

Analyse und Simulation elektrischer Wechselwirkungen zwischen Implantaten und Biosystemen

Das DFG-Graduiertenkolleg 1505/1 *welisa*

Ursula van Rienen, Wolfram Mittelmeier, Jan Gimsa

Seit Oktober 2008 fördert die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) für zunächst 4,5 Jahre das Graduiertenkolleg (GRK) 1505/1 „Analyse und Simulation elektrischer Wechselwirkungen zwischen Implantaten und Biosystemen“ an der Universität Rostock mit ca. 3,3 Millionen Euro. Die besonders hervorgehobenen Buchstaben ergeben das Akronym *welisa*, mit dem sich das GRK kurz bezeichnet.

Forschen an neuartigen Implantaten

Weshalb ist die elektrische Wechselwirkung zwischen Implantaten und Biosystemen interessant?

Es gibt bereits zahlreiche Erfolge mit implantierten technischen Systemen zur Unterstützung von Körperfunktionen, die durch Krankheit, Unfall oder Alter eingeschränkt wurden. Dies hat den Forschungsbedarf jedoch nicht verringert, sondern die bereits erreichten verbesserten Funktionen, die höhere Verträglichkeit und längere Haltbarkeit von Implantaten spornen im Gegenteil zu neuer Forschung an.

Ein erheblicher Teil der daraus entstehenden Fragestellungen ist direkt mit einem möglichst tiefgehenden Verständnis der Prozesse an der Grenzfläche zwischen Implantat und dem umgebenden Gewebe verbunden. Insbesondere wenn die Implantate elektrisch aktiv sind, ist eine detaillierte Kenntnis der dort stattfindenden elektrochemischen Vorgänge erforderlich. Darüber hinaus müssen natürlich die durch die Implantate im Gewebe erzeugten elektromagnetischen Felder in die Betrachtungen einbezogen werden.

Wie wird die Wechselwirkung untersucht?

Das Ziel ist eine möglichst präzise modellhafte Beschreibung der elektrochemischen Vorgänge an den Grenzflächen der Implantate sowie der elektrophysiologischen Vorgänge im angrenzenden Gewebe. Diese Modelle sollen das biologisch-medizinische, physikochemische und das physikalisch-elektrotechnische Verständnis der Grenzflächenprozesse umfassen. Durch Experimente werden z. B. die material- und oberflächenabhängige Zellanhaftung von Knochenvorläuferzellen (Osteoblasten) und die

elektrische Kopplung von Nervenzellnetzwerken mit Sensorchips untersucht. Die Ergebnisse der Experimente gehen in mathematische Modelle ein, die elektromagnetische Feldberechnungen auf unterschiedlichen Größenskalen und funktionale Modelle der Zellphysiologie erlauben.

Welche praktische Bedeutung haben diese Studien?

Neue Konzepte werden in direktem Bezug zur Anwendung entwickelt und getestet: Implantate zur Tiefen Hirnstimulation, Hörschnecken-Implantate und elektrostimulative Implantate zur Regeneration von Knochendefekten sind die praktischen Anwendungen, auf die sich die Forschung in *welisa* richtet.

Werden die Promovierenden bei dieser anspruchsvollen Thematik speziell gefördert?

Zur Durchführung des sehr interdisziplinären, stark vernetzten Forschungsprogramms ist das enge Zusammenwirken etlicher Disziplinen erforderlich. Daher werden die Doktorandinnen und Doktoranden sowohl in fachlicher wie in methodischer Sicht besonders auf die Zusam-

menarbeit mit anderen Fachrichtungen vorbereitet. Entsprechend ihres individuellen Qualifizierungsbedarfs wird es den Doktorandinnen und Doktoranden ermöglicht, Lehrveranstaltungen, teils in englischer Sprache, zu besuchen.

Wie ordnet sich das GRK 1505/1 *welisa* in die Profillinien ein?

Das Graduiertenkolleg wirkt bei den beiden Profillinien „Leben, Licht und Materie“ und „Altern des Individuums und der Gesellschaft“ der Universität Rostock mit. Unsere hoch qualifizierten Absolventinnen und Absolventen sind besonders befähigt, um die regional wachsende medizinisch-technische Forschungs- und Wirtschaftsstruktur zu unterstützen.

