

## Kurzfassung

Zunehmend strengere Regulierungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Neuwagen seitens der europäischen Union erfordern den Einsatz von Leichtbaukonzepten, welche für die Massenproduktion geeignet sind. Dies erfordert den Einsatz leistungsstarker und zugleich kostengünstiger Werkstoffe. Für den breiten Einsatz im Transportbereich werden daher vermehrt kurzglasfaserverstärkte Thermoplaste zur Substitution klassischer Metallkomponenten eingesetzt. Die geringen Werkstoffkosten, die stetig weiterentwickelten mechanischen Eigenschaften sowie die Möglichkeit zur Funktionsintegration aufgrund der hohen Formgebungsfreiheit des Spritzgussprozesses sind entscheidende Vorteile dieser Werkstoffgruppe. Der Spritzgussprozess führt zu einer lokal stark variierenden Faserorientierung. Die Werkstoffeigenschaften hängen dabei entscheidend von der Faserorientierung ab. Besitzt der Werkstoff parallel zur Faserrichtung seine höchste Steifig- und Festigkeit, sind diese quer zur Faserorientierung am niedrigsten. Zusätzlich besitzt die thermoplastische Matrix ein ausgeprägt nichtlineares Werkstoffverhalten, wodurch die strukturelle Berechnung kurzfaserverstärkter Bauteile deutlich erschwert wird. Eine geeignete Methodik zur Charakterisierung und numerischen Abbildung des nichtlinearen anisotropen Werkstoffverhaltens mit anschließender Lebensdaueranalyse ist zurzeit nicht vorhanden und bildet das Ziel dieser Arbeit.

Der untersuchte Werkstoff findet häufig Einsatz in strukturellen Komponenten im Fahrwerks- und Motorbereich. In diesen Einsatzgebieten ist er zusätzlich zu den mechanischen Lasten auch Umwelteinflüssen, wie beispielsweise Feuchtigkeit oder Steinschlägen, ausgesetzt. Im Rahmen der durchgeführten experimentellen Arbeiten wird der Einfluss dieser zusätzlichen einsatzbedingten Lasten auf die statischen Eigenschaften und das Lebensdauerverhalten untersucht. Ist ein Fahrwerksbauteil ganzjährig Wasser und Feuchtigkeit ausgesetzt, kann es in Winterzeiten auch zu Kontakt mit Tausalzlösungen kommen. In Auslagerungsversuchen über einen Zeitraum von etwa einem Jahr wird der Werkstoff folgenden Medien ausgesetzt: Wasser, wässrigem Natriumchlorid und wässrigem Calciumchlorid. Zu verschiedenen Expositionszeiten werden Proben entnommen und statischen Zugversuchen unterzogen. Die Auslagerung bewirkt eine deutliche Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften, welche jedoch durch eine Rücktrocknung im Vakuumofen wieder vollständig hergestellt werden kann.

Mithilfe eines speziell entwickelten Prüfstandes wird der Einfluss von Wasser und

Calciumchlorid auf das zyklische Werkstoffverhalten untersucht. Dieser Prüfstand erlaubt das Besprühen der Proben während eines Dauerschwingversuches. Eine Reduktion der Lebensdauer aufgrund einer Exposition mit Calciumchlorid kann nicht nachgewiesen werden. Zur Simulation von dauerhaften Mikro-Steinschlägen wird die Oberflächenrauheit von Probekörpern künstlich mittels Sandstrahlen erhöht. Sowohl in den statischen als auch zyklischen Versuchen unter Medieneinfluss kann nur eine geringe Festigkeitsreduktion ermittelt werden. Dies ist auf die Duktilität des Werkstoffes und der damit einhergehenden Unempfindlichkeit gegenüber Kerben zurückzuführen.

Moderne Prozesssimulationen können die Faserverteilung in Bauteilen komplexer Geometrie noch nicht realitätsnah abbilden, weshalb in dieser Arbeit die experimentelle Orientierungsanalyse im Mikro-Computertomographen verwendet wird. Neben Probekörpern wird auch eine komplette Fahrwerkskomponente im Mikro-Computertomographen analysiert. Die Orientierungsinformationen finden zur numerischen Beschreibung des Werkstoffverhaltens in der Finite-Elemente-Methode Verwendung. Eine vollständige statische Werkstoffcharakterisierung dient als Grundlage für die komplexe Werkstoffmodellierung. Zur Beschreibung des Lebensdauerhaltens werden umfangreiche Dauerschwing- und Restfestigkeitsversuche für unterschiedliche Faserorientierungen und Spannungsverhältnisse durchgeführt.

