

**Thermo-mechanical modeling and
durability analysis of elastomer components
under dynamic loading**

**Thermo-mechanische Modellierung und
Haltbarkeitsanalyse elastomerer Bauteile
unter dynamischen Einwirkungen**

Von der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Ronny Behnke

geboren am 25. November 1984 in Burgstädt

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske, M. Sc.
Technische Universität Dresden

Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Carolin Birk
Universität Duisburg-Essen

Tag der Einreichung: 3. Juli 2015

Tag der Verteidigung: 30. November 2015

Abstract

The design of elastomer components comprises – besides others – innovation, durability and sustainability aspects. Critical loading conditions with respect to durability are ultimate mechanical and thermal loading in the short to mid term and cyclic loading causing fatigue in the long term. Consideration of multiphysics in experiments and numerical simulations helps to understand the interactions. The present work contributes to numerical finite element approaches for the analysis of the coupling between the displacement and temperature field. The present work is related to the further development of numerical simulation methods of geometrically as well as physically nonlinear modeling concepts applied to the material group of elastomers (rubber) at large strains and deformations. The developed models are based on the macroscopic scale. Models are accompanied by detailed parameter identification strategies to enable their direct application to large scale problems. Numerical simulation strategies for the thermo-mechanical analysis of 3D elastomer components under dynamic loading (short time, transient, steady state) are proposed in the form of three approaches: A) simultaneous solution scheme for short time loading and the study of a strong thermo-mechanical coupling, B) sequentially coupled thermo-mechanical simulation of steady state rolling axisymmetric elastomer structures (e.g. tires) and C) thermo-mechanical representation of crack propagation in plane elastomer specimens by a further developed scaled boundary finite element formulation for large strains and deformations. Durability is investigated with respect to the self-heating (internal heat build-up), crack propagation and the influences of thermal and dynamic excitation on crack propagation. The approaches and their implementation are validated based on experimental results for the material and structural scale. Benchmark analyses are provided with detailed information on input data and results to enable a comparison with other numerical methods. The numerical simulation concepts are applied to a variety of numerical examples to propose design improvements by parameter studies and to highlight the influence factors. For each approach, the numerical efficiency is discussed.

Kurzfassung

Der Entwurf von Elastomerkomponenten beinhaltet, unter anderem, Aspekte der Innovation, Haltbarkeit und Nachhaltigkeit. Kritische Belastungszustände hinsichtlich der Haltbarkeit sind die Grenzzustände mechanischer und thermischer Belastung im Kurzzeit- bis Langzeitbereiche sowie zyklische Belastung, die Ermüdung im Langzeitbereich verursacht. Die Betrachtung von multiphysikalischen Phänomenen in Experimenten und Simulationen hilft die Interaktionen zu verstehen. Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zu numerischen Finite-Elemente-Ansätzen zur Untersuchung der Kopplung zwischen Verschiebungs- und Temperaturfeld. Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf die Weiterentwicklung numerischer Simulationsmethoden hinsichtlich geometrisch wie auch physikalisch nichtlinearer Modellierungskonzepte, die auf die Materialgruppe der Elastomere (Gummi) unter Betrachtung großer Verzerrungen und Verformungen angewandt werden. Die entwickelten Modelle basieren auf Überlegungen und Beobachtungen hinsichtlich der makroskopischen Ebene. Für jedes Modell werden detaillierte Parameteridentifikationsstrategien vorgeschlagen, die eine direkte Anwendung für großmaßstäbliche Simulationsaufgaben ermöglichen. Numerische Simulationsstrategien für die thermo-mechanische Analyse von 3D Elastomerbauteilen unter dynamischer Belastung (Kurzzeit, transient, stationär) werden in Form von drei Ansätzen vorgeschlagen: A) simultanes Lösungsverfahren für Kurzzeitbelastungen und die Untersuchung einer starken thermo-mechanischen Kopplung, B) sequentielle thermo-mechanische Simulation von stationär rollenden axialsymmetrischen Elastomerstrukturen (z.B. Reifen) und C) thermo-mechanische Abbildung von Rissvorgängen in ebenen Elastomerprüfkörpern durch eine weiterentwickelte skalierte Randelementformulierung für große Verzerrungen und Deformationen. Haltbarkeit wird hinsichtlich der Eigenerwärmung (interne Erwärmung) und der Rissausbreitung unter Beachtung der Einflussfaktoren aus thermischer sowie dynamischer Beanspruchung untersucht. Die Ansätze und ihre Implementierung werden auf Material- und Strukturebene anhand von experimentellen Ergebnissen überprüft. Benchmark-Analysen werden mit detaillierten Informationen hinsichtlich der Eingangsdaten und Ergebnisse zur Verfügung gestellt, um einen Vergleich mit anderen numerischen Methoden zu ermöglichen. Die numerischen Simulationskonzepte werden auf eine Reihe von numerischen Beispielen angewandt, um Entwurfsverbesserungen durch Parameterstudien vorzuschlagen und Einflussfaktoren hervorzuheben. Die Diskussion der Ergebnisse schließt Aussagen zur numerischen Effizienz eines jeden Ansatzes ein.