Die beteiligten Fachdisziplinen

Am GRK 1505/1 *welisa* sind Forscherinnen und Forscher aus drei Fakultäten als Projektleiter beteiligt:

- Fakultät für Informatik und Elektrotechnik (IEF)
 - Bioinformatik und Systembiologie – Prof. Dr. Olaf Wolkenhauer
 - Grenzflächenanalytik – PD Dr. Ulrich Beck
 - Technische System- und Anwendersoftware – Prof. Dr. Ralf Salomon
 - Theoretische Elektrotechnik – Prof. Dr. Ursula van Rienen (Sprecherin)
- Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät (MNF)
 - Biophysik – Prof. Dr. Jan Gimsa (Stellvertretender Sprecher)
 - Mathematische Optimierung – Prof. Dr. Konrad Engel
 - Physik neuer Materialien – Prof. Dr. Eberhard Burkel

Die Autoren



v. l. Prof. Dr. Jan Gimsa, Prof. Dr. Wolfram Mittelmeier und Prof. Dr. Ursula van Rienen

**Prof. Dr. rer. nat.
Jan Gimsa**
(Stellvertretender
Sprecher des GRK)

Universität Rostock
Mathematisch-Natur-
wissenschaftliche Fakultät
Institut für Biowissen-
schaften

Mail jan.gimsa@uni-rostock.de

**Prof. Dr. med.
Wolfram Mittelmeier**
(Stellvertretender
Sprecher des GRK)

Universität Rostock
Medizinische Fakultät
Orthopädische Klinik und
Poliklinik
Lehrstuhl für Orthopädie

Mail wolfram.mittelmeier@med.uni-rostock.de

**Prof. Dr. rer. nat.
Ursula van Rienen**
(Sprecherin
des GRK)

Universität Rostock
Fakultät für Informatik und
Elektrotechnik
Lehrstuhl für Theoretische
Elektrotechnik

Mail ursula.van-rienen@uni-rostock.de

- Medizinische Fakultät (MEF)
 - Hals-Nasen-Ohrenheilkunde – Prof. Dr. Hans-Wilhelm Pau
 - Neurologie – Prof. Dr. Reiner Benecke
 - Orthopädie – Prof. Dr. Wolfram Mittelmeier (Stellvertretender Sprecher)
 - Zellbiologie – Prof. Dr. Barbara Nebe

Ebenfalls an der Betreuung von Doktorandinnen und Doktoranden in *welisa* beteiligt sind: Prof. Dr. Rainer Bader (MEF, Implantattechnologie), Dr. Eilhard Mix (MEF, Neurobiologie), Prof. Dr. Friedrich Liese (MNF, Mathematische

Statistik). Darüber hinaus wird das GRK in der Forschung und Weiterqualifikation der Doktorandinnen und Doktoranden besonders durch Dr. Werner Baumann (MNF, Biophysik), Prof. Dr.-Ing. Detlef Behrend (MEF, Nichtmetallische Konstruktionswerkstoffe und Biomaterialien), Prof. Dr. Hartmut Ewald (IEF, Technische Elektronik und Sensorik), PD Dr. Ulrike Gimsa (Leibniz-Institut für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere Dummerstorf, Neurodegenerative Erkrankungen), Prof. Dr. Brigitte Müller-Hilke (MEF, Klinische Immunologie) und PD Dr. Gerd-Uwe Flechsig (MNF, Elektrochemie) unterstützt. Es handelt sich also um ein sehr interdisziplinäres Konsortium.



