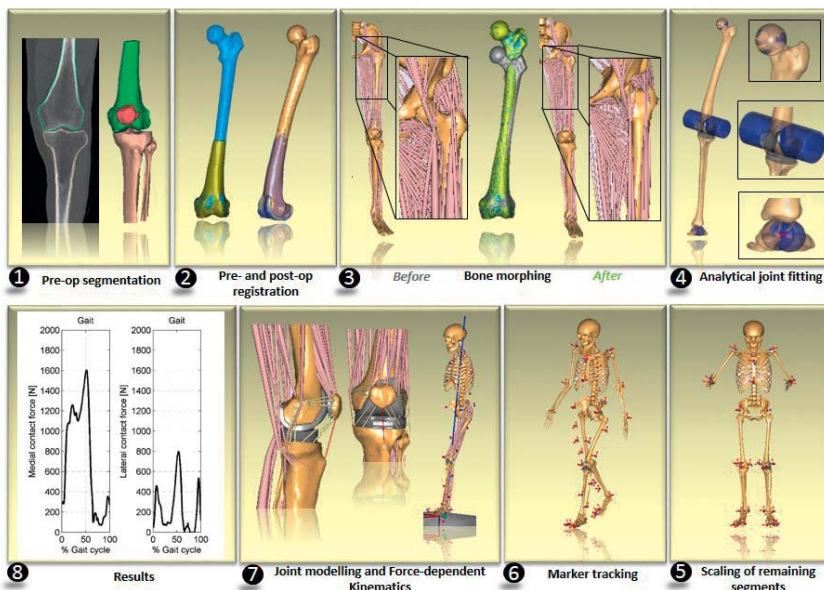
The Grand Challenge is a unique competition using musculoskeletal simulation to

predict in vivo knee loads organized by B.J. Fregly (University of Florida), Darryl D’Lima (Scribbs Clinic) and Thor Besier (Auckland Bioengineering Institute). Patient data sets including video motion, ground reaction, muscle EMG, muscle strength, static and dynamic imaging, and implant geometry are used by the participants to create musculoskeletal models to predict tibial contact forces without having access to the corresponding in vivo measured tibial contact forces (Fregly et al. 2012 JOR).

Who participated?

In 2014 several academic groups from all over the world participated in the 2014 challenge. Research groups from France/Luxemburg, Korea, China, USA, Denmark/Belgium/Netherlands participated using different approaches and simulation tools.

For more information about the AnyBody Modeling System please visit www.anybodytech.com



Pictures: Courtesy of Michael Skipper Andersen (Aalborg University, DK)

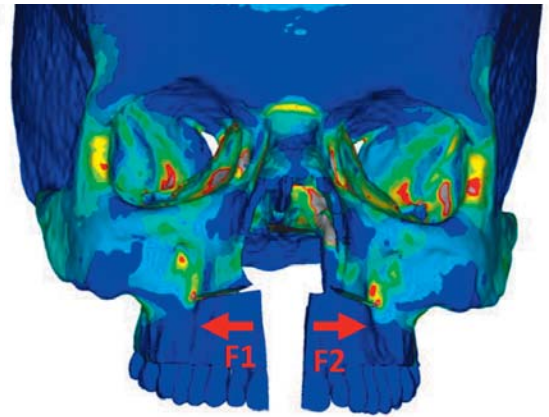
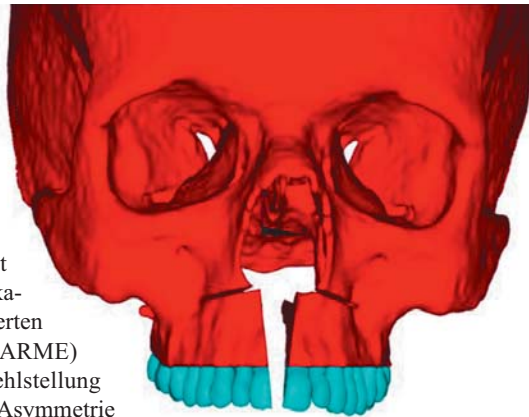
Simulation der forcierten Gaumennahterweiterung mittels FEM

Optimierung der Osteotomieführung für eine symmetrische Distraction

L. Wolter, A. Volf, L. Bonitz, M. Eblenkamp, E. Wintermantel*

Kurzfassung

Eine asymmetrische Distraction mit einer unterschiedlichen Aufweitung beider Oberkieferhälften stellt eine wohlbekannte Komplikation im Rahmen einer forcierten Gaumennahterweiterung (SARME) dar. Diese postoperative Fehlstellung wird durch die individuelle Asymmetrie der Knochenstruktur, -dichte und -geometrie des Oberkiefers hervorgerufen. Individuelle und hoch standardisierte chirurgische Eingriffe im Rahmen der Kieferchirurgie und -orthopädie, basierend auf dreidimensionalen FEM-Modellen, stellen hierbei eine neue Methode dar, das Operationsergebnis zu verbessern. In dieser Arbeit wird der grundlegende Prozess der Simulation zur Optimierung patientenspezifischer Eingriffe in der Kieferchirurgie beschrieben. Dazu wird zunächst ein dreidimensionales Schädelmodell basierend auf CT-Daten erstellt. Dann erfolgt eine Finite-Elemente-Analyse (FEA) zur Berechnung der Steifigkeiten der einzelnen



Oberkieferhälften. Abschließend können die Ergebnisse genutzt werden, um im Rahmen einer Optimierungsschleife eine bestmögliche Osteotomieführung, zur Erreichung einer symmetrischen Distraction, für den Patienten zu entwickeln.

