

**10. Workshop
Automatisierungstechnische
Verfahren für die Medizin vom
29. bis 30. März 2012 in Aachen**



**„Funktions- und Steuerungsprinzip eines universellen HiL-
Simulators für Gelenkendoprothesen“**

Michael Kähler, Roman Rachholz, János Zierath, Christoph Woernle
Lehrstuhl für Technische Mechanik/Dynamik, Universität Rostock, Rostock, Deutschland
E-Mail: michael.kaehler@uni-rostock.de

Sven Herrmann, Robert Souffrant, Daniel Kluess, Rainer Bader
Forschungslabor für Biomechanik und Implantattechnologie, Orthopädischen Klinik und
Poliklinik, Rostock, Deutschland

Copyright: VDI Verlag GmbH
Band: Fortschritt-Bericht VDI Reihe 17 Nr. 286 „Automatisierungstechnische
Verfahren für die Medizin“
Editors: Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt, Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel, Prof. Dr.-
Ing. Klaus Radermacher, Christian Brendle, Henry Arenbeck, Kurt Gerlach-
Hahn, Kirska Dannenberg
ISBN: 978-3-18-328617-1
Pages: 9-10

Funktions- und Steuerungsprinzip eines universellen HiL-Simulators für Gelenkendoprothesen

Michael Kähler¹, Sven Herrmann², Roman Rachholz¹, Robert Souffrant²,
János Zierath¹, Daniel Kluess², Rainer Bader², Christoph Woernle¹

¹Lehrstuhl für Technische Mechanik/Dynamik, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Universität Rostock, Deutschland

²Forschungslabor für Biomechanik und Implantattechnologie (FORBIOMIT), Orthopädischen Klinik und Poliklinik, Universität Rostock, Deutschland

Kontakt: michael.kaehler@uni-rostock.de

Einleitung

Mit einer Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation kann das Verhalten einer realen Komponente in seiner virtuellen Umgebung simuliert werden [5]. Die Kopplung der virtuellen Umgebung mit der realen Komponente erfolgt über Sensoren und Aktuatoren (**Abb. 1**).

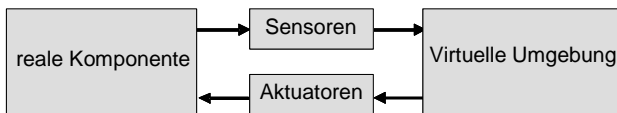


Abb. 1: Struktur einer Hardware-in-the-Loop-Simulation

Um das dynamische Verhalten von Gelenkendoprothesen, die z.B. als Ersatz natürlicher Hüft- oder Kniegelenke eingesetzt werden, unter physiologischen Bedingungen, d.h. unter reproduzierbaren Bewegungs- und Belastungssituationen zu simulieren, wurde ein universeller HiL-Simulator entwickelt.

Methoden und Materialien

Funktionales Prinzip des HiL-Simulators

Das funktionale Prinzip des HiL-Simulators wird am Beispiel der Simulation von Knieendoprothesen erläutert. Die Endoprothese als die reale Komponente der HiL-Simulation wird entsprechend **Abb. 1** mit einem biomechanischen Mehrkörpermodell der anatomischen Umgebung des Implantats gekoppelt. Als Aktuatorssystem kommt ein sechsachsiger Industrieroboter (Stäubli TX200) zum Einsatz, der die mechanischen Bewegungs- und Belastungsgrößen aus der Mehrkörpersimulation auf die Endoprothese überträgt. Die sich einstellenden Relativverschiebungen der korrespondierenden Endprothesenkomponenten sowie die Momente in den freien Richtungen des Gelenks werden mit Hilfe der Lagesensorik des Roboters und einem am Endeffektor angeordneten Kraft-/Momentensensor erfasst und in das Simulationsmodell zurückgeführt. Simulationsmodell und Roboter befinden sich über zwei zueinander komplementäre Regelschleifen in ständiger gegenseitiger Wechselwirkung. Für eine genauere Darstellung des funktionalen Konzepts wird auf [6], [7] und [4] verwiesen.