„Atomic Force Workshop“, Insel Poel, Mai 2011

Das Betreuungskonzept

Zur Qualitätssicherung der Betreuung wurden im GRK *welisa* verschiedene Strukturen geschaffen. Es wurde ein Leitungsgremium gebildet, dem auch eine Sprecherin bzw. ein Sprecher der Promovierenden angehört. Dadurch sind die Promovierenden in die Mitgestaltung aller Prozesse eingebunden. Im gemeinsamen Best Practice-Wettbewerb der acatech, 4ING, TU9 und ARGE TU/TH zur Ingenieurpromotion wurden aus 28 Beiträgen elf „gelungene Beispiele zur Verbesserung der Ingenieurpromotion“ ausgewählt – darunter das GRK *welisa*. Unser Aufsatz im Tagungsband [1] gibt Details zum Betreuungskonzept. Wesentliche Eckpunkte sind u.a. eine Betreuungsvereinbarung, ein der Interdisziplinarität angemessenes Betreuungsteam aus mindestens zwei Hochschullehrern, die Erstellung eines Exposés, Fortschrittsberichte, Vorträge in den Kolloquien und Workshops des GRK.

Zur Stärkung der wissenschaftlichen Selbstständigkeit werden frühzeitig eigene Poster und kleinere Vorträge auf entsprechenden Tagungen ebenso wie erste Publikationen gemeinsam geplant und unterstützt.

Weiterhin wird die Möglichkeit angeboten, das eigene Wissen und Können durch ein- bis viermonatige Arbeitsaufenthalte bei kooperierenden Gruppen im Ausland zu erweitern. Fünf Promovierende nutzten bisher ein- oder mehrmals diese längeren Auslandsaufenthalte. Hinzu kamen kürzere Auslandsaufenthalte durch weitere Promovierende.

Das Qualifizierungsprogramm

Das Qualifizierungsprogramm, zu dem selbstverständlich auch die Tagungsbesuche und Auslandsaufenthalte gehö-

ren, profitiert stark von spezifischen Mitteln im Rahmen der DFG-Finanzierung des GRK. Es bietet den Doktorandinnen und Doktoranden die Möglichkeit, ihr Wissen im Bereich der beteiligten Fachdisziplinen, aber auch bei allgemeinen Schlüsselqualifikationen zu erweitern und zu vertiefen.

Die Interdisziplinarität erfordert einen spezifischen Zuschnitt des Programms für die jeweiligen Stipendiaten. Die Angebote sind aufgrund der verschiedenen beteiligten Fachrichtungen sehr vielfältig.

Es gibt drei wesentliche Säulen:

1. Vorlesungen,
2. Seminare und Kolloquien,
3. Veranstaltungen zum Erwerb praktischer und interdisziplinärer Kompetenz.

Die Teilnahme wird möglichst gleichmäßig auf die drei Säulen verteilt, wobei Vorlesungen nur zu Beginn einen größeren Raum einnehmen. Dies liefert einen Rahmen für die Entwicklung der Fähigkeiten und Kompetenzen, bietet aber auch genügend Raum für die Forschung und für die Arbeit an der Dissertation.

Die Auswahl der Vorlesungen und Seminare wird semesterweise gemeinsam von den Promovierenden und dem jeweiligen Betreuerteam getroffen. Beispiele für bisherige GRK-spezifische Lehrveranstaltungsthemen sind: „Biosystem-Material-Interaktion“ (Prof. Barbara Nebe), „Immunologie und Prothetik“ (Prof. Brigitte Müller-Hilke) oder auch „Erfolgreiches wissenschaftliches Publizieren“ (Prof. Olaf Wolkenhauer). Weitere Kurse zu Schlüsselqualifikationen, wie etwa Sprachkurse, Kommunikations- und Vortragstraining, Software-Training, wurden speziell angeboten.

Die Promovierenden nehmen aktiv an den Forschungsseminaren der entsprechenden Forschungsgruppen teil. Zusätzlich wird ein Forschungskolloquium des GRK durchgeführt, bei dem sowohl die Promovierenden über ihr eigenes Gebiet vortragen als auch insbesondere Gastwissenschaftler eingeladen werden. Die Promovierenden sind aktiv an

*Doktorandin
Bing Liu, Inter-
disziplinäre
Ringvorlesung
„Elektroimpulse &
Implantate“,
Wintersemester
2011/12*



der Gestaltung beteiligt. Bisher wurden fast 40 Gastwissenschaftler aus dem In- und Ausland eingeladen.