Schlüsselwörter

SARME, Forcierte Gaumennahterweiterung, Simulation, Optimierung, Finite Elemente Methode (FEM), Hounsfield-Mapping

1 Einleitung

Die rasche Gaumennahterweiterung SARME (Surgically Assisted Rapid Maxillary Expansion) wurde 1860 erstmals durch E. C. Angell beschrieben [1]. Mittlerweile ist die rasche (chirurgisch unterstützte) Gaumennahterweiterung eine standardmäßig durchgeführte, kieferchirurgisch-kieferorthopädisch kombinierte Operationsmethode, um transversale Engstände im Zahnbogen des Oberkiefers zu behandeln. Hierbei wird im Allgemeinen zunächst eine Schwächung der Oberkieferhälften durch eine lokale Osteotomie und eine Eröffnung der Gaumennaht (lat.: *Sutura palatina mediana*) vorgenommen. In einem zweiten Schritt werden dann beide Oberkieferhälften transversal aufgedehnt, indem eine Distraktionsapparatur am knöchernen Gaumen oder an Prämolaren und Molaren befestigt wird [2].

Eine wohlbekannte Komplikation dieser Operationstechnik stellt die unsymmetrische Distraction beider Oberkieferhälften dar [3]. Bei der herkömmlichen SARME

Abstract

An asymmetric distraction with different expansions of both maxillary parts constitute a serious complication, which is caused by the individual asymmetry of bone structure, density and geometry of the maxilla during a surgical assisted rapid maxillary expansion (SARME). Individual and highly standardized surgical interventions in cranial and maxillofacial surgery based on a 3-dimensional FEA model are a new method to improve the quality of the therapy. In this paper the fundamental process of simulation is described, regarding the optimization of individual surgical interventions in maxillofacial surgery. Initially the model construction is realized based on a spiral computed tomographic

(CT) scan of the patient. Finite element analysis is created using the software ANSYS Classic 15.0 as well as ANSYS ICEM CFD 15.0 for meshing. Furthermore Hounsfield-Units were linked to individual mechanical properties of each finite element to reflect inhomogeneous bone behavior. Finally simulation results can be transferred into an optimization program to create individual surgical guidance.

Keywords

SARME, Surgically Assisted Rapid Maxillary Expansion, Simulation, Optimization, Finite Element Analysis (FEA), Hounsfield-Mapping

* B.Sc. (TUM) Lennart Wolter,
Dr. med. Markus Eblenkamp,
Prof. Dr. med. Dr.-Ing. habil. Erich Wintermantel

Technische Universität München, Lehrstuhl für
Medizintechnik, 85748 Garching bei München
Dipl.-Ing. Alexander Volf,
CADFEM GmbH, 85567 Grafing bei München
Dr. med. Dr. med. dent. Lars Bonitz
Klinikum Dortmund gGmbH, 44145 Dortmund

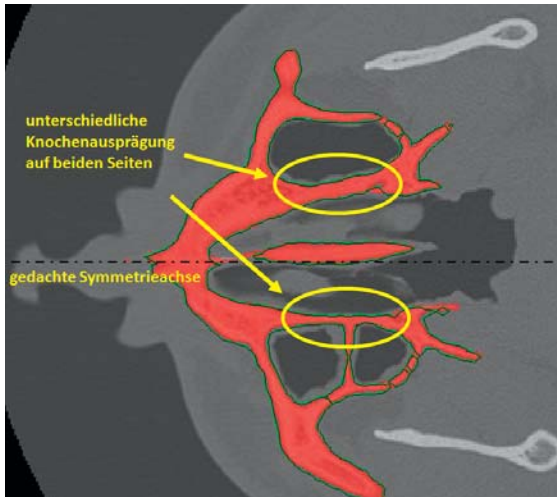


Bild 1: Knochenasymmetrie in der Le-Fort-I Ebene

werden die Oberkieferhälften auf Basis der Erfahrung des Operateurs durch eine Osteotomie auf Höhe der Le-Fort-I Ebene beidseitig gleichmäßig geschwächt, um die spätere Distraktion zu erleichtern. Infolge dessen kommt es durch die Asymmetrie der Knochengeometrie, -struktur und -dichte (Bild 1) zu zwei Oberkieferhälften, mit jeweils unterschiedlicher Steifigkeit, die dann im Rahmen der Distraktion eine unterschiedliche transversale Verschiebung erfahren. Dies führt am Ende zu einer unsymmetrischen Distraktion und einem unbefriedigendem Ergebnis für den Patienten.

Folglich ist es notwendig, eine an die jeweilige Knochenausprägung angepasste Schnittführung der Osteotomie zu entwickeln, die eine jeweils beidseitig unterschiedlich starke Schwächung der Oberkieferhälften zur Folge hat. Dies führt im Ergebnis zu einer gleichmäßigen Steifigkeit der beiden individuellen Oberkieferhälften. Werden dann die beiden Oberkieferhälften transversal gedehnt, so geschieht dies aufgrund der angepassten Steifigkeit gleichmäßig.

Die Finite-Elemente-Simulation kann dies ermöglichen, indem ein virtuelles Schädel-

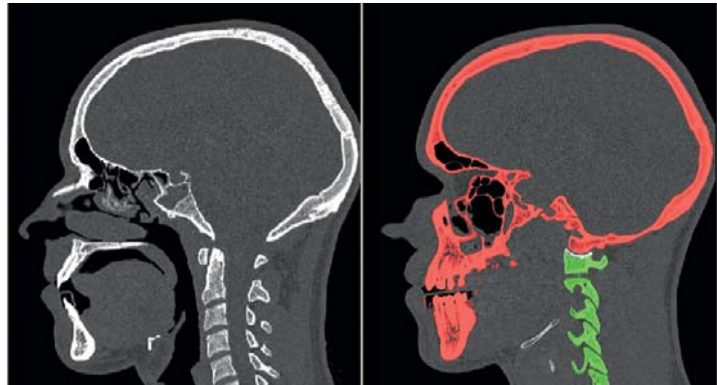


Bild 2: Ausarbeiten der für die Fragestellung relevanten anatomischen Strukturen

modell erzeugt und berechnet wird, um die Knochengeometrie zu modellieren. Zusätzlich lässt sich die Knochenstruktur durch eine Verknüpfung der Materialeigenschaften des menschlichen Knochens mit den Hounsfield-Units aus den vorliegenden CT-Daten simulieren und damit die Steifigkeit des Schädels und Oberkiefers berechnen. In einem weiteren Schritt wird dann eine Optimierung der Osteotomie durchgeführt, mit dem Ziel eine Angleichung der Steifigkeit der beiden Oberkieferhälften zu erreichen. Dies führt zu einer gleichmäßigen Distraktion und einem zufriedenstellenden Ergebnis für Patient und Operateur.