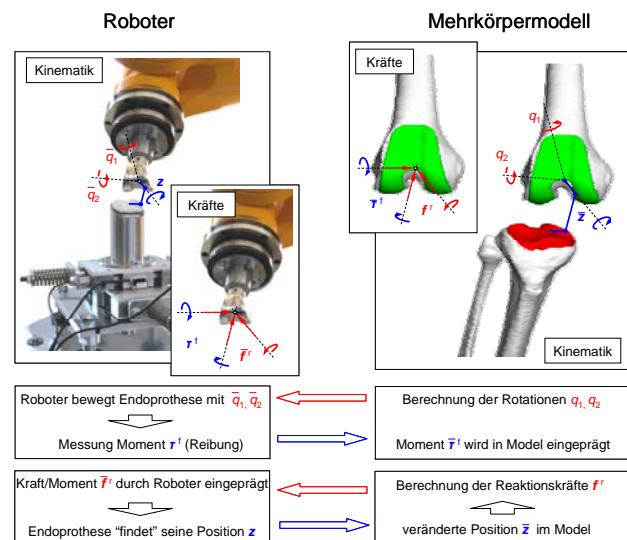


Abb. 2: Funktionsprinzip der HiL-Simulation von Knieendoprothesen

Steuerungssystem des HiL-Gelenksimulators

Das Mehrkörpermodell der anatomischen Umgebung der Endoprothese wird in der kommerziellen Mehrkörper Software SIMPACK[®] modelliert. Das Modell umfasst die wesentlichen Weichteilstrukturen, wie Muskel-, Bänder- und Kapsелеlemente, sowie die Geometrien des menschlichen Bewegungsapparates. Das Modell wird als echtzeitfähiger Standalone-Programmcode exportiert und mittels Interprocess Communication (IPC) mit dem Steuerungsprogramm verbunden (**Abb. 3**). Das Steuerungsprogramm ist die zentrale Steuereinheit des HiL-Gelenksimulators und steht in direkter Verbindung mit der Robotersteuerung. Mittels Transmission Control Protocol (TCP/IP) werden die Sollwerte an die Robotersteuerung gesendet und Messdaten der Robotersensorik empfangen.

Der Roboter verfügt über eine richtungsselektive Lage- und Kraftregelung, um die Endoprothese entsprechend dem vom Mehrkörpermodell berechneten Rotationen und Reaktionskräften sowie -momenten zu bewegen und zu belasten (**Abb. 2**). Der für die Kraftregelung benötigte Kraft-/Momentensensor kommuniziert mittels User Datagram Protocol (UDP) mit dem Steuerungsprogramm.

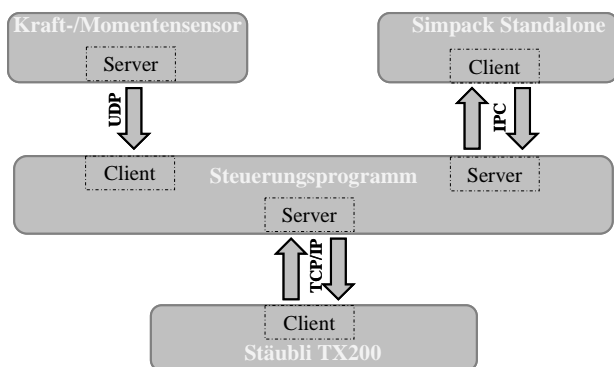


Abb. 3: Steuerungskonzept des HiL-Gelenksimulators

Ergebnisse

Der HiL-Gelenksimulator ermöglicht eine Vielzahl verschiedener Testszenarien, von welchen an dieser Stelle eins beispielhaft vorgestellt werden soll.

Die anatomische Umgebung der Endoprothese liegt als Mehrkörpermodell vor. Durch Veränderungen dieses Modells können u.a. Untersuchungen durchgeführt werden, mit welchen der Einfluss einzelner Strukturen des Weichteilgewebes auf die Stabilität der Endoprothese bestimmt werden kann. Im vorliegenden Fall wurde das Verhalten einer Knieendoprothese sowohl mit als auch ohne vorderes Kreuzband (ACL) ermittelt. Als Bewertungskriterium wurden die Verschiebungen anterior/posterior sowie medial/lateral verwendet. In Abb. 4 sind exemplarisch Messwerte aus den HiL-Simulationen dargestellt. Bei rezisiertem vorderem Kreuzband verschiebt sich das Gelenk bei einer Flexionsbewegung ausschließlich nach posterior, bei erhaltenem vorderem Kreuzband bis zum Flexionswinkel von 20° zunächst nach anterior, anschließend nach posterior. Dieses Verhalten wird durch Studien mit natürlichen Kniegelenken und schadhafem vorderem Kreuzband [3] und durch Studien von Kreuzband erhaltenden Knieendoprothesen [2] bestätigt.

