

On the computational modelling of electro-active polymers:
electro-mechanics and thermo-electro-mechanics

Zur Computermodellierung elektro-aktiver Polymere:
Elektro-mechanik und Thermo-elektro-mechanik

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertation

von
M.Sc. Anas Kanan
geboren am 04. September 1992 in Medina

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Technische Universität Dresden
Prof. Dr. Luis Dorfmann
Tufts University
Assoc. Prof. Dr.-Ing. Hüsnü Dal
Middle East Technical University

Tag der Einreichung: 28. March 2022

Tag der Verteidigung: 23. June 2022

Summary

This thesis addresses the detailed treatment of anisotropic electro-mechanical and isotropic thermo-electro-mechanical material formulations, and their corresponding numerical frameworks, where the finite element method is exploited. Various material modelling methods are presented and numerically treated, where new computational approaches are proposed.

The present thesis considers the formulation of a comprehensive computational framework that expresses direction-dependent electro-viscoelastic interactions of a class of anisotropic materials, namely, transversely isotropic materials. The main mathematical modelling followed, relies on the decomposition of hyperelastic, viscous, electrical and electro-mechanical material descriptions, into isotropic and anisotropic contributions. Within the material formulation, the potential electric field-dependency of some mechanical properties is accounted for, in order to capture experimentally observed multi-physical phenomena. Furthermore, a mathematical expression of the anisotropic electrical and electro-mechanical behaviour is proposed. This expression relies on the storage of information regarding the directional dependency of the response, using anisotropic material tensors. Thus, an isotropic-anisotropic split of the associated electrical and electro-mechanical material descriptions is not required. Considering fiber reinforced electro-active materials, an electro-mechanical finite element formulation is consistently derived. The computational framework for anisotropic electro-active materials addresses the locking, which can arise due to the nearly incompressibility and nearly inextensibility of fiber reinforced materials.

The thesis at hand presents a constitutive model and a computational framework for the analysis of thermo-electro-mechanical coupling of electro-active materials. The formulation addresses the coupling between the mechanical, electrical and thermal fields, taking into account large deformations. The thermo-electro-mechanical constitutive equations are systematically obtained, where the status of the associated thermodynamical consistency is realized. Furthermore, a fully monolithic thermo-electro-mechanical finite element formulation is developed. The presented computational framework is suitable to simulate fully coupled thermo-electro-mechanical interactions, which can take place in quasi-incompressible materials. Stability check-criteria for materials undergoing thermo-electro-mechanical coupling are numerically formulated using a mixed monolithic-staggered finite element solution scheme.

Various structural configurations including fiber reinforced and heterogeneous filler reinforced electro-active materials are numerically simulated. A considerable portion of the electro-mechanical and thermo-electro-mechanical analysis results is obtained in light of experimental observations. It is referred to both coupled electro-mechanical and coupled thermo-electro-mechanical experiments. Furthermore, computational material stability analyses of several heterogeneous structural configurations are performed, using the proposed thermo-electro-mechanical finite element formulation. The structural response beyond the occurrence of material instability is simulated.

Zusammenfassung

Diese Dissertationsschrift befasst sich mit der ausführlichen Behandlung anisotroper elektro-mechanischer und isotroper thermo-elektro-mechanischer Materialformulierungen sowie deren entsprechende numerische Formulierungen, wobei die Finite-Elemente-Methode genutzt wird. Verschiedene Methoden der Materialmodellierung werden vorgestellt und numerisch umgesetzt, wobei neue rechnerische Ansätze vorgeschlagen werden.

Die vorliegende Dissertationsschrift befasst sich mit der Formulierung eines umfassenden Berechnungsansatzes, welcher richtungsabhängige elektro-visko-elastische Interaktionen einer Klasse anisotroper Materialien, der transversal isotroper Materialien, ausdrückt. Der primär verfolgte mathematische Modellierungsansatz beruht auf der Zerlegung hyperelastischer, viskoser, elektrischer und elektro-mechanischer Materialbeschreibungen in ihre jeweiligen isotropen und anisotropen Anteile. Innerhalb der Materialformulierung wird die potenzielle elektrische Feldabhängigkeit einiger mechanischer Eigenschaften berücksichtigt, um experimentell beobachtete multiphysikalische Phänomene zu erfassen. Weiterhin wird eine mathematische Formulierung des anisotropen elektrischen und elektro-mechanischen Verhaltens vorgeschlagen. Diese Formulierung basiert auf der Speicherung von Informationen bezüglich der Richtungsabhängigkeit der Antwort unter Verwendung anisotroper Materialtensoren. Somit ist eine Aufspaltung in isotrope und anisotrope Anteile der zugehörigen elektrischen und elektro-mechanischen Materialbeschreibungen nicht erforderlich. Eine elektro-mechanische Finite-Elemente-Formulierung wird unter Berücksichtigung faserverstärkter elektro-aktiver Materialien konsistent abgeleitet. Der Berechnungsansatz für anisotrope elektro-aktive Materialien befasst sich mit Locking, das aufgrund des nahezu inkompressiblen sowie nahezu dehnstarreren Verhaltens von faserverstärkten Materialien auftreten kann.

Die vorliegende Dissertationsschrift präsentiert ein konstitutives Modell und einen Berechnungsrahmen für die Analyse der thermo-elektro-mechanischen Kopplung von elektro-aktiven Materialien. Die Formulierung beschreibt die Kopplung zwischen den mechanischen, elektrischen und thermischen Feldern unter Berücksichtigung grosser Verformungen. Die thermo-elektro-mechanischen konstitutiven Gleichungen werden systematisch ermittelt, wobei die zugehörige thermodynamische Konsistenz gewährleistet wird. Darüber hinaus wird eine vollständig monolithische thermo-elektro-mechanische Finite-Elemente-Formulierung entwickelt. Der vorgestellte Rahmen eignet sich zur Simulation vollständig gekoppelter thermo-elektro-mechanischer Wechselwirkungen, welche in quasi-inkompressiblen Materialien auftreten können. Kriterien zur Stabilitätsprüfung für Materialien, die einer thermo-elektro-mechanischen Kopplung unterliegen, werden numerisch formuliert unter Verwendung eines gemischten monolithisch-gestaffelten Finite-Elemente-Lösungsverfahrens.

Verschiedene strukturelle Konfigurationen, einschliesslich faserverstärkter und heterogener füllstoffverstärkter elektro-aktiver Materialien, werden numerisch simuliert. Ein beträchtlicher Teil der elektro-mechanischen und thermo-elektro-mechanischen Analyseergebnisse wird auf Grundlage von experimenteller Beobachtungen erhalten. Dabei wird sowohl auf gekoppelte elektro-mechanische als auch auf gekoppelte thermo-elektro-mechanische Experimente verwiesen. Darüber hinaus werden rechnerische Materialstabilitätsanalysen mehrerer heterogener struktureller Konfigurationen unter Verwendung der vorgeschlagenen thermo-elektro-mechanischen Finite-Elemente-Formulierung durchgeführt. Die Strukturreaktion wird über das Auftreten von Materialinstabilität hinaus simuliert.