2 Erstellung des dreidimensionalen Schädelmodells aus CT-Daten

Zur Erstellung dreidimensionaler Schädelmodelle aus CT-Daten, auch Segmentierung genannt, sind unterschiedlichste Softwaretools auf dem Markt verfügbar. In unserem Fall wird die ScanIP Softwareumgebung (Simpleware Ltd, Exeter, UK) in Version 6.0 verwendet.

Der Prozess beginnt mit dem Einlesen von CT-Daten im DICOM-Format. Diese werden dann in der Segmentierungssoftware – ähnlich wie bei einem Bildbearbeitungs-

programm – anhand der Grauwerte analysiert und dienen als Basis für ein Schädelmodell.

Bild 2 zeigt einen Vorher-/Nachher-Vergleich, wobei links die importierten CT-Daten zu erkennen sind. Rechts wurden der Schädel und die Halswirbelsäule segmentiert. Hieraus lassen sich dreidimensionale Modelle berechnen und anschließend als STL-Dateien exportieren.

Dieser Prozess ist im Allgemeinen für alle anatomischen Strukturen anwendbar. Jedoch spielt die Datenquelle eine wichtige Rolle, denn gute Modelle lassen sich nur mit einer hohen Bildqualität erzeugen. Je besser die Grauwerte für die Gewebearten in den Bildern unterscheidbar sind, desto besser funktioniert auch die Segmentierung. Für Grenzschichten muss die Bildgebung eine ausreichende Auflösung (Voxelgröße) bereit stellen. So sind für knöcherne Strukturen CT-Daten ideal, muskuläre Bereiche werden besser durch MRT-Bilder dargestellt und für die Segmentierung der Luftröhre ist die Datenquelle von untergeordneter Bedeutung.

3 Vernetzung und Modellvorbereitung der Schädelgeometrie

Zur Modellvorbereitung und Vernetzung wird das Programm ANSYS ICEM CFD in der Version 15.0 verwendet (ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA). Der Patientenschädel, der mittlerweile aus dem Schädelknochen und sechzehn separat segmentierten Zähnen besteht, wird einer „virtuellen Osteotomie“ unterzogen und für die spätere Simulation vernetzt. Mit dem Begriff „virtuelle Osteotomie“ ist hierbei die programminterne und virtuelle Erstellung der vom Operateur durchgeführten Knochenschnitte gemeint. Diese sind in Bild 3 dargestellt.

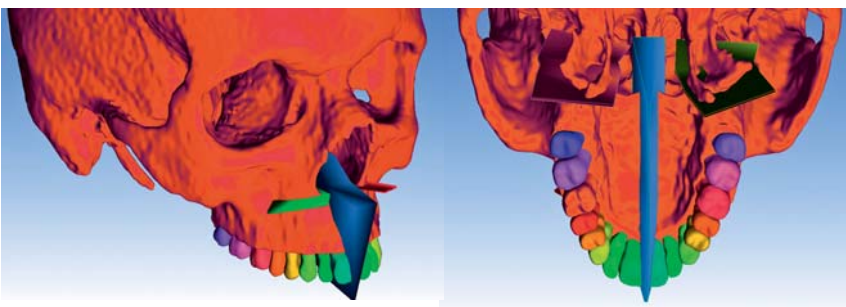


Bild 3: Modellvorbereitung des Schädelmodells

Dort ist das Schädelmodell mit den einzelnen Zähnen zu sehen sowie fünf importierte STL-Schnittkörper. Diese sollen die Osteotomie, das heißt die Knochendurchtrennung, repräsentieren. Hierbei wird die Gaumennaht (lat.: *Sutura palatina mediana*) durchtrennt (blauer Schnittkörper). Ebenso erfolgt beidseitig auf Höhe der LeFort-I Ebene (rechts grüner Schnittkörper, links roter Schnittkörper) eine Durchtrennung. In ICEM CFD wird dies realisiert, indem die STL-Schnittkörper nicht vernetzt werden.

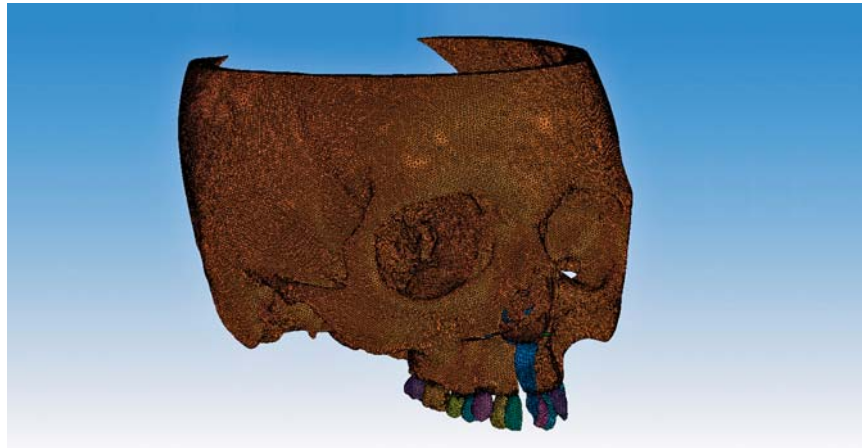


Bild 4: Vernetzter Schädel mit virtueller Osteotomie

Das Ergebnis der Vernetzung ist in Bild 4 gezeigt. Insbesondere die Durchtrennung der Gaumennaht lässt sich hierbei gut erkennen. Des Weiteren wurden zwei Schnittebenen oben und hinten am Patientenschädel erzeugt, um die Randbedingungen (Feste Einspannung) aufzubringen. Im Bereich des Übergangs von Zähnen zum Schädel wurde ein sogenanntes „Connected Mesh“ erzeugt, sodass auch dort eine zufriedenstellende Elementqualität sichergestellt ist.