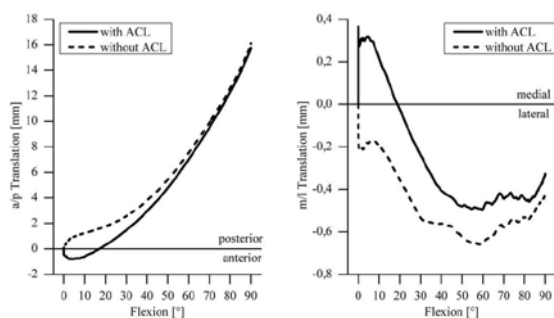


Abb. 4: Ergebnisse der HiL-Kniesimulation mit und ohne vorderes Kreuzband (ACL)

Diskussion und Schlussfolgerungen

Der vorgestellte HiL-Simulator ermöglicht die Analyse des dynamischen Verhaltens von realen Gelenkprothesen in ihrer virtuellen anatomischen Umgebung. Damit sind Untersuchungen möglich, die mit bisherigen Simulatoren nicht durchführbar waren [1]. Der HiL-

Gelenksimulator ist ein leistungsfähiges Werkzeug, um verschiedene Prothesensysteme unter reproduzierbaren Bedingungen vergleichend zu bewerten. Durch die Verwendung der realen Endoprothesen wird eine exakte Abbildung ihrer Eigenschaften gewährleistet.

Die Parametrierung des Mehrkörpermodells mit anatomischen Daten stellt eine besondere Schwierigkeit dar, begründet in der Individualität der Patienten und der beschränkten Datenbasis für derartige Modellierungen. Zukünftig sollen Validierungsstrategien weiterentwickelt werden, die insbesondere auf in-vivo Daten von instrumentierten Endoprothesen sowie auf Versuchen mit Humanpräparaten basieren.

Literatur

- [1] BADER, R. ; SCHOLZ, R. ; STEINHAUSER, E. ; BUSCH, R. ; MITTELMEIER, W.: Methode zur Evaluierung von Einflußfaktoren auf die Luxationsstabilität von künstlichen Hüftgelenken/Method for the Evaluation of Factors Influencing the Dislocation Stability of Total Hip Endoprotheses. In: *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering* 49 (2004), Nr. 5, S. 137–145
- [2] CATES, H.E. ; KOMISTEK, R.D. ; MAHFOUZ, M.R. ; SCHMIDT, M.A. ; ANDERLE, M.: In vivo comparison of knee kinematics for subjects having either a posterior stabilized or cruciate retaining high-flexion total knee arthroplasty. In: *The Journal of arthroplasty* 23 (2008), Nr. 7, S. 1057–1067
- [3] DEFRAITE, L.E. ; PAPANNAGARI, R. ; GILL, T.J. ; MOSES, J.M. ; PATHARE, N.P. ; LI, G.: The 6 Degrees of Freedom Kinematics of the Knee After Anterior Cruciate Ligament Deficiency. In: *The American Journal of Sports Medicine* 34 (2006), Nr. 8, S. 1240
- [4] HERRMANN, S. ; KAEHLER, M. ; SOUFFRANT, R. ; RACHHOLZ, R. ; ZIERATH, J. ; KLUSS, D. ; MITTELMEIER, W. ; WOERNLE, C. ; BADER, R.: HiL simulation in biomechanics: A new approach for testing total joint replacements. In: *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (2011)
- [5] ISERMANN, R.: *Mechatronic systems: fundamentals*. Springer-Verlag New York Inc, 2005
- [6] KÄHLER, M. ; WOERNLE, C. ; BADER, R.: Hardware-in-the-Loop Simulation of Constraint Elements in Mechanical Systems. In: *Computational Kinematics* (2009), S. 159–166
- [7] WOERNLE, C. ; KÄHLER, M. ; RACHHOLZ, R. ; HERRMANN, S. ; ZIERATH, J. ; SOUFFRANT, R. ; BADER, R.: Robot-Based HiL Test of Joint Endoprotheses. In: *Advances in Robot Kinematics: Motion in Man and Machine* (2010), S. 521–528

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (BA 3347/3-1/2 and WO 452/8-1/2) und dem Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur des Landes Mecklenburg-Vorpommern für die Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.