



**MODELLIERUNG DER BIOMECHANIK VON  
ARTERIENWÄNDEN UNTER SUPRA-  
PHYSIOLOGISCHER BELASTUNG**

**MODELING THE BIOMECHANICS OF  
ARTERIAL WALLS UNDER SUPRA-  
PHYSIOLOGICAL LOADING**

Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden zur Erlangung  
des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

**DISSERTATION**

vorgelegt von:

Thomas Schmidt, M.Sc.

geboren am 8. August 1985 in Gießen

Tag der Einreichung: 12. Januar 2015

Tag der Verteidigung: 15. Juni 2015

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Daniel Balzani, Technische Universität Dresden

Univ.-Prof. Dr.techn. Gerhard A. Holzapfel, Technische Universität Graz

Institut für Mechanik und Flächentragwerke, Nürnberger Str. 31a, 01187 Dresden

## Abstract

This doctoral thesis deals with the description of the mechanical behavior of arterial walls under supra-physiological loading conditions. After a brief description of the continuum mechanical basis, the focus is first set to continuum damage mechanics (CDM) formulations for soft biological tissues. Thereby, different phenomenological damage equations are introduced yielding smooth and non-smooth material tangent moduli at the induction of initial damage, respectively. The performance of the latter formulations is investigated in numerical calculations of inhomogeneous boundary value problems. Afterwards, a micromechanically motivated damage approach for arterial tissues is derived in the CDM framework, taking into account statistically distributed microscopical parameters. The model response is adjusted to experimental data of human arteries and used in a numerical simulation of a simplified atherosclerotic artery model showing the applicability of the proposed formulation in a finite element framework. Moreover, a relaxed incremental variational formulation from the literature, which in contrast to the CDM formulations avoids a potential loss of convexity, is extended in this work to account for arterial tissues by the inclusion of fiber dispersion and hysteresis behavior. A framework denoted as 'Optimal Uncertainty Quantification' is utilized to compute bounds on the probability of failure in a simplified diseased artery model after several overexpansions. Therefore, a virtual experimental data set and two different rupture criteria are considered, which are based on fiber stretch and fiber damage, respectively.

## Zusammenfassung

Diese Dissertation behandelt die Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Arterienwänden unter supraphysiologischen Belastungszuständen. Nach einer kurzen Beschreibung der kontinuumsmechanischen Grundlagen, wird der Schwerpunkt zunächst auf Formulierungen im Rahmen der Kontinuumschädigungsmechanik (KSM) für biologische Weichgewebe gelegt. Dabei werden unterschiedliche phänomenologische Schädigungsfunktionen eingeführt, die zu stetigen bzw. unstetigen Tangentenmoduln bei Schädigungsinitiierung führen. Das Verhalten dieser Formulierungen wird in numerischen Berechnungen inhomogener Randwertprobleme untersucht. Danach wird ein mikromechanisch motivierter Schädigungsansatz im Rahmen der KSM unter Berücksichtigung statistisch verteilter mikroskopischer Parameter hergeleitet. Die Modellantwort wird an experimentelle Daten menschlicher Arterien angepasst und in einer numerischen Simulation eines vereinfachten atherosklerotischen Arterienmodells verwendet, wobei die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Formulierung im Rahmen der Finite-Elemente-Methode gezeigt wird. Zusätzlich wird eine inkrementelle Variationsformulierung für Schädigung aus der Literatur, die im Vergleich zu den KSM-Formulierungen einen möglichen Konvexitätsverlust vermeidet, durch Einbindung von Faserstreuung und Hystere-Verhalten für die Beschreibung arteriellen Gewebes erweitert. Im Rahmen einer Methode, die als 'Optimale Unsicherheitsquantifizierung' bezeichnet wird, werden Grenzwerte für die Versagenswahrscheinlichkeit an einem vereinfachten Modell einer erkrankten Arterie nach mehreren Überdehnungen berechnet. Dafür werden ein virtueller experimenteller Datensatz und zwei unterschiedliche Versagenskriterien berücksichtigt, die auf der Faserdehnung bzw. auf der Faserschädigung basieren.