In jedem Semester wird ein zweitägiger Workshop durchgeführt, bei dem die Promovierenden über den Stand ihrer Arbeiten berichten. Die Resonanz von anderen Promovierenden und allen Betreuern befördert die Initiierung weiterer Zusammenarbeit und die Integration in das GRK und in das Betreuerteam. Daneben werden immer auch einige Workshops und Winterschulen veranstaltet, zu denen themenspezifisch Gastredner eingeladen werden, so ein „Atomic Force Workshop“, eine Winterschule zu den klinischen Applikationen der Implantate mit Hospitation im OP und Spezialsprechstunden und eine Winterschule „Computational Bio-Electromagnetism“. Die Pro-

movierenden werden auch bei der Pflege von Industriekontakten zu lokalen, regionalen und überregionalen Unternehmen sowie zu einigen regionalen Forschungsinstitutionen aktiv unterstützt.

Öffentlichkeitsarbeit

Öffentlichkeitswirksam war das gesamte GRK an mehreren größeren Veranstaltungen beteiligt bzw. hat die Veranstaltungen selbst durchgeführt, so etwa 2010 und 2011: Lange Nacht der Wissenschaften, 2011: Highlights der Physik und Wintersemester 2011/12: Interdisziplinäre Ringvorlesung in Zusammenarbeit mit dem IuK-Verbund „Elektroimpulse & Implantate“.

Die Doktorandinnen und Doktoranden

Im Mittelpunkt stehen natürlich die ca. 30 Kollegiatinnen und Kollegiaten, von denen 18 durch das GRK *welisa* und die übrigen durch andere Stipendien, Drittmittelprojekte der DFG, der EU, des BMBF, der Industrie oder auch über Haushaltsstellen der Universität finanziert sind. In den folgenden drei Artikeln werden diese selbst ihre Forschung in der Medizin, an den Experi-



*Doktorand
Tom Reimer,
Interdisziplinäre
Ringvorlesung
„Elektroimpulse &
Implantate“,
Wintersemester
2011/12*



vordere Reihe v.l.: Johannes Steffen, Azhar Syed, Kathrin Badstübner mit Sohn Franz, Ralf Warmuth, Dr. Eilhard Mix, Thomas Weihe, Prof. Dr. Ursula van Rienen, Revathi Appali mit Tochter Rasy; hintere Reihe v. l.: Tom Reimer, Claudia Matschegewski, Annekathrin Grünbaum, Christian Schmidt, Immo Weber, Prof. Dr. Ralf Salomon, Andreas Körtge, Matthias Nissen, Prof. Dr. Wolfram Mittelmeier, Petra Gefken, Prof. Dr. Jan Gimsa

menten und bei der Theorieentwicklung beschreiben.

Das GRK *welisa* freut sich, nicht nur Promovierende aus verschiedenen Fächern und Nationen unter einem Dach vereinen zu können, sondern auch erfreulich viele junge Frauen und junge Eltern unter den Promovierenden zu haben: Die derzeit in *welisa* Promovierenden kommen aus Deutschland, Mazedonien, Iran, China und Indien. Der Frauenanteil lag bisher für den MINT-Bereich (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft, Technik) erfreulich hoch, zwischen 39 % und 44 %. Die sechs jungen Mütter und zwei jungen Väter unter den Promovierenden haben insgesamt 13 kleine Kinder zwischen kurz vor der Geburt stehend und acht Jahren.