Nach der Modellvorbereitung und Vernetzung kann im finalen Schritt eine Input-Datei, die das zuvor generierte FE-Netz enthält, für die nachfolgende Simulation erstellt werden.

4 Hounsfield-Mapping

Die sogenannte Hounsfield-Skala beschreibt im Allgemeinen die Abschwächung monochromatischer Röntgenstrahlung durch das abgebildete Gewebe. In den CT-Bildern (Bild 2) repräsentierten die unterschiedlichen Grauwerte die verschiedenen Hounsfield-Units, die typischerweise zwischen -1024 und 3071 HU liegen. Diese Zahl wird definiert als

$$[CT - Zahl] = \frac{\mu_{\text{Gewebe}} - \mu_{\text{Wasser}}}{\mu_{\text{Wasser}}} \cdot 1000HU$$

Somit eignen sich die Hounsfield-Werte dazu, die Inhomogenität des Knochens mit seinen kortikalen und spongiösen Strukturen zu beschreiben. In der Simulation wollen wir uns dies zu Nutze machen, um die unterschiedlichen Hounsfield-Werte durch einen mathematischen Zusammenhang mit der Knochendichte und in einem zweiten Schritt mit dessen mechanischen Eigenschaften zu verknüpfen. Dadurch soll dann jedem einzelnen finiten Element ein eigener Materialkennwert zugewiesen werden. Somit lassen sich sowohl kortikale als auch spongiöse Bereiche in der Simulation berücksichtigen und der inhomogenen Knochenstruktur wird Rechnung getragen. Insbesondere vor

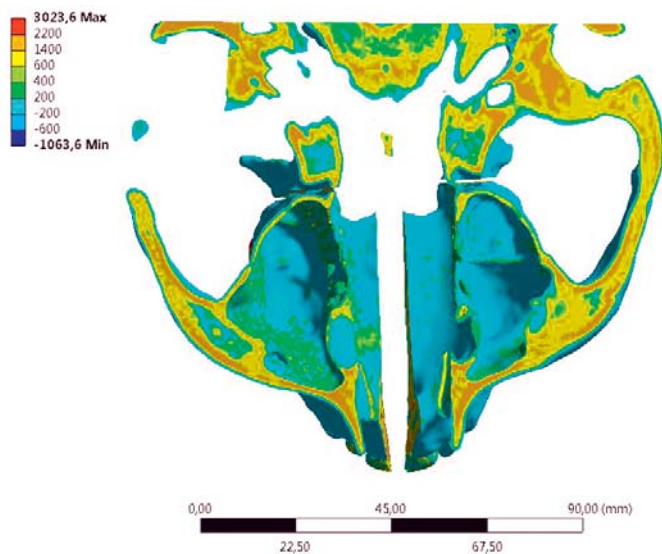


Bild 5: Hounsfield-Mapping im Bereich der LeFort-I Ebene

dem Hintergrund der unterschiedlichen Steifigkeiten beider Oberkieferhälften gewinnt dies an Relevanz, da davon ausgegangen werden muss, dass nicht nur die Geometrie der Maxillahälften, sondern auch deren Struktur sich auf beiden Seiten unterscheidet.

Nachfolgend ist der mathematische Zusammenhang nach Wirtz et al. (2000) [4] zur Verknüpfung der Knochendichte und der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Grauwerte gezeigt

$$E = \begin{cases} 1904\rho^{1,64} \\ 2065\rho^{3,09} \end{cases}$$

und

$$\nu = \begin{cases} 0,3 & 100 \leq HU \leq 349 \\ 0,36 & 350 \leq HU \leq 2000 \end{cases}$$

Um die eigentlichen Hounsfield-Units aus den CT-Daten mit der Variable ρ , der Knochendichte, zu verknüpfen, muss noch eine Verbindung zwischen der Knochendichte

und den Hounsfield-Units aufgestellt werden. Hierzu wird ein linearer Zusammenhang nach Rho et al [5] implementiert

$$\rho = a + b \cdot h$$

mit

$$h = HU$$

Dabei sind die Konstanten a und b vom Gewebetyp abhängig. In Anlehnung an Rho et al [5] und Pise et al [6] wird für a ein Wert von 131 und für b von 1,067 gewählt. Die Werte gehen aus Untersuchungen des proximalen Femurs hervor. Dies stellt für die vorgeschlagene Aufgabenstellung zwar keine ideale Basis dar, jedoch waren in der Literatur keine Angaben für Werte des menschlichen Oberkiefers zu finden.

Als Ergebnis steht für jedes finite Element ein spezifischer Materialkennwert zur Verfügung (Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl). Natürlich sind für die Ver-

knüpfung der Knochendichte mit den mechanischen Eigenschaften zahlreiche weitere Modelle nutzbar, wie die nach *Cody et al.* (1991)[7] oder *Rice et al.* (1988)[8]. Letzteres basiert auf einer Theorie von *Carter und Hayes* (1977)[9].

Um das Ganze mit einem bildlichen Verständnis zu unterstützen, ist in *Bild 5* das Hounsfield-Mapping in der Le-Fort-I Ebene visualisiert. Hierbei ist die Abbildung der kortikalen und spongiösen Strukturen sehr gut erkennbar. Dabei fällt abermals die Asymmetrie der beiden Maxilla-Hälften auf, diesmal in Bezug auf die Knochendichte.

7 Simulation

Die in ICEM CFD erstellte Input-Datei wird im nächsten Schritt in die Simulationsumgebung geladen. In unserem Fall wurde das Programm ANSYS Mechanical, in der Version 15.0 verwendet (ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA). Die Simulation wird mittels der programminternen Programmiersprache APDL (Ansys Parametric Design Language) geplant und durchgeführt. Dies beinhaltet das Einladen des Modells, das Hounsfield-Mapping sowie die Definition weiterer Materialparameter und Randbedingungen.

Auf den Zahnapparat wird das Hounsfield-Mapping nicht angewandt. Hierbei wird ein Elastizitätsmodul von 20.000 MPa und eine Querkontraktionszahl von 0,3 in Anlehnung an *Jafari et al* [10] und *Erdmann et al* [11] definiert.

