

## Kurzfassung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe verfügen über eine hervorragende Leichtbaugüte und weisen unter zyklischer Beanspruchung ein gegenüber metallischen Werkstoffen günstigeres Schwingerermüdungsverhalten auf. Aus diesen Gründen erlangen derartige Konstruktionswerkstoffe zunehmend an Bedeutung für maschinenbauliche Anwendungen, bei denen die tragenden Strukturen zeitweise hohe Beschleunigungen erfahren und über die Einsatzdauer oftmals durch sich wiederholende Belastungsfolgen beansprucht werden. Innerhalb des Entwicklungsprozesses solcher Strukturen reicht eine globale strukturmechanische Auslegung meist nicht aus. Vielmehr müssen für das Erzielen einer optimierten und wirtschaftlichen Lösung strukturelle Details, wie insbesondere lokale Lasteinleitungen, sorgfältig betrachtet werden. Darüber hinaus ist die Kenntnis der voraussichtlichen Einsatzdauer (Lebensdauer) der Struktur inklusive der Anbindungspunkte sowohl aus Kostensicht als auch aus Sicherheitsaspekten erforderlich. Für den konstruierenden Ingenieur müssen daher robuste und zuverlässige Lasteinleitungslösungen entwickelt und aussagefähige Berechnungswerkzeuge zur Lebensdauervorhersage von Faser-Kunststoff-Verbunden bereitgestellt werden.

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wurden für Getriebekomponenten in Kohlenstofffaser-Verbund-Bauweise anforderungsgerechte Lösungen zur Einleitung hoher zyklischer Kräfte erarbeitet. Dabei wurden die Integration von Zylinderrollenlagern durch mechanisches Einpressen und das Tragverhalten von direkt in den Verbund eingeschraubten Gewindeeinsätzen untersucht. Zur Auslegung der Lagerfügung wurde ein analytisches Modell entwickelt, anhand dessen die erforderlichen Passungstoleranzen ermittelt und die daraus resultierende Fugenpressung abgeschätzt werden konnte. Weiterhin konnte mit Hilfe von Lichtmikroskopieuntersuchungen ein schädigungsfreies Fügen des Lagers nachgewiesen werden. Anhand quasi-statischer Auszugsversuche an repräsentativen Probekörpern mit eingeschraubten Gewindeeinsätzen wurde das charakteristische Tragverhalten der gewählten Verschraubung beschrieben. Durch Auszugsversuche nach zyklischer Vorbelastung konnte eine Resttragfähigkeit der Verbindung abgeschätzt werden, die im Betrag deutlich über der im Betrieb einzuleitenden Anbindungskraft liegt. Der abschließende Tragfähigkeitsnachweis der entwickelten Lasteinleitungslösungen erfolgte an Getrie-

bekomponenten mit mechanisch gefügten Lagern und eingeschraubten Gewindeeinsätzen in einem Technikumsprüfstand unter realen Betriebsbedingungen.

Den zweiten Schwerpunkt der Arbeit stellte die Erweiterung der Methodik zur rechnerischen Lebensdauervorhersage von Mehrschichtverbunden unter Schwingermüdungsbeanspruchung durch die Berücksichtigung werkstofflicher Nichtlinearitäten und Delaminationsschädigungen dar. Die Modellierung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens erfolgte dabei basierend auf einer experimentellen Charakterisierung eines zähmodifizierten Vinylester-Urethan-Hybrid-Harzsystems mit Kohlenstofffaserverstärkung. In der Modellierung wurde das nichtlineare Verhalten der für die Lebensdauerberechnung relevanten Werkstoffkenngrößen erfasst. Darüber hinaus wurde der Steifigkeitsabfall eines quasi-isotropen Laminats unter Einstufenbelastung experimentell bestimmt und anhand einer geeigneten mathematischen Formulierung beschrieben. Aufgrund von dabei beobachteten großflächigen und mitunter vollständigen Schichttrennungen wurde ein Ansatz zur mechanischen Beschreibung von Laminaten mit Delaminationsschädigungen auf Grundlage der Klassischen Laminattheorie entwickelt. Ein vorhandenes Lebensdaueranalyseprogramm auf dem Prinzip des „critical element“-Konzepts wurde um einen Berechnungskern zur schichtenweisen Versagensanalyse ergänzt. Die genannten Erweiterungen umfassten Module zur nichtlinearen Spannungsanalyse auf Basis der Sekanten-Moduliterationstechnik, zur Vorhersage von Zwischenfaserbruch-Versagen nach dem Wirkebenenkriterium von Puck und zur Degradation von Steifigkeitskomponenten nach dem Auftreten von Zwischenfaserbrüchen.