Sehr positiv wird die Familienregelung der DFG für Stipendiatinnen und Stipendiaten mit Kindern angesehen, wie die folgenden Zitate deutlich machen:

Tom Reimer, Doktorand in *welisa* seit dem 15. Oktober 2008, zwei Kinder: „Die Familienförderung der DFG hilft bei der Finanzierung der Betreuung meiner Kinder während der Arbeitszeit und schafft Freiräume für gemeinsame Aktivitäten mit der Familie.“

Revathi Appali, Doktorandin in *welisa* seit 15. März 2009, eine Tochter geboren am 15.10.2011: „Die Flexibilisierung der Arbeitszeit und die Finanzierung durch die DFG sind eine große Hilfe für mich. Ich bin der DFG dankbar für die Unterstützung meiner Arbeit und Familie.“

Annekathrin Grünbaum, Doktorandin in *welisa* seit 1. Mai 2009, zwei Söhne, eine Tochter, das vierte Kind wird im April 2012 erwartet: „Mit der Verlängerung der Stipendiumslaufzeit werden mir flexible Arbeitszeiten und somit mehr gemeinsame Zeit mit meiner Familie ermöglicht.“

Literatur:

- [1] Hippler, Horst (Hg.) (2011): Ingenieurpromotion – Stärken und Qualitätssicherung. Beiträge eines gemeinsamen Symposiums von acatech, TU9, ARGE TU/TH und 4ING. Serie acatech Diskussion, Springer. – Auch verfügbar unter: www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/acatech_diskutiert/acatech_DISKUSSION_Ingenieurpromotion_WEB.pdf

Implantate für die elektromagnetische Stimulation der Knochenregeneration

Philip Grunert, Yvonne Haba, Yukun Su, Robert Souffrant, Ulf Zimmermann, Rainer Bader, Eberhard Burkel, Wolfram Mittelmeier, Ursula van Rienen

Der Einsatz von Implantaten für therapeutische Zwecke gewinnt zunehmend an Bedeutung in der Medizin. Einsatzzweck, Implantationsort und Anwendungsdauer beeinflussen dabei die Biokompatibilität und somit die Langzeitfunktionalität des Implantats. Des Weiteren sind die chemischen und physikalischen Oberflächeneigenschaften des Implantats eine wesentliche Einflussgröße für die Biokompatibilität. Um ein frühzeitiges Implantatversagen zu vermeiden, müssen alle Implantate eine gute Verträglichkeit gegenüber dem umliegenden Gewebe aufweisen. Biokompatible Materialien rufen zwar keine Abwehrreaktionen im Körper hervor, führen allerdings auch nicht unweigerlich zur Integration in das Gewebe.

Implantate in der Orthopädischen Chirurgie dienen vor allem der Versorgung von Frakturen und Knochendefekten. Sie unterscheiden sich in temporäre und permanente Implantate. So werden beispielsweise Marknägel, Osteosyntheseplatten, Schrauben oder Fixateure temporär zur Versorgung unterschiedlicher Knochenbrüche (Frakturen) eingesetzt. Sie unterstützen den Knochen bei der Bruchheilung und werden meist nach der Genesung wieder aus dem Körper entfernt. Permanente Implantate verweilen dauerhaft im Körper des

Patienten. Sie kommen überall dort zum Einsatz, wo z. B. größere Gelenk- und Knochenschäden nur noch durch eine Endoprothese (künstlicher Gelenkersatz) versorgt werden können. Die häufigsten Indikationen sind Arthrose, Knocheninfekt oder -nekrose, aber auch bei Knochentumoren werden Implantate eingesetzt. Die moderne Orthopädische Chirurgie versorgt eine Vielzahl an geschädigten Gelenken, von Hüftgelenk über Knie-, Sprung- und Schultergelenk bis zu den Fingergelenken.

Im Hinblick auf die Reduzierung der aseptischen Lockerung sollten Dauerimplantate verschleiß- und korrosionsbeständig sein. Zu steife oder zu weiche Materialien können zu Unter- oder Über-

belastung des Knochenlagers (Stress-Shielding) führen. Um Stress-Shielding zu vermeiden, werden beispielsweise beim künstlichen Hüftgelenkersatz als Implantatmaterial für den Stiel und die Pfanne häufig Titanlegierungen eingesetzt. Durch hinreichende Festigkeit, vergleichsweise geringes Elastizitätsmodul (115 GPa), hohe Korrosionsbeständigkeit und sehr gute Biokompatibilität sind Titan-Legierungen wie TiAl6V4 oder TiAl6Nb7 besonders für dieses Einsatzgebiet geeignet. Um die eingesetzten Materialien biofunktional zu gestalten, werden ihre Oberflächen häufig modifiziert, z. B. durch mechanisches Bearbeiten wie Aufrauen oder Polieren, durch Beschichten oder durch spezielle Herstellungsverfahren.