An der hinteren und oberen Schädelebene wird eine feste Einspannung als Randbedingung aufgebracht und die Distraction des Oberkiefers mit einer Verschiebung am knöchernen Gaumen (lat.: *Palatum osseum*) nachgebildet. Dazu werden Knoten im Ansatzbereich des Distraktors ausgewählt und für diese eine laterale Verschiebung von 7 mm definiert.

Final erfolgt die Berechnung des Modells. Dies kann in Abhängigkeit der Elementgröße etwa fünfzehn Minuten in Anspruch nehmen. Dabei wird eine Vielzahl an Daten ausgewertet. Hierzu gehören unter anderem die in *Bild 6* gezeigten Kraftreaktionen F1 und F2 der linken und rechten Oberkieferhälfte. Diese dienen der direkten Bewertung der Steifigkeit der einzelnen Oberkieferhälften, welche in einer nachfolgenden Optimierungsschleife angeglichen werden sollen. Ist eine Hälfte sehr steif, so fällt deren Reaktionskraft auf die aufgebrachte Verschiebung höher aus als die Andere.

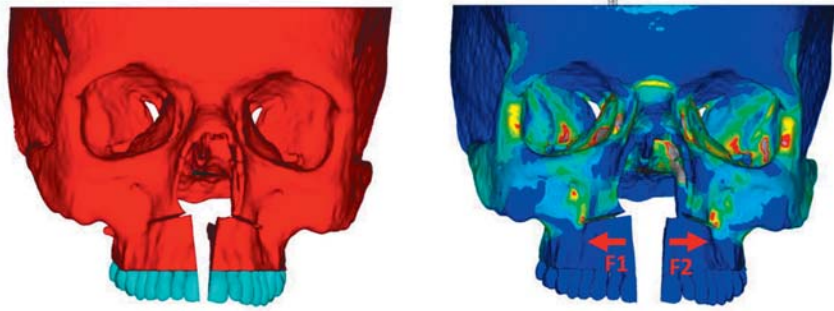


Bild 6: Die Schädelgeometrie mit den Osteotomieschnitten links und das Simulationsergebnis rechts, wobei die elastische Dehnung dargestellt ist. Gut zu erkennen ist die Eröffnung der Gaumennaht (lat.: Sutura palatina mediana).

8 Optimierung

Im Rahmen einer Optimierungsschleife (OptiSLang 4.1.1, Dynardo GmbH, Weimar, Deutschland) kann dann das übergeordnete Ziel einer gleichmäßigen Distraction der Oberkieferhälften anvisiert werden. Hierzu müssen die Kraftreaktionen F1 und F2 angeglichen werden, die für die jeweilige Steifigkeit der Oberkieferseiten stehen. Diese Angleichung erfolgt über die Variation der Schnittführung der Osteotomie auf Höhe der Le-Fort-I Ebene, wie in *Bild 3* zu sehen.

Eine Optimierungsschleife führt auf Basis verschiedener Algorithmen den Prozess der Modellvorbereitung und Vernetzung sowie der Simulation automatisch für viele verschiedene Designs durch und sucht hierbei nach einem optimalen Design für

den Patienten. Um eine optimale Osteotomie zu finden, muss eine ausreichende Anzahl an Berechnungsergebnissen vorliegen, damit der Optimierungsalgorithmus entsprechend der Vorgaben (geringe Kraft, hohe Symmetrie der beiden Oberkiefersteifigkeiten) ein gutes Ergebnis erzielt. Als Erfahrungswert für ein gutes Ergebnis sollten mindestens 100, besser 150 Iterationen durchgeführt werden.

In *Bild 7* wird der beschriebene Optimierungsprozess dargestellt. Auf der Abszisse ist die Anzahl der Designs aufgetragen und auf der Ordinate das sogenannte „Objective Value“. In diesem Fall ist dies die absolute Symmetrie, die sich aus der Differenz beider Kraftreaktionen F1 und F2 ergibt. Hier steht ein geringer Zahlenwert für einen geringen Unterschied der beiden Kraftreaktionen und damit für eine gleichmä-

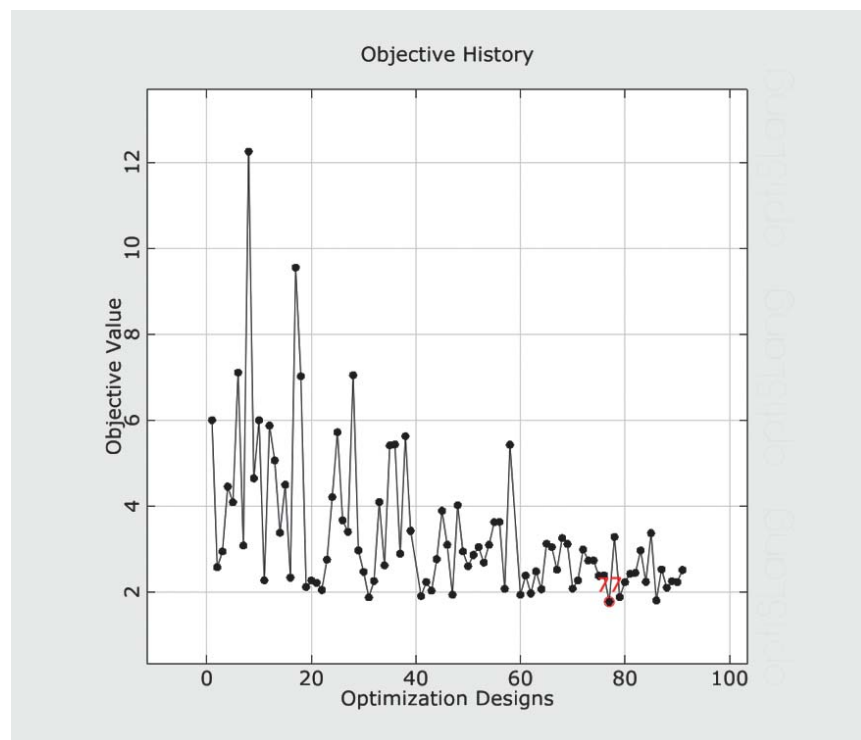


Bild 7: Optimierungsprozess mit circa 90 Iterationen

ßige Distraction. Gut zu erkennen ist, wie der Optimierungsalgorithmus sich kontinuierlich geringeren Werten annähert.

