

**Entwicklung eines patienten-spezifisch adaptierbaren biomechanischen
Modells des Handgelenks zur computerunterstützten Therapieplanung in
der Handchirurgie**

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

vorgelegt von

Jörg Eschweiler

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Christof Hurschler

Tag der mündlichen Prüfung: 24. September 2015

Herausgeber:

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

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

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

Jörg Eschweiler

**Entwicklung eines patienten-spezifisch
adaptierbaren biomechanischen Modells
des Handgelenks zur computerunterstützten
Therapieplanung in der Handchirurgie**

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

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Shaker Verlag
Aachen 2016

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, 2015)

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4156-9

ISSN 1866-5349

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: 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.

In einem besonderen Maße möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher, Direktor des Lehrstuhls für Medizintechnik, danken. Mein Dank gilt der Betreuung dieser Arbeit seinerseits und den stets konstruktiven fachlichen Diskussionen, die zur erfolgreichen Entstehung meiner Arbeit beigetragen haben. Darüber hinaus möchte ich mich für die Möglichkeit bei ihm bedanken, die für unser Team „Biomechanische Modellierung und Simulation“ und für mich persönlich geschaffen wurden, um die Arbeiten unserer Gruppe zum Erfolg zu bringen.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Christof Hurschler, dem Leiter des Labors für Biomechanik und Biomaterialien der Hochschule Hannover, für die Übernahme des Korreferats bedanken.

Weiterhin möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Medizintechnik sowie allen beteiligten Studierenden für die wertvolle Unterstützung während meiner Promotion danken. Insbesondere bedanke ich mich beim Team „Biomechanische Modellierung und Simulation“, Dipl.-Ing. Ghaith Al Hares, Dipl.-Ing. Malte Asseln, Dipl.-Ing. Maximilian Fischer, Dipl.-Ing. Christoph Hänisch, Juliana Hsu, M.Sc. und Marc Verjans, M.Sc. für Ihre fachliche Unterstützung und die sehr gute Zusammenarbeit. Einen besonderen Dank gilt Dipl.-Ing. Ghaith Al Hares für die gemeinsame Bürozeit und stetige Diskussionsbereitschaft, Dipl.-Ing. Malte Asseln für die Unterstützung und kritische Durchsicht meiner Arbeit, Dipl.-Ing. Maximilian Fischer und Fabian Schick, B.Sc. für die konstruktive und fruchtbare Zusammenarbeit im Handprojekt.

Des Weiteren möchte ich mich bei den beteiligten klinischen Partnern danken. Besonders hervorheben möchte ich dabei die Unterstützung durch Herrn Dr. med. Jan-Philipp Stromps, der die medizinische Perspektive in die Arbeit eingebracht hat. Dank gilt Herrn Dr. med. Jan-Philipp Stromps für die gemeinsame Durchführung

verschiedener Labor- und Anatomiestudien und den konstruktiven fachlichen Austausch in unserem gemeinsamen Projekt.

Dank gilt Herrn Priv.-Doz. Dr. med, Björn Rath für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und die Bereitschaft zu einem jederzeitigen fachlichen und persönlichen Austausch.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Peter von Dierkes für die kritische Durchsicht und konstruktive Kritik meiner Arbeit.

Zuletzt gilt mein ganz besonderer Dank meiner gesamten Familie. Ich danke besonders meiner Frau Maria für die Gemeinsamkeit, Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis.

Zusammenfassung

Aus medizinischer Sichtweise stellt die Handwurzel das komplexeste Gelenksystem des menschlichen Bewegungsapparates dar. Die Vielzahl der auf engstem Raum interagierenden Strukturen, ihre wichtige funktionelle Bedeutung und die dadurch potentiell gegebene Verletzbarkeit, ebenso wie die Komplexität bei Rekonstruktionsinterventionen, erfordern eine in allen Teilschritten optimierte medizinische Versorgung.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines biomechanischen Mehr-Körper-Simulationsmodells, das zur Therapieplanung in der Handchirurgie eingesetzt werden kann. Derzeit existiert kein Modell, das die Biomechanik der Handwurzel umfassend berücksichtigt und patienten-spezifisch adaptierbar ist.