Selbstentwickelte Programmroutinen importieren den Faserorientierungstensor jedes FE-Elementes und definieren in Abhängigkeit der Faserrichtung sowie der Faseranteile in die jeweilige Richtung das Werkstoffmodell. Eine inkrementelle Lebensdaueranalyse greift ebenfalls auf selbstentwickelte Routinen zurück und berechnet die ertragbare Schwingspielzahl unter Berücksichtigung einer zyklischen Steifigkeitsdegradation hochbelasteter Elemente und damit einhergehenden Spannungsumlagerungen. Die Routine wird an den zyklisch geprüften Standard-Probekörpern kalibriert und an der bereits erwähnten Fahrwerkskomponente validiert. Für unterschiedliche Lastniveaus und Spannungsverhältnisse werden die Versuchsergebnisse sehr gut durch die entwickelte Berechnungsmethodik abgebildet. Sowohl die ertragbare Schwingspielzahl als auch das Schadensbild der Simulation stimmen mit den Versuchen überein.

## Abstract

Continuing regulations of the carbon dioxide emission for new cars on the part of the European Union require the use of high performance and economic materials which are suitable for mass production. For the use in the transport sector and the substitution of metallic components the application of short-glass-fiber reinforced thermoplastics is constantly increasing. The crucial benefits of these materials are the low costs, the steadily advancing material properties and the outstanding possibility of functional integration due to the design flexibility that comes with the injection molding process. The material properties depend on the fiber orientation, which can vary locally in a wide range due to the injection molding process. Additionally, the thermoplastic matrix material shows a distinct nonlinear material behavior which complicates the computation of short-fiber-reinforced thermoplastics. A suitable process chain for the material characterization and the numerical computation of the nonlinear anisotropic material behavior with a subsequent analysis of the fatigue life is currently missing and is the goal of this research work.

The investigated material is often used for structural components in the undercarriage or engine compartment of vehicles. Additional to the mechanical loads environmental influences act on the material, e.g. moisture or stone chips. The influence of these operational loads on the static material properties and the fatigue behavior is experimentally investigated. In the case of a chassis component that is exposed to water and moisture all year round, it can also come to a contact with de-icing salt solutions during winter. Therefore, exposure tests for about one year in water, aqueous sodium-chloride, and calcium-chloride are performed. At different exposure times static tensile tests are performed. The exposure leads to a significant degradation of the material properties, which can be fully recovered by a re-drying period in the vacuum furnace.

The influence of water and calcium-chloride on the fatigue behavior is investigated using an especially developed test rig. This test rig permits the spraying of the specimens with the afore-mentioned fluids and solutions during mechanical loading. Stress corrosion cracking effects can be determined by this test method. A fatigue life reduction due to the mechanical loading in calcium-chloride is not detected. To simulate the abrasive effect of small stone chips, the surfaces of the specimens are treated by sandblasting, which causes an increased surface roughness. Both in static and cyclic experiments under media influence only a slight strength reduction is

observed. The low degradation can be traced to the high ductility of the material, which makes it insensitive to notches.

Modern injection molding software cannot sufficiently calculate the fiber distribution and orientation in complex components. Therefore, the fiber orientation analyses realized in this work are experimentally using a micro computer tomography scanner. Besides standard test specimens an entire vehicle suspension component is scanned and the orientation data is used for the numerical simulation of the material behavior using the finite element method. A complete static material characterization is the basis for this complex material modeling. Extensive cyclic fatigue and residual strength tests for different fiber orientations and stress ratios are performed in order to identify the fatigue behavior of the material.

Self-developed program routines import the fiber orientation tensor for each FE-element and define the material model depending on the main fiber directions and the amount of fibers in these directions. An incremental lifetime analysis, using self-developed program routines as well, calculates the number of cycles to failure respecting the stiffness degradation of highly stressed elements and the accompanying stress redistributions. The analysis process is calibrated for fatigue tested standard specimens and validated for the afore-mentioned suspension component. For different load levels and stress ratios the approximations of the developed calculation method correspond very well with the experimental results. Both the number of cycles to failure and the damage pattern of the simulation are in accordance to the experiments.