Dem Operateur werden damit Informationen zur Verfügung gestellt, mit denen er die nach seiner Meinung beste Schnittführung auswählen kann. Hervorzuheben ist, dass dem Operateur lediglich eine Handlungsempfehlung auf Basis numerischer Ergebnisse gegeben wird. Dies entlastet ihn nicht von seiner Sorgfaltspflicht, seine operative Erfahrung in den Auswahlprozess der richtigen Schnittführung mit einfließen zu lassen.

Auf Basis dieser optimierten Osteotomieführung (Design 77 in *Bild 7*) können dann Schablonen (sogenannte Guides) mittels 3D-Druck gefertigt werden, um die Schnittführung in den Operationsaal zu übertragen.

9 Ausblick

Der vorgestellte Prozess stellt eine gänzlich neue Methode dar, standardisierte, patientenindividuelle, kieferchirurgische Eingriffe vorzunehmen und damit das Behandlungsergebnis deutlich zu verbessern. Die Zusammenführung der Arbeit von Ärzten und Ingenieuren soll hierbei durch einen hohen Automatisierungsgrad und eine einfache Bedienbarkeit sichergestellt werden. Ziel ist es, insbesondere durch eine einfache Bedienbarkeit, patientenindividuelle Therapien stärker in den medizinischen Alltag zu integrieren und für eine Vielzahl von Ärzten zugänglich zu machen. Hierzu muss die Berechnung des Ingenieurs und des Simulationsprogramms im Hintergrund durchgeführt werden und

die Ergebnisse müssen für die Ärzte gut verständlich sein, um beide Domänen zusammenzuführen. Gelingt dies, so lässt sich ohne einen signifikant größeren Aufwand für den Arzt das Behandlungsergebnis positiv beeinflussen.

Ziel des Artikels war es, aufzuzeigen, wie die Simulation einen patientenindividuellen chirurgischen Eingriff ermöglicht. Dabei lässt sich dieser Ansatz in seinen Grundsätzen auch auf andere medizinische Bereiche übertragen, indem auf Basis der Segmentierung und Simulation eine patientenspezifische Behandlung vorbereitet wird.

Dennoch muss darauf hingewiesen werden, dass die Simulation dem Operateur lediglich wichtige Informationen bereitstellt, die Entscheidung über die eigentliche Art der Behandlungsdurchführung darf dabei nicht vernachlässigt werden.

Literatur

- [1] E. C. Angell, „Irregularities of the teeth and their treatment,“ *San Fr. Med. Press*, vol. 1, no. 1860, pp. 181–185, 1860.
- [2] C. Sander, S. Hüffmeier, F. M. Sander, and F. G. Sander, „Erste Ergebnisse zur Kraftausübung bei der Gaumennahterweiterung bei Kindern,“ *J. Orofac. Orthop.*, vol. 67, no. 1, pp. 19–26, 2006.
- [3] L. Bonitz and C. Mueller, „Optimization in model-based simulations of surgical procedures – Surgically Assisted Rapid Maxillary Expansion,“ in 10. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag, 2013, pp. 1–11.
- [4] D. C. Wirtz, N. Schi, T. Pandorf, K. Radermacher, D. Weichert, and R. Forst, „Critical evaluation of known bone material properties to realize anisotropic FE-simulation of the proximal femur,“ *J. Biomech.*, vol. 33, pp. 1325–1330, 2000.
- [5] J. Y. Rho, M. C. Hobatho, and R. B. Ashman, „Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone,“ *Med. Eng. Phys.*, vol. 17, no. 5, pp. 347–355, Jul. 1995.

- [6] U. V. Pise, A. D. Bhatt, R. K. Srivastava, and R. Warkedkar, „A B-spline based heterogeneous modeling and analysis of proximal femur with graded element,“ *J. Biomech.*, vol. 42, no. 12, pp. 1981–8, Aug. 2009.
- [7] M. J. Ciarelli, S. A. Goldstein, J. L. Kuhn, D. D. Cody, and M. B. Brown, „Evaluation of orthogonal mechanical properties and density of human trabecular bone from the major metaphyseal regions with materials testing and computed tomography,“ *J. Orthop. Res.*, vol. 9, pp. 674–682, 1991.
- [8] J. C. Rice, S. C. Cowin, and J. A. Bowman, „On the dependence of the elasticity and strength of cancellous bone on apparent density,“ *J. Biomech.*, vol. 21, no. 2, pp. 155–168, Jan. 1988.
- [9] D. R. Carter and W. C. Hayes, „The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure,“ *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 59, no. 7, pp. 954–62, Oct. 1977.
- [10] A. Jafari, K. S. Shetty, and M. Kumar, „Study of Stress Distribution and Displacement of Various Craniofacial Structures Following Application of Transverse Orthopedic Forces — A Three-dimensional FEM Study,“ *Angle Orthod.*, vol. 73, no. 1, pp. 12–20, 2003.
- [11] B. Erdmann, C. Kober, J. Lang, P. Deuffhard, H. Zeilhofer, and R. Sader, „Efficient and Reliable Finite Element Methods for Simulation of the Human Mandible,“ 2001.

Kurzbiografie

B.Sc. Lennart Wolter hat Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Medizintechnik an der Technischen Universität München (TUM) studiert. Im Rahmen seiner Bachelorarbeit hat er sich mit der Optimierung der Schraubenposition in Osteosynthese-Implantaten beschäftigt und hierbei wichtige Untersuchungen zum Kraftfluss in Abhängigkeit der Schraubenposition durchgeführt und die Ergebnisse im *Journal of Biomedical Engineering* publiziert. Seine Masterarbeit führte Lennart Wolter in Kooperation mit der CADFEM GmbH durch und beschäftigte sich hierbei mit der Simulation der forcierten Gaumennahterweiterung. Derzeit studiert er außerdem Betriebswirtschaftslehre an der TUM School of Management.