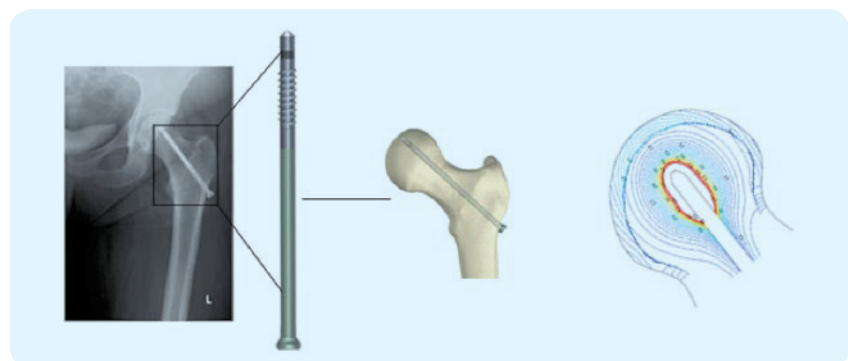


Abbildung 1: Implantat zur elektromagnetischen Stimulation in der Behandlung der aseptischen Hüftkopfnekrose mit einliegendem, elektrostimulierendem Implantat (links). Numerische Simulation mit Darstellung der elektrischen Feldverteilung im Hüftkopf (rechts).

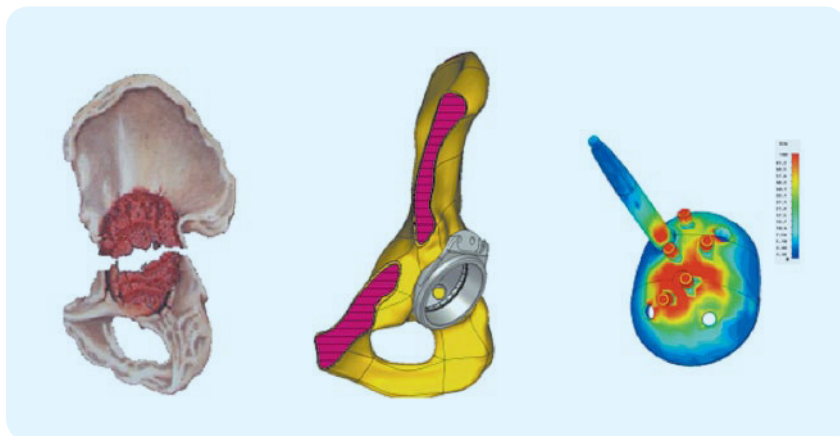


Abbildung 2: Implantat zur elektromagnetischen Stimulation (Mitte) in der Behandlung von Knochen-defekten (links) nach Lockerung der Primärpfanne. Numerische Simulation der elektrischen Feldverteilung an der Oberfläche der elektrodenbestückten Revisionspfanne (rechts)

Um das Einwachsen von permanenten Implantaten in den Knochen zu verbessern, müssen deren Oberflächen die Anhaftung (Adhäsion) sowie das Wachstum und die Vermehrung (Proliferation) von Knochenzellen (Osteoblasten) ebenso wie die mechanische Implantatverankerung im Knochenbereich unterstützen. Zur Stimulation der Implantat-Knochen-Verbindung können zusätzlich bioaktive Beschichtungen aufgebracht werden. Beispielsweise können Kalzium-Phosphat-Beschichtungen mit dem Mineral Hydroxylapatit zur Verbesserung der Verankerung (Fixation) durch Steigerung des Zellanzuwachses am Implantat und zur Regeneration des Knochens führen.

