

# Numerical modeling of tire manufacturing and high-speed rolling

## Numerische Modellierung der Reifenherstellung und des Hochgeschwindigkeitsrollens von Reifen

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

### Dissertation

von  
M.Eng. Sanghyeub Kim  
geboren am 28. January 1977 in Daejeon

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske  
Technische Universität Dresden  
Prof. Ph.D. Romesh C. Batra  
Virginia Polytechnic Institute and State University  
Prof. Dr.-Ing. Hüsnü Dal  
Middle East Technical University

Tag der Einreichung: 15. May 2023

Tag der Verteidigung: 29. August 2023

## Summary

Numerical modeling is a useful tool for providing knowledge about how tires are manufactured and operate. In tire industry, the finite element method is mainly introduced to solve the nonlinear behavior that tires encounter during each process. However, such nonlinearity is attributed to the shape, structure, and material of the tire. Therefore, applying a suitable numerical model is of paramount importance for accurate prediction and understanding. This study focuses on numerical modeling and investigation in relation to tire manufacturing and performance prediction.

The manufacturing field pays attention to describing the strong nonlinear characteristics seen in uncured materials. In case of uncured rubber, the strain rate dependent viscoelastic-viscoplastic behavior is first investigated through a series of tensile experiments. This behavior is described by a constitutive model based on the micro-sphere model. In particular, an additional internal variable is introduced to represent the nonlinear viscosity and the deformation mode change from strain hardening to strain softening with strain rate as shown in the experiments. The presented model is validated through the tire building and in-molding process. Then, a thermo-mechanical material model of rubber is presented to describe the vulcanization process of rubber. The uncured and cured branches are additively split, and the cured branch is multiplicatively decomposed into viscoelastic, viscous, and plastic parts for its activation by curing. In the viscous part, the phase transition is represented through the temporal evolution of the viscosity. Based on the thermodynamic consistency, an evolutionary equation with respect to the degree of cure is introduced for the plastic part. The proposed model is validated by in-molding tests of rubber blocks and extended to simulation of the tire curing process. In the case of textile cords, thermal shrinkage affecting the dimensional stability of tires is investigated experimentally and numerically. A temperature dependent shrinkage model based on the dissipation inequality is presented. In addition, an axisymmetric rebar modeling method within a thermo-mechanically coupled algorithm is presented. The predicted profiles with or without post-cure inflation are compared to the test results.

The field of performance is devoted to high-speed durability performance directly related to safety, that is, tire standing waves. The degradation in dynamic stiffness of rubber with increasing tire speed is described as a nonlinear viscoelastic damage model. Based on the dynamic explicit finite element analysis, the steady free-rolling state of the high-speed durability test is represented. To validate the proposed numerical modeling, the critical speed and position of the wave according to speed are qualitatively compared to the corresponding test. Furthermore, the origin of tire standing waves is investigated through numerical simulations. It is found that the phenomenon arises from the incompressibility of rubber and the structural properties of tires. In other words, standing waves occur if the Poisson effect is not suppressed by pneumatic effects. Additional evidence is provided by the results of cap ply design changes.

# Zusammenfassung

Die numerische Modellierung ist ein nützliches Werkzeug, um die Herstellung und den Einsatz von Reifen zu verstehen. In der Reifenindustrie wird die Finite-Elemente-Methode hauptsächlich verwendet, um das nichtlineare Verhalten des Reifens zu beschreiben. Die Nichtlinearität des Reifens ergibt sich aus dessen Form, Aufbau und Materialien. Daher ist ein geeignetes numerisches Modell für eine genaue Vorhersage und Verständnis von größter Bedeutung. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die numerische Modellierung der Reifenherstellung und den Einfluss auf die Rolleigenschaften.

Auf dem Gebiet der Fertigung liegt der Fokus darauf, die starken nichtlinearen Eigenschaften zu beschreiben, die in unvernetzten Materialien zu sehen sind. Bei unvulkanisiertem Gummi wird zunächst das dehnratenabhängige viskoelastische-viskoplastische Verhalten durch eine Reihe von Zugversuchen untersucht. Dieses Verhalten wird durch ein konstitutives Modell beschrieben, das auf dem Mikrosphärenmodell basiert. Dafür wird eine zusätzliche interne Variable eingeführt, um die nichtlineare Viskosität und die Änderung des Verformungsmodus von Dehnungsverfestigung zu Dehnungserweichung mit steigender Dehnrate darzustellen, wie in den Experimenten gezeigt. Das entwickelte Modell wird durch den Reifenbau- und Einformprozess validiert. Anschließend wird ein thermomechanisches Materialmodell für Gummi vorgestellt, um den Vulkanisationsprozess von Gummi zu beschreiben. Unvernetzte und vernetzte Anteile werden unabhängig voneinander betrachtet und ergeben addiert das Materialverhalten. Der vernetzte Anteil wird multiplikativ in viskoelastische, viskose und plastische Teile zerlegt. Im viskosen Teil wird der Phasenübergang mittels zeitlicher Änderung der Viskosität beschrieben. Für den plastischen Anteil wird eine thermodynamisch konsistente und vom Vernetzungsgrad abhängige Evolutionsgleichung eingeführt. Das vorgeschlagene Modell wird durch einen Einformversuch eines Gummiblocks validiert und auf die Simulation eines Reifen-Vulkanisationsprozesses angewendet. Das thermische Schrumpfverhalten von Textilcorden, das die Dimensionsstabilität des Reifens beeinflusst, wird experimentell und numerisch untersucht. Ein temperaturabhängiges Schwindungsmodell basierend auf der Dissipationsungleichung wird vorgestellt. Darüber hinaus wird eine Methode zur axialsymmetrischen Bewehrungsmodellierung innerhalb eines thermomechanisch gekoppelten Algorithmus eingeführt. Während des Auskühlvorgangs wird der Reifen mit einem Imendruck belastet. Die Reifenkontur wird mit Experimenten und einem unbelastet ausgekühlten Reifen verglichen.

Ein weiterer Teil der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich mit der Haltbarkeit von Reifen. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten treten stehende Wellen auf, die die Sicherheit gefährden. Die Verringerung der dynamischen Steifigkeit von Gummi mit zunehmender Reifengeschwindigkeit wird als nichtlineares viskoelastisches Schadensmodell beschrieben. Basierend auf der dynamischen expliziten Finite-Elemente-Analyse wird der stationäre freie Rollzustand des Haltbarkeitstests bei hohen Geschwindigkeiten dargestellt. Zur Validierung der vorgeschlagenen numerischen Modellierung werden die kritische Geschwindigkeit und die Position der Welle je nach Geschwindigkeit qualitativ mit dem entsprechenden Test verglichen. Weiterhin wird die Entstehung von stehenden Wellen im Reifen durch numerische Simulationen untersucht. Es wurde festgestellt, dass das Phänomen von der Inkompressibilität des Gummis und der Reifenstruktur herrührt. Mit anderen Worten, stehende Wellen treten auf, wenn der Poisson-Effekt nicht durch pneumatische Effekte unterdrückt wird. Zusätzliche Beweise werden durch die Ergebnisse mit einer veränderter Karkasse geliefert.