

# Konstitutive Charakterisierung unvernetzter Elastomere

## Constitutive Characterisation of Uncrosslinked Elastomers

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

### Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christoph Zopf  
geboren am 23. Juli 1982 in Weimar

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske  
Technische Universität Dresden  
Prof. Dr.-Ing. habil. Jörn Ihlemann  
Technische Universität Chemnitz  
Prof. Dr. Yintao Wei  
Tsinghua University - Volksrepublik China

Tag der Einreichung: 15. Dezember 2016

Tag der Verteidigung: 02. Juni 2017

# Zusammenfassung

Elastomermischungen sind ein wichtiges Ausgangsmaterial bei der Herstellung technischer Produkte und alltäglicher Gebrauchsgegenstände. Im Herstellungsprozess wird das unvernetzte Elastomer zuerst unter hohem Druck in die gewünschte Form gebracht und anschließend geheizt. Im Heizprozess wird die Temperatur über einen von der Elastomermischung abhängigen Zeitraum so stark erhöht, dass die Moleküle der Elastomere miteinander vernetzen. Nach der Vernetzung hat das Elastomerprodukt seine gewünschten Eigenschaften. Der Herstellungsprozess erfolgt in einem geschlossenen System, das ein *Monitoring* fast unmöglich macht. Im Entwicklungsprozess neuer Elastomerprodukte ist ein *Monitoring* des Umformprozesses wichtig, um das Design zu optimieren. Alternativ ist es möglich, das *Monitoring* durch Finite-Elemente-Simulationen zu ersetzen und den Entwicklungsprozess numerisch zu optimieren.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die für eine Umformsimulation notwendige Materialcharakterisierung unvernetzter Elastomere herzuleiten, umzusetzen und anzuwenden. Dazu werden zunächst umfangreiche Materialversuche entwickelt, durchgeführt und ausgewertet, um die Werkstoffeigenschaften der unvernetzten Elastomere kennenzulernen. Anschließend werden die Eigenschaften der unvernetzten Elastomere mit geometrisch und physikalisch nichtlinearen Modellen abgebildet. Die Modellierung erfolgt zunächst mit einem generalisierten MAXWELL-Modell. Um die Modellierung signifikant zu verbessern, wird eine neuartige Materialcharakterisierung verwendet. Das entwickelte fraktionale ZENER-Modell wird vom Autor der vorliegenden Arbeit für große Verzerrungen eingeführt. Der genutzte klassische Lösungsalgorithmus zur Berechnung der fraktionalen Zeitableitung wird für geometrisch und physikalisch nichtlineare Materialmodelle erweitert. Zusätzlich kommt ein rekursiver Lösungsansatz zur Berechnung der fraktionalen Zeitableitung zum Einsatz. Dieser Lösungsansatz wurde bisher noch nicht für fraktionale Materialmodelle verwendet.

Als eine weitere zusätzliche und neuartige Möglichkeit zur Charakterisierung unvernetzter Elastomere soll ein modellfreier Ansatz eingeführt werden. In dieser Arbeit werden erstmals das *Micro-Sphere*-Modell mit einem rekurrenten neuronalen Netz gekoppelt. Diese Kopplung ermöglicht die Reduzierung der Komplexität des neuronalen Netzes, da dieses nur noch einen eindimensionalen Spannungszustand abbilden muss. Modellfreie Materialcharakterisierungen können, nach erfolgreicher Herleitung und programmiertechnischer Umsetzung, für eine Vielzahl von Materialien eingesetzt werden, was zu einer signifikanten Zeitersparnis bei der Charakterisierung von Materialien führt.

Nach einer erfolgreichen Anpassung der Materialcharakterisierungen an die Versuchsergebnisse und einer gelungenen Validierung können die Entwicklungen genutzt werden, um Umformsimulationen durchzuführen. Als Beispiel wird in der vorliegenden Arbeit der Einformprozess eines Lkw-Reifens numerisch abgebildet und die Ergebnisse mit Messwerten zufriedenstellend abgeglichen.

# Summary

Elastomer compounds are an important raw material in the production process of technical products and of every day's objects. In the manufacturing process, firstly the uncrosslinked elastomer is formed under high pressure into the desired shape and is heated afterwards. During the heating process, depending on the elastomer compound the temperature is increased until the molecules of the elastomers are crosslinked with one another. After crosslinkage, the elastomer product has its desired properties. The manufacturing process runs in a closed system which makes a monitoring almost impossible. Monitoring of the forming process is important for the development of new elastomer products and to optimize the design. Alternatively, the monitoring can be replaced by finite element simulations to optimize the forming process numerically.

The aim of the present thesis is the derivation, the implementation and the enforcement of a material characterization for uncrosslinked elastomers within a forming simulation. Therefore, the material tests have to be developed, conducted and evaluated to investigate the material properties. Subsequently, the properties of the uncrosslinked elastomers are described by geometrically and physically nonlinear models. Firstly, the modeling is conducted with a generalized MAXWELL model. To improve the modeling significantly, a novel material characterization is applied. The developed fractional ZENER model is introduced for finite deformations by the author. The considered classical algorithm for the computation of the fractional time derivative is extended for geometrical and physical nonlinear material models. In addition, a recursive approach for the computation of the fractional time derivative is used. This approach has not yet been applied for fractional material models.

The introduction of the model-free approach represents another additional and novel way to characterize uncrosslinked elastomers. In this thesis, the micro-sphere model is linked to a recurrent neural network for the first time. This approach reduces the complexity of the neural network, because it has to model only a one-dimensional state of stress. After successful derivation and programming, this model-free material characterization can be used for a multitude of materials which leads to significant time savings for the characterization process of materials.

After a successful adaptation of the material characterizations to the test results and a successful verification, the developed characterizations can be used for forming simulations. In the presented thesis, the in moulding of a truck tire is numerically modeled and the results are satisfactorily compared to the measured values.