

Zusammenfassung der Dissertation

**Biomechanische Untersuchungen an
Knie-Endoprothesen mittels eines
Sechs-Freiheitsgrad-Gelenksimulators**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Eric Kleist

Das menschliche Kniegelenk zählt zu den am stärksten belasteten und gleichzeitig verletzungsempfindlichsten Gelenken des Körpers. Neben traumatischen Verletzungen tragen chronisch-degenerative Erkrankungen wie Osteoarthritis, insbesondere mit zunehmendem Alter, zu Gelenkschmerz und einer eingeschränkten Gelenkfunktionalität bei. Die Implantation von Knie-Endoprothesen hat sich seit über 50 Jahren als eine effektive Behandlungsmethode für diese Art von Erkrankungen etabliert. Im Jahr 2023 wurde dieser Eingriff in Deutschland ca. 230.000 durchgeführt und belegte damit Platz 8 der am häufigsten ausgeführten Operationen. In Zukunft ist ein weiterer Anstieg der durchgeführten Eingriffe zu erwarten.

Bei der Implantation von Total-Knieendoprothesen werden die pathologischen Knochenoberflächen, die Menisken und Teile des Bandapparats im Gelenk reseziert. Die Prothesenkomponenten werden anschließend am Knochen fixiert und ersetzen die artikulierenden Gelenkflächen. Eine korrekte Ausrichtung der Endoprothesen im Knochen während des chirurgischen Eingriffs hat maßgeblichen Einfluss auf einen langfristigen Behandlungserfolg. Fehlstellungen der Endoprothesen können postoperativ zu Instabilität oder Luxation im Gelenk, zu erhöhtem Abrieb der Kontaktflächen oder zu einer Lockerung der Prothesen im Knochen führen. Bei der Behandlung von Erkrankungen des Kniegelenks durch die Implantation von Knieendoprothesen sind weiterhin einzelne Aspekte, wie beispielsweise die Auswahl eines optimalen Prothesendesigns oder die ideale Positionierungsstrategie der Endoprothesen, umstritten. Diese Risiken und Unsicherheiten verdeutlichen, dass auch weiterhin Forschungsarbeit in der Entwicklung und postoperativen Bewertung von Knieendoprothesen erforderlich ist.

Für die Entwicklung und präklinische Erforschung von Knieendoprothesen sind Gelenksimulatoren ein zentrales Instrument. Durch diese können sowohl künstliche als auch native Gelenke unter möglichst physiologischen Bedingungen bewegt und belastet werden. Gelenksimulatoren ermöglichen die Simulation verschiedener dynamischer Lastfälle, z. B. die Durchführung von Abriebuntersuchungen oder die Bewertung des Einflusses einer gezielten Fehlstellung des Implantats auf die Gelenkdynamik.

Der kommerzielle AMTI VIVO™-Gelenksimulator kann Prothesenkomponenten mit einem relativen Freiheitsgrad von sechs bewegen und räumlich belasten. Weiterhin verfügt er über ein virtuelles Ligamentmodell, welches einzelne Bestandteile des Kapsel-Band-Apparats im Gelenk nachbildet, die nicht als physische Komponenten vorhanden sind.

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Möglichkeiten und Limitationen des VIVO-Gelenksimulators bei der experimentellen Untersuchung von Knie-Endoprothesen unter dem Einfluss virtueller Ligamente zu analysieren. Als sekundäre Zielsetzung sollten in diesem Zusammenhang exemplarische, klinisch relevante Untersuchungen an Knie-Endoprothesen durchgeführt werden, deren Ergebnisse als Ergänzung zur bestehenden Literatur herangezogen werden können.

Bei der Identifikation von Limitationen des Simulators wurde eine strukturelle Nachgiebigkeit der Manipulatoren festgestellt und für verschiedene Belastungsszenarien quantifiziert. Die Nachgiebigkeit führt unter Last zu einer fehlerhaften Interpretation des Abstandes zwischen den Prothesenkomponenten durch den Simulator, wodurch bei Verwendung des virtuellen Ligamentmodells auch die Kräfte der Ligamente zum Teil erheblich von ihren korrekten Werten abweichen können. Eine Vorspannung des experimentellen Aufbaus vor Versuchsbeginn stellte sich als geeignete Maßnahme heraus, um den Einfluss von struktureller Nachgiebigkeit auf experimentelle Ergebnisse zu minimieren. Weitere Limitationen des Gelenksimulators wie eine eingeschränkte Möglichkeit zur Einbindung von Muskelkräften und ein verringerter Bewegungsumfang in bestimmten Betriebsmodi verringern zwar die Vielfalt der durchführbaren Untersuchungen, beeinträchtigen jedoch nicht die Versuchsergebnisse.