Daher wurde ein biomechanisches Handwurzelmodell in der Mehr-Körper-Simulationsumgebung AnyBody von Grund auf neu entwickelt. Für den Modellaufbau wurde auf Literaturdaten sowie insbesondere auf eigene Messdaten, die über Humanpräparatuntersuchungen erhalten wurden, zurückgegriffen.

Für die Durchführung dieser Experimente wurde ein Messplatz konzipiert, der es u.a. erlaubte, die Bewegung von 7 Handwurzelknochen gleichzeitig mit Hilfe eines elektromagnetischen Trackingsystems messtechnisch zu erfassen. Der Messaufbau unterschied sich zu bestehenden, in der Literatur beschriebenen Aufbauten in der Hinsicht, dass eine deutlich geringere Beeinflussung der Bewegung der untersuchten Knochen durch das Messsystem erzielt werden konnte. Es wurden zu diesem Zwecke Miniatursensoren direkt in den Knochen implantiert, um damit Bewegungsabläufe zu erfassen. Das experimentell detektierte Bewegungsausmaß für einzelne Knochen war tendenziell gleich, aber kleiner als in der Literatur beschrieben.

Das entwickelte Mehr-Körper-Simulationsmodell ermöglichte aktuell die Simulation von physiologischen und pathologischen Bewegungen. Um die Modellzuverlässigkeit zu gewährleisten, wurde das Modell mit Literaturdaten und den Messdaten der Humanpräparatuntersuchungen validiert. Die Simulationsergebnisse des Mehr-Körper-Simulationsmodell zeigten eine gute Übereinstimmung mit dem experimentell ermittelten physio- respektive pathologischen Bewegungsverhalten.

In weiterer Folge wurde das Mehr-Körper-Simulationsmodell mittels eines sogenannten Bonemorphing-Algorithmus patienten-spezifisch angepasst. Knorpelschichtdicken wurden durch Skalierung der Knochenoberflächen linear angepasst.

Die Belastung des proximalen Handgelenks konnte untersucht werden. Hierzu konnte einerseits die Höhe der Belastung berechnet werden und andererseits die Bereiche dargestellt werden, in denen die Belastung auftrat.

Es wurde ein handhabbares und anwendbares Mehr-Körper-Simulationsmodell entwickelt, das alle Anforderungen für eine Therapieplanung erfüllt.

Inhalt

1.	Einleitung.....	1
2.	Medizinischer Hintergrund	7
2.1.	Anatomie der Handwurzel.....	7
2.2.	Sozioökonomischer Hintergrund	15
2.3.	Klinisch-diagnostisches Vorgehen	18
3.	Stand der Technik und Ziele der Arbeit	21
3.1.	Modellansätze zur Biomechanik der Handwurzel	21
3.1.1.	<i>Generelle Modelle</i>	21
3.1.2.	<i>Ansätze von Computermodellen zur Therapieplanung</i>	30
3.1.3.	<i>Bewertung und Zusammenfassung</i>	33
3.2.	Ziele der Arbeit, offene Fragen und Hypothesen	38
4.	Voruntersuchungen	41
4.1.	Überprüfung bekannter/konventioneller Modelle anhand experimenteller in vivo Daten	41
4.1.1.	<i>Material und Methode</i>	42
4.1.1.1.	<i>Moore-Datenbank</i>	42
4.1.1.2.	<i>Methode der Screw Displacement Axis</i>	45
4.1.2.	<i>Ergebnisse</i>	46
4.1.3.	<i>Bewertung</i>	50
4.2.	Experimenteller Versuchsaufbau zur physiologischen und pathologischen Bewegung der Handwurzelknochen	52
4.2.1.	<i>Material und Methode</i>	55
4.2.2.	<i>Ergebnisse</i>	69
4.2.3.	<i>Bewertung und Schlussfolgerung</i>	75
4.3.	Workflow zur Modellentwicklung	79
4.4.	Biomechanische Modellbildung	81
4.4.1.	<i>Simulationsmethoden</i>	82
4.4.2.	<i>MKS-Software - Stand der Technik</i>	87
4.4.3.	<i>Zusammenfassung und Fazit</i>	93
4.5.	Patientenspezifische Adaption - Bonemorphing	95
5.	Konzeptentwicklung	99
5.1.	Klinische Pfade	99
5.2.	Datenakquise und Modellierungsmöglichkeit	102
5.2.1.	<i>Knöcherne Elemente</i>	102
5.2.2.	<i>Patientenspezifische Adaption – Genauigkeit des Morphings</i>	103
5.2.3.	<i>Simulation von Knorpel</i>	107
5.2.4.	<i>Gelenke</i>	107
5.2.5.	<i>Bänder</i>	108
5.2.6.	<i>Muskeln</i>	110
5.2.7.	<i>Kontaktkraft im proximalen Handgelenk</i>	112
6.	Modellentwicklung	115