Bei Lockerungen von künstlichen Gelenken und in Folge von Frakturen, Infektionen, Tumoren und Nekrosen des Knochens können Knochendefekte entstehen. Die Behandlung zielt darauf ab, die Knochendefekte möglichst mit eigenem Knochen oder mittels Knochenersatzmaterialien auszufüllen und somit die Knochenregeneration zu ermöglichen. Dies kann durch die elektromagnetische Stimulation unterstützt werden. Die Elektrostimulation beruht dabei auf dem inversen piezoelektrischen Effekt, d. h. durch das Einwirken eines äußeren elektrischen Wechselfeldes kann eine

funktionelle Belastung des Knochens nachgeahmt werden. Daraus resultieren verschiedene Reaktionen des Knochengewebes auf zellulärer Ebene. In der klinischen Praxis wird heutzutage zum Beispiel die invasive elektromagnetische Stimulationstherapie eingesetzt. Dabei wird durch elektromagnetische Induktion von außen über eine implantierte Sekundärspule ein elektrisches Wirbelfeld als Stimulationsfeld auf den Knochen appliziert.

Unser Ziel ist es, bestehende Implantatsysteme in ihrer Wirksamkeit zu optimieren und neue elektromagnetische Stimulationssysteme für die patientenindividuelle Therapie von Knochendefekten zu entwickeln. Dazu werden mehrere Ansätze verfolgt. Osteostimulativ wirkende elektrische Implantate werden beispielsweise in die numerische Simulation integriert sowie die elektrischen Feldstärken und Stromdichten

im Knochenlager berechnet. In die Simulation fließen die mechanischen und elektrischen Materialparameter des Knochengewebes ein. Anhand von Patientendaten wird die Korrelation von Knochendichte und gewonnenen elektrischen bzw. mechanischen Materialparametern abgeleitet. Zudem werden in Zellversuchen mit humanen Osteoblasten die optimalen Stimulationsparameter evaluiert.

Messung der Knochendichte sowie der mechanischen und elektrischen Eigenschaften

Hier wurden verschiedene Verfahren zur Knochendichtemessung betrachtet: DXA (Dual Energy X-ray Absorptiometry), QCT (Quantitative Computer-Tomographie) und μ CT (Mikro-Computer-

	Vier-Punkt-Impedanz	Zwei-Punkt-Impedanz	Zwei-Punkt-Impedanz
	20 Hz bei 20 °C	20 Hz bei 20 °C	20 Hz bei 37 °C
Artikuläre Schicht	0,17 ± 0,06	–	–
Kortikale Schicht	0,07 ± 0,04	–	–
Spongiose Schicht	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,03	0,05 ± 0,03

Tabelle: Gemessene Leitfähigkeit σ' [S/m] (Mittelwerte ± Standardabweichungen), ermittelt am humanen Hüftkopf mittels Zwei-Punkt- und Vier-Punkt-Impedanzverfahren

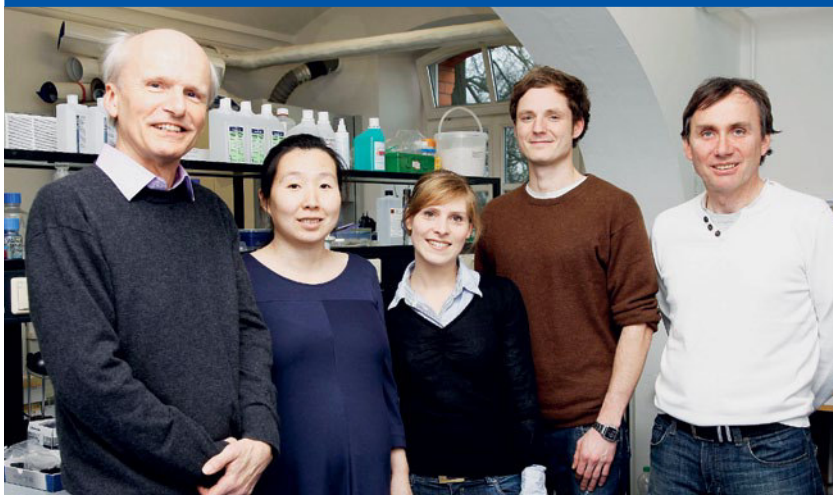
tomografie). Abschließend erfolgte die Ermittlung des Knochenmineralgehaltes durch Veraschung. Des Weiteren wurden im einachsigen Druckversuch an einer Universal-Prüfmaschine der Strukturmodul und die Bruchfestigkeit an den zylindrischen spongiösen (schwammartig porösen) Knochenproben aus dem humanen Hüftkopf ermittelt.