Kontaktinformationen des Autors:
E-Mail: lennart_wolter@mytum.de
Tel.: +49 (0) 151 25373444

Veranstaltungen

25. Juni 2015 in Bremen

came-Konferenz: FEM-Simulation in Medizin und Biomechanik

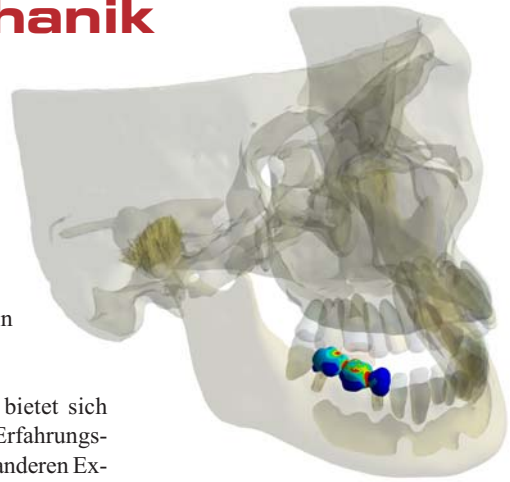
Die Vorträge auf der **came**-Konferenz am 25. Juni 2015 (9:00 bis 17:30 Uhr) in Bremen vermitteln den Teilnehmern einen Überblick zum aktuellen Spektrum der Simulation in den Bereichen Medizin und Biomechanik. Dabei steht das Akronym „**came**“ für Computer Aided Medical Engineering und verdeutlicht den Transfer der Simulationstechnologie aus ihrem „klassischen“ Umfeld, dem Maschinen- oder Fahrzeugbau, hin zu medizinischen Anwendungen. Während der Konferenz wird anhand von Beispielen veranschaulicht, welchen Mehrwert die Simulation bei ausgewählten klinischen Fragestellungen liefert.

Die Konferenz richtet sich an Entwicklungsingenieure aus der Medizintechnik, die sich mit der Interaktion von Medizinprodukten und menschlichem Körper beschäftigen. Aber auch Ärzte und Mediziner

sind angesprochen, die einen Einblick in die Simulationstechnologie gewinnen möchten. Zusätzlich ist die Konferenz für Forscher aus den Bereichen Biomechanik oder Medizin interessant, bei deren Arbeit die Simulation schon heute eine Rolle spielt oder in Zukunft spielen wird.

Im Congress Center Bremen bietet sich Gelegenheit zum intensiven Erfahrungsaustausch mit Anwendern und anderen Experten. Die **came**-Konferenz ist zum 5. Mal ein integraler Bestandteil der Fachkonferenz für Numerische Simulation von CADFEM und ANSYS.

Weitere Informationen und ein Anmeldeformular sind unter www.usersmeeting.com zu finden.



CADFEM GmbH

Alexander Nolte
Marktplatz 2
85567 Grafing b. München
Tel. 08092 7005-49
E-Mail: anolte@cadfem.de
Internet: www.cadfem.de

12. und 13. Juni 2015 in Basel



Deutsch-Österreichisch-Schweizer Kongress für Sportorthopädie und Sporttraumatologie

Am 12. und 13. Juni 2015 findet der 30. Jahreskongress der GOTS (Deutsch-Österreichisch-Schweizer Gesellschaft für Orthopädisch-Traumatologische Sportmedizin) mit Kongresspräsident Prof. Dr. med. Beat Hintermann (Liestal) im Congress Center in Basel statt. Die Hauptthemen des 30. Jahreskongress der GOTS sind: Diagnostik und Therapie der Früharthrose, operative Fehlschläge in der Sportorthopädie und Sportmedizin, Sportfähigkeit im Alter, Sportverletzungen und Sportschäden am Sprunggelenk, Tennis sowie freie Themen.

Ergänzend zu den Vorträgen werden Instruktionkurse, Workshops und Symposien mit praktischen Demonstrationen angeboten. Als Themen sind beispielsweise vorgesehen „Wettkampfmedizin – Verbandsärzte“, „Young Investigator Award – by Otto Bock“ sowie „Mini-Battle: operative versus konservative Behandlung der akuten Achillessehnenruptur“.

Zu der Veranstaltung in Basel, die durch eine Industrieausstellung ergänzt wird, werden rund 500 Kongressteilnehmer erwartet, unter anderem Orthopäden, Unfall-

chirurgen, Sportärzte, Physiotherapeuten und Studenten.

Weitere Informationen zum Kongress finden Sie im Internet unter www.gots-kongress.org.

Intercongress GmbH

Bettina Fritsch
Wilhelmstr. 7, 65185 Wiesbaden,
Tel. +49 611 977 16-45
Fax +49 611 977 16-16
E-Mail: bettina.fritsch@intercongress.de
Internet: www.intercongress.de

14th to 16th September 2015 in Barcelona (Spain)

ICCB'2015: International Conference on Computational Bioengineering

The International Conference on Computational Bioengineering (ICCB'2015) will be held in Barcelona (Spain) from 14th to 16th September 2015, organised by Miguel Cerrolaza and Sergio Oller. This conference is the sixth edition of a well-known series of conferences (ICCB series), which started in 2003, that are already consolidated as leader conferences in the field. Recently, ICCB2015 has been recognized and appointed as "IACM Special Interest Conference" by the International Association of Computational Mechanics. ICCB conferences usually have 150 - 200 participants, and are designed to favour as much as possible the informal networking between researchers in addition to the exchanges in the scientific sessions.

Further information about the conference is available on the website <http://congress.cimne.com/ICCB2015>



CIMNE:
**International Center for Numerical
Methods in Engineering**

Barcelona, Spain
Tel. + 34 - 93 405 46 96
Fax. + 34 - 93 205 83 47
E-Mail: iccb2015@cimne.upc.edu

18th to 20th August 2015 in Shanghai (China)

ICBEB 2015: 4th International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology

The International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology (ICBEB) is an annual international meeting. The upcoming fourth annual conference, ICBEB2015, will be held in Shanghai, China, from August 18th-21st, 2015.