6.1.	Implementierung	116
6.1.1.	<i>Morphologie</i>	116
6.1.2.	<i>Patientenspezifische Adaption</i>	116
6.1.3.	<i>Imitierung von Gelenkknorpel</i>	118
6.1.4.	<i>Kinematik</i>	119
6.2.	Bandstrukturen und Muskuläre Strukturen	119
6.2.1.	<i>Bandstrukturen</i>	119
6.2.2.	<i>Muskuläre Strukturen</i>	121
6.3.	Kontaktkraft im proximalen Handgelenk	125
7.	Modellevaluierung	129
7.1.	Modellkinematik	130
7.1.1.	<i>Bewegung der proximalen Reihen – Moore vs. Simulation</i>	130
7.1.2.	<i>Bewegung der proximalen Reihen – Humanpräparat vs. Simulation</i>	137
7.1.2.1.	<i>Gemittelte Abweichungen der proximalen Reihe während der FE und RUD – physiologisches Handgelenk</i>	144
7.1.2.2.	<i>Gemittelte Abweichungen der proximalen Reihe während der FE und RUD – pathologisches Handgelenk mit SLIL-Ruptur</i>	145
7.1.3.	<i>Untersuchung zum Einfluss des Umlenkens der Bänder</i>	147
7.1.4.	<i>Modellierung des Knorpels</i>	150
7.1.5.	<i>Simulation einer SL-Bandruptur</i>	156
7.2.	Kräfte in Bandstrukturen	159
7.2.1.	<i>Material und Methode</i>	159
7.2.2.	<i>Ergebnisse</i>	160
7.3.	Muskelkraft	164
7.3.1.	<i>Material und Methode</i>	164
7.3.2.	<i>Ergebnisse</i>	164
7.4.	Kontaktkraft im proximalen Handgelenk	166
7.4.1.	<i>Material und Methode</i>	166
7.4.2.	<i>Ergebnisse</i>	167
7.5.	Theoretische Implementierung in den klinischen Workflow	169
7.5.1.	<i>Material Methode</i>	169
7.5.2.	<i>Ergebnisse</i>	170
8.	Diskussion und Ausblick	171
8.1.	Diskussion der erzielten Ergebnisse	171
8.1.1.	<i>Evaluierung der Modellentwicklung</i>	171
8.1.1.1.	<i>Kinematik</i>	171
8.1.1.2.	<i>FDK-Funktionalität</i>	173
8.1.1.3.	<i>Kontaktkraft im proximalen Handgelenk</i>	173
8.1.1.4.	<i>Bandapparat</i>	174
8.1.1.5.	<i>Muskuläre Strukturen</i>	176
8.1.1.6.	<i>Fazit</i>	178
8.1.2.	<i>Patientenspezifische Anpassung</i>	179
8.1.3.	<i>Analyse von Verletzungsmechanismen</i>	179
8.1.4.	<i>Integration in den klinischen Workflow</i>	179
8.2.	Ausblick	180
	Abbildungsverzeichnis	185

Tabellenverzeichnis	192
Abkürzungsverzeichnis.....	194
Literaturverzeichnis.....	196
Anhang.....	211