

**A three-dimensional model of skeletal muscle for
physiological, pathological and experimental
mechanical simulations**

Ein dreidimensionales Skelettmuskel-Modell für
physiologische, pathologische und experimentelle
mechanische Simulationen

ZUSAMMENFASSUNG ZUR DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

eingereicht an der
Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
Dipl.-Ing. MSc. Benjamin Winkel
(interner Doktorand)

Mentor: Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke

Weimar, 20.11.2019

Problemstellung und Zielsetzung

1. In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine Vielzahl verschiedener Konzepte und Modelle entwickelt, um muskuläre Mechanik im Kontext physiologischer und pathologischer Vorgänge zu verstehen, zu bewerten und vorhersagen zu können.
2. Aufgrund der enormen Anwendungsvielfalt - von Medizin, Forensik und Trainingswissenschaften bis hin zu Ergonomie, Produktdesign und CGI - sind diese Modelle größtenteils hochspezialisiert. Daten, die diese spezialisierten Modelle stützen, sind häufig nicht übertragbar.
3. Die Entwicklung eines universellen Modells, welches neurologische und biochemische Prozesse ebenso wie Texturen und mechanische Abläufe über mehrerer Skalen hinweg bis hin zu externen Kraft- und Bewegungsverläufe zu simulieren vermag, ist aus Effizienzgründen und vor dem Hintergrund der Diversität der Fragestellungen wenig zweckmäßig.
4. Die Erweiterung der Einsatzfähigkeit von Modellen über einzelne Spezialfelder hinaus ist vor dem Hintergrund möglicher Synergien in ihrer Anwendung und der Wiederverwertbarkeit experimenteller Ergebnisse dennoch unbedingt anzustreben.
5. Das Anliegen der vorgelegten Arbeit ist es, ein Modell zur Simulation aktiver Skelettmuskel zu entwickeln, welches die phänomenologischen Aspekte des Muskelverhaltens abdeckt und damit zur querschnittlichen Anwendung in mehreren Bereichen geeignet ist, in denen bislang spezialisierte, exklusive Modelle zum Einsatz kamen. Im Schwerpunkt soll dabei die Berücksichtigung der stimulationsabhängig variablen Muskeleigenschaften stehen.
6. Der Anwendungsbereich dieses Modells soll Untersuchungen der aktiven und passiven Bewegung umfassen, der strukturdynamischen Wechselwirkung von Muskeln untereinander und mit anderen physiologischen oder externen Elementen, aber auch Forschungsaspekte wie die Verifikation von in-vivo Experimenten oder Identifikation von Materialparametern.

Stand der Wissenschaft

7. Der überwiegende Teil aller dokumentierten Experimente und Modelle zu mechanischem Muskelverhalten reduziert die erfassten Parameter eindimensional entlang der Achse zwischen Muskelursprung und -ansatz.
8. Die für diese Modelle phänomenologisch relevanten Charakteristika von Muskeln sind umfassend erforscht und beschrieben. Die wesentlichsten veränderlichen Einflussgrößen in Bezug auf die Muskelkraft sind hierbei Stimulationsverlauf, Dehnung und Dehnrate.
9. Standards für die Parametrisierung der dreidimensionalen mechanischen Eigenschaften biologischer Gewebe sind gegenwärtig nicht etabliert. Insbesondere trifft dies auch auf die Parametrisierung von dreidimensionalem, anisotropen Muskelverhalten oder die Durchführung entsprechender Tests und Experimente zu.
10. Der gängige Ansatz zur dreidimensionalen Modellierung biologischer Gewebe basiert auf der verschiebungsbasierten Finite-Elemente-Methode (FEM) unter Verwendung isotroper

hyperelastischer Materialformulierungen. Unter Verwendung verschiedener erweiterter deformationsbeschreibender Invariantensätze wird dieser Ansatz auch zur Simulation anisotroper biologischer Gewebe genutzt.

11. Porenfreie biologische Gewebe mit sehr hohem Wasseranteil verhalten sich nahezu inkompressibel: Die sehr hohe Steifigkeit gegenüber Volumenänderungen steht vergleichsweise geringen Steifigkeiten bezüglich großer isochorer Deformationen gegenüber. In der FEM kann dieses Verhalten zu erheblichen numerischen Schwierigkeiten, dem sogenannten Volumetric Locking führen, dem durch spezielle Elementformulierungen begegnet werden muss.
12. Zur Berücksichtigung eines zeit- und dehnraten-abhängigen Verhaltens können hyperelastischen Materialformulierungen erweitert werden. Gegenüber der rein verschiebungsbasierten FEM ist für die hieraus resultierenden Gleichungssysteme eine Adaption der iterativen Lösungsalgorithmen erforderlich.

