

# **Intraoperative biomechanische Modellierung für die patientenindividuelle funktionelle Planung, Simulation und Umsetzung von Korrekturosteotomien**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen  
Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Peter Belei

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Burkhard Corves

Tag der mündlichen Prüfung: 29. August 2012



Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher

Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

**Peter Belei**

---

**Intraoperative biomechanische Modellierung  
für die patientenindividuelle funktionelle  
Planung, Simulation und Umsetzung von  
Korrekturosteotomien**

Ein Beitrag aus dem Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen  
(Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher).

---

**RWTHAACHEN**  
UNIVERSITY

---

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**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.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1517-1

ISSN 1866-5349

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **DANKSAGUNG**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Medizintechnik im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik der RWTH Aachen.

Im ganz besonderen Maße möchte ich dem Direktor des Lehrstuhls und meinem wissenschaftlichen Vater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Rademacher danken. Dabei gilt mein Dank der Betreuung der Arbeit und den zahlreichen stets konstruktiven fachlichen Diskussionen, die zur erfolgreichen Entstehung beigetragen haben. Darüber hinaus möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, in der von Ihm aufgebauten wissenschaftlichen und kreativen Umgebung, über den Tellerrand der Promotion hinausgeblickt haben zu dürfen, was ich als großen persönlichen Gewinn erachte.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Burkhard Corves dem Direktor des Institutes für Getriebetechnik und Maschinendynamik der RWTH Aachen für die Übernahme des Korreferats meiner Arbeit und für die stets freundliche und konstruktive Unterstützung danken.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Matias de la Fuente für seine große Unterstützungen in vielen technischen Fragen, für seine Hilfe bei der Durchführung von Studien, für die zahlreichen inspirierenden Diskussionen sowie für seine Freundschaft und die tolle gemeinsame Zeit danken.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Erik Schkommodau bedanken, der mir durch die Ausschreibung meines Diplomarbeitsthemas nicht nur das Themengebiet der chirurgischen Therapietechnik schmackhaft, aber auch durch seine engagierte Betreuung und Unterstützung mir ein faszinierendes Themengebiet der Ingenieurwissenschaften eröffnet hat. Zudem hat er durch sein eigenes Promotionsthema mir den Einstieg in die hier vorgelegte Arbeit erleichtert und wertvolle wissenschaftliche Grundsteine gelegt.

Weiterhin möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen sowie allen beteiligten Studierenden für die wertvolle Unterstützung während meiner Promotion danken. Insbesondere möchte ich mich bei Ceren Saglamer, M.Sc., Dipl.-Ing. Justus Kreuels, Dipl.-Math. (FH) Melanie Strake, Dipl.-Ing (FH) Arne Jansen-Troy, M.Sc. sowie dem gesamten Team „Modellbasierte Therapieplanung und Biomechanik“ für Ihre fachliche Unterstützung danken. Weiterhin danke ich Dipl.-Ing. Armin Janss, Dr.-Ing Axel Follmann, Dipl.-Ing. Victor Cesar Vargas da Silveira Cunha Cruz, M.Sc, Dr.-Ing.

Robert Elfring, Dipl.-Ing. Fabrice Chuembou Pekam, Dr.-Ing. Wolfgang Lauer und Dr.-Ing. Aleksandra Popovic für eine tolle gemeinsame Zeit und die vielfältige Unterstützung.

Desweiteren möchte ich mich bei den beteiligten klinischen Partnern unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof Dr. med Fritz Uwe Niethard, dem ehemaligen Direktor der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der RWTH Aachen, sowie unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof. Dr. med Dieter-Christian Wirtz, dem Direktor der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums Bonn danken. Besonders hervorheben möchte ich dabei die Unterstützung durch PD Dr. med. Torsten Mumme sowie PD Dr. med Marcus Müller, die die medizinische Perspektive in die Arbeit eingebracht sowie die gemeinsame Durchführung verschiedener Labor- und Anatomiestudien überhaupt erst ermöglicht haben.