Anschließend wurden experimentelle Versuche an einer das hintere Kreuzband erhaltenden Total-Knieendoprothese unter dem Einfluss virtueller Ligamentkräfte und ohne Patellakomponente durchgeführt. Hierfür musste zunächst eine Anpassung der Parameter des Ligamentmodells vorgenommen werden, da diese am VIVO-Simulator nicht vollständig frei wählbar sind. Außerdem wurde eine Methodik zur Vorbereitung der experimentellen Versuche entwickelt und beschrieben, die unter anderem die Integration der Endoprothesen in den Simulator und die Validierung ihrer Positionierung beinhaltet. Bei den anschließenden Versuchen wurde eine passive Flexionsbewegung des Kniegelenks von 0° bis 80° simuliert. Die kinematischen und dynamischen Resultate wurden mit den Simulationsergebnissen eines muskuloskelettalen Mehrkörpersystems verglichen, das als digitaler Zwilling des physischen Aufbaus das Kniegelenk identisch abbildet. Es konnte nachgewiesen werden, dass die strukturelle Nachgiebigkeit des Simulators die Ergebnisse für diesen Lastfall erheblich beeinflusst, und dass ihr Effekt durch Vorspannung des Versuchsaufbaus reduziert werden kann. Da der Einfluss struktureller Nachgiebigkeit mit der vorgestellten Methode nicht vollständig vermieden werden kann, treten vorrangig hinsichtlich der tibiofemorale Kontaktkräfte Abweichungen zwischen VIVO-Experiment und Mehrkörper-Simulation auf. Hiervon abgesehen konnten jedoch insbesondere für die tibiofemorale Kinematik gute Übereinstimmungen zwischen den Vergleichsmodellen erzielt werden. In einer anschließenden Untersuchung zur Resektion des virtuellen hinteren Kreuzbands wurde gezeigt, wie durch eine Anpassung der Parametrierung des Ligamentmodells eine klinisch relevante Fragestellung untersucht werden kann. Die erzielten Ergebnisse stimmen mit den Resultaten

vergleichbarer Studien aus der Literatur überein und bestätigen die Fähigkeit des VIVO-Simulators zur Untersuchung entsprechender Fragestellungen.

Zur Vorbereitung einer anschließenden Versuchsserie wurde der experimentelle Aufbau um eine Patellaprothese erweitert. Diese kann über einen nachgebildeten Quadricepsmuskel belastet werden. Mit diesem Versuchsaufbau wurde eine Studie zum Einfluss der Positionierung von Femur- und Tibiaimplantat im Knochen durchgeführt. Hierfür wurde eine Methode entwickelt, welche eine Verschiebung der Implantate indirekt durch Variierung der virtuellen Ligament-Ansatzpunkte ermöglicht. Dies stellt eine erhebliche Erleichterung gegenüber anderen in der Literatur beschriebenen Versuchsansätzen dar, bei denen häufig physische Komponenten zur Verschiebung der Implantate angepasst werden müssen. Die erzielten Ergebnisse zeigen Parallelen zu den Resultaten des muskuloskelettalen MKS und wurden durch Befunde aus der Literatur bestätigt. Die entwickelte Methodik ist somit für die simulierte Verschiebung von Implantaten im Knochen geeignet.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die definierten Primär- und Sekundärziele der Arbeit erreicht wurden. Limitationen des VIVO-Simulators bei der Durchführung experimenteller Versuche konnten ausgemacht, und Möglichkeiten zur Verringerung von deren Einfluss dargestellt werden. Es wurden Methoden zur Vorbereitung und Durchführung experimenteller Versuche an Knieendoprothesen entwickelt und beschrieben. Weiterhin konnten einzelne klinisch relevante Fragestellungen exemplarisch beantwortet und anhand von Literaturangaben validiert werden. Die Arbeit liefert somit einen Beitrag zu einem besseren Verständnis des VIVO-Gelenksimulators sowie der dynamischen Vorgänge in endoprothetisch versorgten Kniegelenken.