Eingesetzte Methoden

13. Das strukturmechanische Modell zur Muskelsimulation wurde innerhalb des Programmes `SI&Dg` entwickelt und fußt grundlegend auf der Finite-Elemente-Methode.
14. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit implementierten Elementformulierungen, welche speziell zur Berechnung quasi-inkompressibler Materialien mit großen Deformationen geeignet sind, können auf Ansätze wie Selective Reduced Integration, Enhanced Assumed/Natural Strain und Mean Dilatation zurückgeführt werden. Im vorliegenden Anwendungsfall überschneiden sich diese Methoden.
15. Die konkreten Implementierungen gestatten darüber hinaus die Berücksichtigung von Faser- bzw. Vorzugsrichtungen als kontinuierliche Vektorfelder, die sich über die elementspezifischen Interpolationsfunktionen aus diskreten Faserinformationen ableiten.
16. Die spezifische Beschreibung des Muskelverhaltens erfolgt auf Basis klassischer phänomenologischer Modelle zur Abbildung eindimensionalen Muskelverhaltens. Diese beschreiben unter anderem die interne Kinematik, visko-elastische Eigenschaften und Aktivierungsdynamik der Muskelfasern.
17. In funktionalen Details wurden diese Modelle durch neuere und zum Teil eigene Beiträge ergänzt, und in kontinuumsmechanische dehungs- und dehnratenabhängige Formulierungen transformiert.
18. Unter Zugrundelegung der Äquipresenzhypothese wurden diese in dreidimensionale, hyperelastische Materialmodelle eingebettet, die ihrerseits um dehnratenabhängige Anteile ergänzt wurden. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei auf die generalisierte Beschreibung und Erweiterungsfähigkeit der Implementation gelegt.
19. Die Grundlagen zur Nutzung verschiedener Invariantensätze wurden erarbeitet, um sowohl etablierte Materialbeschreibungen zu nutzen, als auch Experimente entwickeln zu können, mittels derer sich weiterführende Materialmodelle ableiten und validieren lassen.

Ergebnisse

20. In der vorgelegten Arbeit wurde ein Modell zur Simulation aktiver Skelettmuskel entwickelt, validiert und angewendet. Im einzelnen wurden geeignete Elementformulierungen, Materialbeschreibungen und Lösungsalgorithmen entwickelt und implementiert, die jeweiligen Schritte verschiedenen alternativen Ansätzen gegenübergestellt, im Kontext dargestellt und detailliert dokumentiert.
21. Die Arbeit umfasst mehrere Anwendungsbeispiele. Zur Validierung der Entwicklungs- und Implementierungsschritte wurde auf Basis eines etablierten eindimensionalen Modells die explosive Streckung des Greif-Tentakels eines Kalmars simuliert. Die Ergebnisse stimmen erwartungsgemäß mit den Referenzdaten überein.
22. Zur Verifikation und Anpassung experimentell ermittelter Materialparameter wurde die Kontraktion des Soleus-Muskels von Whistar-Ratten untersucht. Das Soleus-Modell wurde aus den spezifischen Geometrie- und Faserverlaufsdaten eines konkreten Exemplars entwickelt; die Simulationsergebnisse nach Kontraktion wurden mit den umfassenden Kraft-, Geometrie- und Faserverlaufsdaten desselben Exemplars verglichen. Auf Basis dieses Vergleichs, u.a. mittels Minimierung der Abweichungen in Querschnittsverläufen, wurde eine Optimierung der initial unabhängig gewählten Materialparameter durchgeführt.
23. Final wurde an einem um muskuläre Anteile erweiterten humanen Thorax-Modell ein Unfallszenario simuliert, um den Effekt der Muskelkontraktion auf die Eintretenswahrscheinlichkeit einer Rippenverletzung durch den Rückhaltegurt zu ermitteln. Diese Studie liefert die konkrete Prognose einer um 27% reduzierten Verletzungswahrscheinlichkeit bei vollständiger Kontraktion gegenüber dem relaxierten Zustand. Das Modell fußt auf den mit dem Soleus-Modell ermittelten Materialparametern, der Geometrie eines zuvor am ISM entwickelten Thorax-Modells, und auf anatomischen Informationen des VHP (Visible Human Project).
24. Neben den konkreten Resultaten liefern die beiden komplexen Anwendungsstudien auch Erkenntnisse zu potentiell weiteren Forschungsbedarf:
25. Im Rahmen der Soleus-Studie ist die Datenlage bezüglich geeigneter Materialparameter zur Beschreibungen passiver Skelettmuskel als verbesserungswürdig zutage getreten. In der wissenschaftlichen Literatur finden sich lediglich stichprobenartige Tests und Ergebnisse, die kein einheitliches Bild liefern. Die Etablierung eines standardisierten Testverfahrens, möglicherweise auf Basis eines der in dieser Arbeit genutzten Invariantensätze, wäre ein vielversprechender erster Schritt auf dem Weg zu einer stochastisch abgesicherten Materialbeschreibung.
26. Im Rahmen der Thorax-Studie wurden ausschließlich lokale Effekte und deren Auswirkung auf einzelne Rippen im Detail simuliert. Zur Beschreibung der Belastungssituation auf dieser Modellierungsebene mussten hingegen zahlreiche Annahmen getroffen werden. Für eine belastbare, realistischere Quantifizierung der lokalen Effekte in dem beschriebenen Unfallszenario müssten die Abhängigkeiten zwischen Muskelkontraktion und Effekten auf übergeordneter Ebene, z.B. Körperhaltung, -kinematik und Belastungsverlauf, ebenfalls berücksichtigt werden. Eine Automatisierung der Modellierung selbst stellt sich daher als wesentliche Anforderung zur umfassenden Nutzung des vorgestellten Modells dar.