Anhand einfacher Berechnungsbeispiele wurde nachfolgend der Einfluss der werkstofflichen Nichtlinearitäten auf die rechnerische Lebensdauervorhersage untersucht. Abschließend erfolgte die Nachrechnung von Versuchsergebnissen am quasi-isotropen Laminat unter quasi-stochastischer Belastung (miniTWIST), wobei im Allgemeinen eine sehr gute Übereinstimmung der rechnerischen Vorhersage mit Versuchsergebnissen festgestellt wurde.

## **Abstract**

Due to excellent lightweight capabilities and a superior fatigue life behavior of carbon fiber reinforced polymers (CFRP), the importance of such kind of construction material increases for applications in the field of mechanical engineering. Within the development process of CFRP structures, which are subjected to high short term accelerations and periodic load configurations over service life, a global structural design is mostly insufficient. In addition, structural details such as load introduction points have to be accurately observed to achieve an optimized and economical design solution. Furthermore, the knowledge of the estimated duration of serviceability (fatigue life) of the structure, including the joining, is required for safety and cost-saving aspects. Therefore, robust and reliable load introduction solutions as well as suitable tools to predict fatigue life of fiber reinforced polymers have to be developed and provided to the design engineer.

In the first part of this thesis, the design of load introduction points was carried out to induce high cyclic loadings to thick-walled CFRP gear components. Thereby, the integration of cylindrical roller bearings via mechanical press fitting and the load carrying behavior of threaded inserts which were screwed directly in the composite laminate were investigated. For the dimensioning of the press fit, an analytical model was developed in order to determine the required fitting tolerances and the resulting stresses of the joint parts. Further on, a damage free joining of the roller bearing could have been verified using light microscopy investigation. The characteristic load carrying behavior of the proposed threaded joint was described by the results of quasi-static pull-out tests on representative CFRP specimens with integrated inserts. The residual joining strength was evaluated through quasi-static pull-out tests after cyclic preloading and the residual load carrying capacity could have been estimated for a serviceability of ten years which was considerably greater than the design load of the joining taken into account. Finally, the verification of the load carrying capacity of both load introduction solutions was performed at a special test facility, where CFRP components with press fitted roller bearings and screwed inserts were tested under realistic in-service conditions.

The second topical emphasis of the present thesis was focused on the enhancement of the methodology of fatigue life prediction of multi-axial FRP laminates subjected to cyclic loading in consideration of non-linearity of material.

The modeling of the non-linear material behavior was carried out on the basis of the experimental characterization of a toughened carbon fiber reinforced vinylester-urethan-hybrid-polymer matrix system. Within the model, the non-linear stress-strain-relations of fiber and matrix dominated material properties, which are significant for the fatigue life prediction, were included. Furthermore, the stiffness degradation of the quasi-isotropic CFRP laminate under cyclic loading at constant amplitude was experimentally determined and described by means of a suitable mathematical formulation. Due to the observation of extensive delamination and total ply separation during the fatigue tests, an empirical approach based on the classical laminate plate theory was developed to describe the structural effects (global stiffness reduction, internal stress relocation) due to delamination.

Additionally, the program architecture of an existing fatigue life prediction tool, which is based on the principles of the so called critical element concept, was extended by a calculation kernel to perform a layer-wise failure analysis of FRP. This extension was consisting of several units for the non-linear stress analysis using secant modulus iteration techniques and the prediction of inter-fiber fracture according to the physically based fracture plane criterion of Puck as well as the degradation of stiffness properties due to the occurrence of inter-fiber fracture.

By means of descriptive calculation examples, the influence of the non-linearity of material on the fatigue life prediction was investigated. Finally, the prediction of the fatigue life of the quasi-isotropic laminate under quasi-stochastic loading (miniTWIST) was carried out and compared to experimental results. It could have been shown that the computed results were in good conformance with experimental data using the developed non-linear material models.