Teile der Arbeit wurden im Rahmen des OrthoMIT Projektes durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wofür ich mich ebenfalls bedanken möchte.

Zuletzt gilt mein ganz besonderer Dank meiner gesamten Familie. Ich danke meiner Frau Nina für über ein Jahrzehnt der Gemeinsamkeit, Unterstützung und Freundschaft. Darüber hinaus Danke ich meinen Eltern Ana und Andrei und meinem verstorbenen Bruder Vlad für alles was sie mir ermöglicht und mir als Mensch auf den Weg gegeben haben. Ich weiß, dass ich immer auf Euch zählen konnte und weiterhin kann. Ihr werdet mir immer ein Vorbild sein und ich werde Euch stets in meinem Herzen tragen.

Meinem Bruder

Vlad





## ZUSAMMENFASSUNG

Die schmerzhafte Osteoarthritis bezeichnet die degenerative Gelenkerkrankung aufgrund unphysiologischer Belastungsbedingungen einzelner Gelenkstrukturen des menschlichen Körpers. Ursachen können unter anderem angeborene oder entwickelte (z. B. post-traumatischer) Knochendeformitäten an den unteren Extremitäten sein.

Konventionelle operative Therapiemaßnahmen bei kniegelenksnahen Deformitäten stellen je nach Alter, Aktivität oder anderer Indikatoren unter anderem der totale Kniegelenkersatz, der unikondyläre Gelenkersatz und Umstellungsosteotomien der unteren Extremitäten dar. Letztere gilt als schonende Alternative zu Gelenkersatzeingriffen, welche nachweislich die Notwendigkeit der endoprothetischen Gelenkversorgung potenziell um mehr als 10 Jahre hinauszögern und damit die Prognose für die Lebensqualität so behandelter Patienten deutlich verbessern kann. Dabei wird durch eine geometrische Korrektur deformierter Unter- oder Oberschenkelknochen die unphysiologischen Belastungen der Gelenkflächen des Kniegelenkes gezielt verändert.