Eine Korrelation mit $R = 0,76$ ($p < 0,01$, $n = 22$) wurde zwischen dem Strukturmodul und der Knochendichte aus der Veraschung ermittelt. Die höchste lineare Korrelation wurde mit $R = 0,89$ ($p < 0,01$, $n = 22$) zwischen DXA und Veraschung gefunden. Eine Korrelation in Bezug zum Patientenalter konnte nicht ermittelt werden. Die Messung der elektrischen Materialparameter am humanen Hüftkopf beinhaltet die Zwei- und Vier-Punkt-Impedanzmessung. Es wurde die elektrische Impedanz bei einer Frequenz von 10 und 20 Hz im artikulären (knorpeligen) Areal sowie im kortikalen (äußeren Randbereich) und im spongiösen Bereich des Hüftkopfes gemessen und daraus die elektrische Leitfähigkeit ermittelt (siehe Tabelle).

Numerische Feldsimulation

Die elektrischen Materialparameter (elektrische und dielektrische Leitfähigkeit) des humanen Knochens werden zur numerischen Simulation herangezogen und daraus die elektrische Feldverteilung im Knochenmodell für patientenindividuelle Anpassungen berechnet. Ziel ist die Erstellung eines möglichst realitätsnahen Modells für die Analyse der magnetisch induzierten Elektrostimulation zur Knochenregeneration. Abbildungen 1 und 2 zeigen zwei Anwendungsbeispiele. ■

Die Autoren



v. l. n. r.: Prof. Dr. Eberhard Burkel, Yukun Su, Yvonne Haba, Philip Grunert, Prof. Dr. Rainer Bader

Stipendiaten und Kollegiaten von *welisa*

M.Sc. Yukun Su

Studium des Communication Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu, China, 1999 – 2003
Studium des Computational Engineering an der Universität Rostock von 2008 bis 2010
Promotionsthema: Electro-stimulating Implants for Bone Regeneration: Parameter Analysis and Design Optimization
Mail yukun.su@med.uni-rostock.de

Promotionsthema: Einfluss der Knochenstruktur auf die peri-implantäre elektrische Feldverteilung bei der elektrostimulativen Therapie der avaskulären Hüftkopfnekrose
Mail yvonne.haba@med.uni-rostock.de

Robert Souffrant

Studium der Biomedizinischen Technik an der Universität Rostock von 2000 bis 2004
Promotionsthema: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Primärstabilität von Revisionshüftendoprothesen im Femur
Mail robert.souffrant@med.uni-rostock.de

Ulf Zimmermann

Studium der Elektrotechnik an der Universität Rostock von 2003 bis 2010
Promotionsthema: Simulation und Optimierung elektrostimulativer Implantate für die Orthopädie
Mail ulf.zimmermann@uni-rostock.de

Philip Grunert

Studium der Humanmedizin an der Universität Rostock von 2005 bis 2011
Promotionsthema: Der Einfluss von elektromagnetischen Feldern auf humane Osteoblasten in-vitro
Mail philip.grunert@uni-rostock.de

Yvonne Haba

Studium der Elektrotechnik an der Universität Rostock 2005 bis 2008

Betreuer

Prof. Dr. med. Wolfram Mittelmeier
Medizinische Fakultät
Orthopädische Klinik und Poliklinik
Mail wolfram.mittelmeier@med.uni-rostock.de

Prof. Dr. rer. nat. Eberhard Burkel
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Physik Neuer Materialien
Mail eberhard.burkel@uni-rostock.de

Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Rainer Bader
Medizinische Fakultät
Orthopädische Klinik und Poliklinik
Mail rainer.bader@med.uni-rostock.de

Prof. Dr. rer. nat. Ursula van Rienen
Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik
Mail ursula.van-rienen@uni-rostock.de