

# Multiscale Modeling of Friction and Wear for Rubber-like Materials

Multiskalenmodellierung von Reibung und Abrieb  
gummiartiger Materialien

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Felix Hartung**

Gutachter: **Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske**  
Technische Universität Dresden

**Dr.-Ing. Matthias Wangenheim**  
Leibniz Universität Hannover

**Prof. Dr. rer. nat. habil. Gert Heinrich**  
Technische Universität Dresden

Tag der Verteidigung: 8. Mai 2026

# Summary

Rubber friction and wear are bidirectionally coupled phenomena. The process of friction is the driving force behind the abrasion of rubber-like materials in contact with rough substrates. At the same time, surface wear influences the friction properties of rubber. While friction is composed of different contributions like adhesive, hysteresis, and viscous friction, wear mechanism are classified by their temporal and structural effects, for instance abrasive, corrosive, and fatigue wear.

In this thesis, rubber friction and wear are investigated numerically on different length scales and structural levels using the finite element method. Different one- and two-dimensional surface descriptions are introduced, like the height difference correlation and power spectrum density functions, to decompose the rubber's substrate surface into micro-, meso-, and macroscales. By conducting rubber block simulations on each scale, friction features are homogenized to generate scale-dependent friction laws. A multiscale framework is developed to consider normal and tangential adhesion on microscale and hysteresis friction during an upscaling procedure. The implementation is examined by various two- and three-dimensional numerical examples to illustrate its benefits and challenges with respect to prevailing analytical and numerical approaches. In cooperation with the Institute for Automotive Engineering at RWTH Aachen University, the multiscale rubber friction tool is validated by linear friction tests on sinusoidal 3D-printed surfaces under dry and wet conditions.

As stated in this work, frictional power correlates to the rate of rubber mass loss. However, wear mechanism and energy intensity levels of sliding rubber blocks and rolling rubber wheels or tires differ significantly. For this reason, a nonlinear wear energy evolution approach is developed to consider both deformation slip and sliding. Since the shape of the wearing body changes, it is necessary to update the spatial discretization, i.e. the finite element mesh, of the rubber component. A novel shape optimization algorithm is proposed to minimize the difference between the derived wear volume, which results from the wear model at the contact nodes, and the volume loss produced by moving boundary nodes to obtain the worn configuration of the discretized body. Different element quality metrics and mesh optimization techniques are incorporated into an innovative element re-meshing algorithm to ensure fully abrasion of two- and three-dimensional structures. The performance of the re-meshing algorithm is demonstrated using numerical studies with circumferentially symmetric and periodic tires. Together with the Institute for Dynamics and Vibration Research at Leibniz Universität Hannover and CEAT Tyres Ltd. (Mumbai, India), friction and abrasion tests on rubber block and wheel levels are evaluated to calibrate and validate the presented wear analysis framework.

# Zusammenfassung

Gummireibung und Abrieb sind bidirektional gekoppelte Phänomene. Der Reibprozess ist die treibende Kraft hinter dem Abrieb von gummiartigen Materialien, die mit einem rauen Untergrund in Kontakt kommen. Gleichzeitig beeinflusst der Oberflächenverschleiß die Reibeigenschaften von Gummi. Während Reibung aus verschiedenen Komponenten wie Adhäsions-, Hysteres- und viskoser Reibung besteht, werden Verschleißmechanismen nach ihren zeitlichen und strukturellen Auswirkungen klassifiziert, beispielsweise abrasiver, korrosiver und Ermüdungsverschleiß.

In dieser Arbeit werden die Reib- und Abriebseigenschaften von Gummimaterialien mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode auf verschiedenen Längenskalen und Strukturebenen numerisch untersucht. Verschiedene ein- und zweidimensionale Oberflächenbeschreibungen, wie die Höhenunterschiedskorrelation und die Leistungsspektrumdichtefunktion, ermöglichen die Zerlegung der Oberflächentextur des Gummiskontaktpartners in Mikro-, Meso- und Makroskalen. Auf den einzelnen Skalen werden Gummiblocksimulationen durchgeführt, um skalenabhängige Reibgesetze mittels Reibhomogenisierung zu formulieren. Der in dieser Arbeit entwickelte Multiskalenreibansatz berücksichtigt Adhäsion in normaler und tangentialer Kontakttrichtung auf der Mikroskala und die Hysteresereibung kumuliert auf den Meso- und Makroskalen. Die Implementierung wird anhand verschiedener zwei- und dreidimensionaler numerischer Beispiele untersucht, um die Vor- und Nachteile im Vergleich zu etablierten analytischen und numerischen Ansätzen zu erläutern. In Kooperation mit dem Institut für Kraftfahrzeugtechnik der RWTH Aachen wird der Multiskalen-Reibansatz durch Reibversuche mit sinusförmigen 3D-gedruckten Oberflächen unter trockenen und nassen Bedingungen validiert.

Die Reibleistung korreliert mit der Geschwindigkeit des Gummiabriebs, was in dieser Arbeit bestätigt werden kann. Gleichzeitig unterscheiden sich der Verschleißmechanismus und die Energieintensität von gleitenden Gummiblöcken und rollenden Gummirädern beziehungsweise Reifen signifikant. Aus diesem Grund wird ein nichtlinearer Ansatz der Abriebsenergieentwicklung vorgeschlagen, der sowohl den Formschlupf als auch das Gleiten berücksichtigt. Da sich die Form des verschleißenden Körpers verändert, muss die räumliche Diskretisierung und somit das Finite-Elemente-Netz des Gummibauteils angepasst werden. Ein innovativer Formoptimierungsalgorithmus wird hergeleitet, welcher die Differenz zwischen dem Abriebsvolumen, das sich über das Abriebsmodell an den Kontaktknoten berechnet, und dem Volumenverlust, der durch die Lageänderung der Randknoten entsteht, minimiert, um die neue Konfiguration des diskretisierten Körpers infolge des Abriebs zu erhalten. Verschiedene Elementqualitätsmetriken und Netzoptimierungstechniken werden in einen Algorithmus zur Neuvernetzung von Elementen integriert, so dass die vollständige Abrasion von zwei- und dreidimensionalen Strukturen simuliert werden kann. Das Potential des Formoptimierungs- sowie Neuvernetzungsalgorithmus wird anhand numerischer Studien mit in Umfangsrichtung achsensymmetrischen und periodischen Reifenmodellen aufgezeigt. Zusammen mit dem Institut für Dynamik und Schwingung der Leibniz Universität Hannover und CEAT Tyres Ltd. (Mumbai, Indien) werden Reib- und Abriebstests an Gummiblöcken und Gummirädern ausgewertet, um die Modellparameter zu kalibrieren und das Abriebsanalyseprogramm zu validieren.