Die computergestützte orthopädische Chirurgie konnte in den vergangenen Jahren nachweislich das Verfahren der Korrekturosteotomie zur Behandlung der Osteoarthritis am Kniegelenk, im Vergleich zu den sehr variablen Erfolgsraten beim konventionellen Vorgehen, verbessern. Jedoch berücksichtigen alle bisher vorgestellten chirurgischen Planungssysteme, genauso wie beim konventionellen Vorgehen, lediglich die knochengeometrische Problemstellung bei der Operationsplanung. Die biomechanische Planung erfolgt weiterhin auf Basis sehr einfacher biomechanischer Überlegungen unter nur qualitativer Berücksichtigung des aktiven und passiven Weichteilapparates sowie der Gelenkkette.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Methoden zur quantitativen biomechanischen Therapieplanung im klinischen Kontext am Beispiel gelenkerhaltender Korrekturosteotomien an den unteren Extremitäten entwickelt. Der dabei verfolgte Lösungsansatz ermöglicht die effiziente Akquisition und Verarbeitung individueller Patienteninformationen bezüglich Morphologie und Funktion. Ausgehend von diesen wurde ein geeignetes automatisch an die Patientenanatomie adaptierbares Mehrkörpersimulationsmodell (MKS) mit integrierten a priori Informationen entwickelt. Das auf Basis des MKS-Modells entwickelte chirurgische Planungs- und Navigationssystem, ermöglicht damit dem Chirurgen die patientenindividuelle intraoperative biomechanische Planung und Simulation von multiplanaren Korrekturosteotomien sowie basierend auf einem spezifisch angepassten Navigationsmodul deren präzise chirurgische Umsetzung.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MEDIZINISCHER HINTERGRUND</b> .....	<b>7</b>
2.1	FUNKTIONELLE ANATOMIE UND BIOMECHANIK DES Kniegelenks.....	7
2.2	KORREKTUROSTEOTOMIEN AN UNTEREN EXTREMITÄTEN .....	10
2.2.1	<i>Informationsakquisition</i> .....	10
2.2.2	<i>Operationsplanung und intraoperative Umsetzung</i> .....	13
<b>3</b>	<b>COMPUTERGESTÜTZTE CHIRURGIE</b> .....	<b>23</b>
3.1	INFORMATIONSAKQUISITION .....	23
3.1.1	<i>Knöcherner Geometrie</i> .....	23
3.1.2	<i>Gelenkkette</i> .....	26
3.1.3	<i>Weichteilapparat</i> .....	26
3.2	GEOMETRISCHE OPERATIONSPLANUNG.....	28
3.3	BIOMECHANISCHE OPERATIONSPLANUNG .....	30
3.3.1	<i>Hintergrund biomechanischen Mehrkörpersimulation (MKS)</i> .....	30
3.3.2	<i>Stand der Technik MKS-Systeme</i> .....	33
3.4	INTRAOPERATIVE UMSETZUNG .....	37
3.5	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	40
<b>4</b>	<b>ENTWICKLUNG DES LÖSUNGSANSATZES</b> .....	<b>43</b>
4.1	ENTWICKLUNG UND ANALYSE DES MKS-REFERENZMODELLS .....	43
4.1.1	<i>MKS-Referenzmodell</i> .....	43
4.1.2	<i>Entwicklung und Analyse Ein- und Zweibeinstand</i> .....	51
4.1.3	<i>Sensitivitätsanalyse der Modellierungsparameter</i> .....	61
4.2	MODUL ZUR BESTIMMUNG OPTIMALER KORREKTUROSTEOTOMIEN.....	72
4.2.1	<i>Schnittstellen des Optimierungsmoduls</i> .....	73
4.2.2	<i>Systemverhalten gegenüber veränderlichen Eingangsparameter</i> .....	75
4.3	LÖSUNGSANSATZ UND ANFORDERUNGEN .....	78
4.3.1	<i>Systemkomponenten des Lösungsansatzes</i> .....	79
4.3.2	<i>Informationsakquisition</i> .....	83
4.3.3	<i>Operationsplanung</i> .....	84
4.3.4	<i>Intraoperative Umsetzung</i> .....	84
<b>5</b>	<b>REALISIERUNG DES PLANUNGS- UND NAVIGATIONSSYSTEMS</b> .....	<b>87</b>
5.1	INFORMATIONSAKQUISITION .....	87
5.1.1	<i>Bestimmung der Beingeometrie</i> .....	88
5.1.2	<i>Muskelansatzapproximation</i> .....	97
5.2	OPERATIONSPLANUNG UND SIMULATION .....	101
5.2.1	<i>Patientenindividuelle Modellierung</i> .....	102
5.2.2	<i>Simulation der Korrekturosteotomien</i> .....	107
5.3	NAVIGIERTE UMSETZUNG .....	111
5.3.1	<i>6DOF-Methode Freihand</i> .....	113
5.3.2	<i>4DOF-Methode mechanisch</i> .....	115
<b>6</b>	<b>EVALUIERUNG DES PLANUNGS- UND NAVIGATIONSSYSTEMS</b> .....	<b>117</b>
6.1	INFORMATIONSAKQUISITION .....	117
6.1.1	<i>Bestimmung der Beingeometrie</i> .....	117
6.1.2	<i>Muskelansatzapproximation</i> .....	124

6.2	EVALUIERUNG DER MODELLIERUNG .....	127
6.2.1	<i>Validierung des OP-Planungsmodells</i> .....	127
6.2.2	<i>Biomechanische Simulationsergebnisse</i> .....	131
6.3	INTRAOPERATIVE UMSETZUNG .....	136
<b>7</b>	<b>DISKUSSION UND AUSBLICK</b> .....	<b>141</b>
<b>8</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>145</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>159</b>
9.1	BEGRIFFE UND ABKÜRZUNGEN .....	159