ICBEB is a platform for scholars, engineers, and scientists to present robust research demonstrating the expanding frontiers in the fields of Biomedical Enginee-

ring, Biomaterials, Biomedical Imaging, and Biomechanical Engineering. This conference will provide the most up-to-date research and cover a wide variety of application fields including; medicine, biology, physics, materials, computer science, chemistry and various clinical specialties.

The last conference, ICBEB2014, boasted nine highly respected guest speakers including; Prof. Dan Barouch from Harvard

Medical School, Dr. Christopher R. Jacobs, Dr. Edward J. Ciaccio from Columbia University, and Dr. Ng Yin Kwee from Nanyang Technological University. More than 300 participants from across the globe participated in the conference.



www.icbeb.org

Heft 1, 6. Jahrgang 2015

Herausgeber und Redaktion

CADFEM Medical GmbH
Dr.-Ing. Christoph Müller
Geschäftsführer
Marktplatz 2
85567 Grafing b. München
www.cadfer-medical.de

Dipl.-Ing. Gerhard Friederici, M.A.
Redakteur, CADFEM GmbH

OA Dr. med. Dr. med. dent. Lars Bonitz
Leiter Biomechanisch-/ Biokybernetisches
Forschungslabor (BKFL) Klinik für Mund-,
Kiefer- und Gesichtschirurgie – Plastische
Operationen – Klinikum Dortmund gGmbH

Lehrstuhl für MKG-Chirurgie der
Universität Witten/Herdecke
Münsterstrasse 240, 44145 Dortmund

PD Dr. med. Laszlo Kovacs
Leiter der Forschungsgruppe CAPS,
Ltd. OA und stellv. Klinikdirektor,
Klinik und Poliklinik für Plastische
und Handchirurgie,
Klinikum rechts der Isar,
Technische Universität München
Ismaninger Straße 22
81675 München

Veröffentlichungen

bitte an Dr.-Ing. Christoph Müller
Marktplatz 2, 85567 Grafing b. München
Tel.: +49-(0)8092-7005-43
E-Mail: cmueller@cadfer-medical.de

Manuskriptvorgaben

erhalten Sie unter
E-Mail: cmueller@cadfer-medical.de

Copyright

Beiträge, die mit vollem Namen oder auch mit Kurzzeichen des Autors gezeichnet sind, stellen die Meinung des Autors, nicht unbedingt auch die der Redaktion dar. Unverlangte Zusendungen redaktioneller Beiträge auf eigene Gefahr und ohne Gewähr für die Rücksendung. Die Einholung des Abdruckrechtes für dem Verlag eingesandte Fotos obliegt dem Einsender. Die Rechte an Abbildungen ohne Quellenhinweis liegen beim Autor oder der Redaktion. Ansprüche Dritter gegenüber dem Verlag sind, wenn keine besonderen Vereinbarungen getroffen sind, ausgeschlossen. Überarbeitungen und Kürzungen liegen im Ermessen der Redaktion. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen und Handelsnamen in dieser Zeitschrift berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Namen ohne Weiteres von jedermann benutzt werden dürfen. Vielmehr handelt es sich häufig um geschützte, eingetragene Warenzeichen. Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung des Verlags strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und

die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Entwurf und Layout

Ludwig-Kirn Layout, Ludwigsburg

Verlag

expert verlag GmbH
Wankelstr. 13, 71272 Renningen
Postfach 2020, 71268 Renningen
Tel.: +49-(0)7159-9265-0
Fax: +49-(0)7159-9265-20
E-Mail: expert@expertverlag.de

Anzeigen

Sigrid Hackenberg, expert verlag
Tel.: +49-(0)7159-9265-13
Fax: +49-(0)7159-9265-20
E-Mail: anzeigen@expertverlag.de
Informationen auf Anfrage.

Bezug

Kostenlose Verteilung

Wenn Sie die Zeitschrift **came** erhalten wollen schicken Sie eine E-Mail an cmueller@cadfer-medical.de mit dem unten ausgefüllten Bestellschein als Scan. Mit einer Bestellung erklären Sie sich einverstanden, dass Ihre Daten gespeichert werden.

Erfüllungsort und Gerichtsstand:
Leonberg

ISSN 2190-0698

1/15

Redaktionsprogramm

Methoden: Strukturmechanische Simulation (FEM) in der Prothetik – Strömungssimulation (CFD) in Blutgefäßen und Organen wie Herz und Lunge – FEM-Modellierung komplexer anatomischer Strukturen – Patientenspezifische FEM/CFD-Simulation – Bestimmung von Muskel- und Gelenkkraften – Materialgesetze und Materialparameter für hartes und weiches Gewebe, z.B. Knochen, Fett- oder Muskelgewebe – Design und Herstellung (Rapid Prototyping) von patientenspezifischen Implantaten – Der Entwicklungsprozess unter Einsatz von Simulationstools – Sicherheit und Zuverlässigkeit in der Medizintechnik – Datengewinnung und Messmethoden in der Medizintechnik

Anwendungen: Implantate für Hüfte, Schulter, Knie und Wirbelsäule – Osteosynthesen – Deformation von Fett- und Muskelgewebe – Stents, Herzklappen – Ergonomie – Belastungstests, Lebensdauerermittlung

Die Zeitschrift **came** – *Computer Aided Medical Engineering* wendet sich an Entscheider, Entwickler, Forscher und Ärzte in Unternehmen, Kliniken und Hochschulen sowie an Doktoranden und engagierte Studierende technischer und medizinischer Studiengänge.

Ja, ich bestelle die Zeitschrift **came**

Name, Vorname

Firma/Institut

Straße, Hausnummer

Telefon, E-Mail

PLZ, Ort

Datum, Unterschrift

Ich bin damit einverstanden, dass meine Daten gespeichert werden.