

Kurzfassung

Faser-Kunststoff-Verbunde haben in vielen technischen Bereichen eine stetig wachsende Verbreitung erfahren. Diese rührt aus ihren vorteilhaften Eigenschaften hoher gewichtsspezifischer Festigkeit und Steifigkeit. Dadurch sind Gewichtsreduktion, erhöhte Nutzlast, sowie hohe Funktionsintegration in Kombination mit einer freien Formgebung und einer beanspruchungsgerechten Konstruktion möglich. Daneben weisen faserverstärkte Kunststoffe hohe Energieabsorption und herausragende Ermüdungseigenschaften auf. Zur quasi-statischen Bauteilauslegung existieren physikalisch basierte Bruchkriterien; Analysemodelle zur quantitativen Beschreibung des gesamten komplexen Ermüdungsversagens sind zurzeit noch Gegenstand der Forschung.

Werkstoffermüdung erfordert eine gesonderte Betrachtung bei der Auslegung und Konstruktion. Die am Institut für Verbundwerkstoffe vorhandenen Verfahren zur Berechnung der Ermüdung von Faserverbunden sind auf die Berechnung ebener Belastungen an geometrisch ebenen und dünnwandigen Bauteilen unter Verwendung linearer Werkstoffgesetze begrenzt. Der bei komplexen, dünnwandigen und gekrümmten dreidimensionalen Bauteilen unter schwingender Belastung vorliegende Spannungszustand erfordert zur realitätsnahen Abbildung den Einsatz nichtlinearer Werkstoffgesetze und geeigneter Versagensmodelle zur kontinuumsmechanischen Beschreibung der Schadensentwicklung, welche in die Finite-Elemente-Analyse zu integrieren sind.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung eines auf der Critical-Element-Methode basierenden Berechnungskonzepts für die Simulation der Ermüdung von Faser-Kunststoff-Verbunden von der für geometrisch einfache Strukturen einsetzbaren Klassischen Laminattheorie bis zum Einsatz in der Finite-Element-Methode bei komplexen Bauteilgeometrien. Dazu wurden geeignete nichtlineare Werkstoffgesetze und Versagensmodelle für das komplexe Versagensverhalten unter schwingender Belastung an einem mit Endloskohlenstofffaser verstärkten Werkstoff auf Einzelschichtebene experimentell bestimmt und ihr Einsatz in der entwickelten Finite-Elemente-Lebensdaueranalyse exemplarisch an einem Anwendungsbeispiel eines praktisch relevanten Bauelements validiert.

In quasi-statischen Zug- und Druckversuchen wurden die nichtlinearen

Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen des Werkstoffs an Flachprobekörpern ermittelt und mit der *Ramberg-Osgood*-Funktion beschrieben. Zur Ermittlung ermüdungsrelevanter Kennwerte wurden Restfestigkeitsuntersuchungen nach zyklischer Ermüdung, die Bestimmung des Steifigkeitsabfalls unter zyklischer Belastung und Einstufenversuche zur Beschreibung der Wöhlerlinie durchgeführt. Um die Messung des nichtlinearen Materialverhaltens im Versuch möglichst frei von Einflüssen der Prüfvorrichtung zu ermöglichen, wurde ein verbessertes Prüfverfahren für Zugschwell-, Druckschwell- und Zug-Druck-Wechselprüfungen an Flachproben erarbeitet.

Unter Nutzung der experimentell ermittelten Werkstoffgesetze zusammen mit geeigneten Versagenskriterien wurde ein Finite-Elemente-Lebensdaueranalyseprogramm entwickelt, das durch die Verwendung eigenständiger Programmroutinen eine für die praktikable Durchführbarkeit einer prognosefähigen Lebensdaueranalyse notwendige Rechenzeitverkürzung erreicht. Die entwickelte kontinuumsmechanische Versagensanalyse ermöglicht die präzise Analyse der Einzelschichtspannungen des Laminats infolge der äußeren Belastung in Kombination mit einer spannungsbasierten Anstrengungsanalyse zur Abbildung der ermüdungsbedingten Degradation der Werkstoffkennwerte bis hin zum Gesamtversagen. Die Berechnung des Degradationsfortschritts durch zyklische Belastung ist in guter Übereinstimmung mit dem in experimentellen Untersuchungen an quasi-isotropen Probekörpern beobachteten Versagensvorgängen. Dieser wurde versuchsbegleitend in zweidimensionalen Röntgenaufnahmen detektiert und durch dreidimensionale Computertomographie den Einzelschichten zugeordnet. Durch Nachrechnung experimenteller Untersuchungen an einem quasi-isotropen, mit Endloskohlenstofffaser verstärkten Bauelement mit Kreisausschnitt konnte die entwickelte Lebensdaueranalyse validiert und eine konservative Vorhersage der Versagensschwingspielzahl abgeschätzt werden. In Variationsanalysen wurde der Einfluss der nichtlinearen Werkstoffgesetze und eines Degradationsmodells auf die Lebensdaueranalyse untersucht.

Die Entwicklung der integrierten Finite-Elemente-Lebensdaueranalyse stellt einen deutlichen Fortschritt des Berechnungskonzeptes dar und ermöglicht einen Einblick in die komplexen Interaktionen aus Geometrie, Belastung, Degradationsmodellen und Schadensausbreitung bei Ermüdungsbelastung.

Abstract

Due to their advantages of high weight-specific strength and stiffness, fiber reinforced composite materials have increasingly been adapted within many technical areas. The advantages allow weight reduction, increased load capacity, high energy absorption and high functional integration whilst also permitting free shaping and a design adopted to mechanical stresses. Furthermore, fiber reinforced composites own outstanding fatigue resistance. Material fatigue requires special attention towards design and construction. For quasi-static design, physically based fracture criterias do already exist, whereas analysis models to quantify the complex fatigue failure process are still subject of intensive research.

Using simple linear material laws, existing analysis procedures are restricted to plain stress states in geometrically flat and thin walled structures. In order to model the damage evolution and the complex stress-state in thin-walled and curved three-dimensional fiber-reinforced structural components subjected to cyclical loading, finite element analysis using continuum-mechanical non-linear material laws and appropriate failure models are required.

Subject of this work is the continuing development of a cyclic fatigue analysis method based on the Critical Element Concept from the classical laminate theory, which is useful for elementary structures, to the finite element method. In order to describe the complex failure mechanisms under cyclic loading, non-linear material laws and failure models for a unidirectional carbon fiber reinforced plastics material were experimentally determined. Exemplarily, the suitability of the integrated finite element structural and fatigue analysis was validated on a relevant mechanical component.

Using quasi-static tensile and compression tests on flat specimens, the non-linear stress-strain-curves of the carbon fiber reinforced material were determined and modeled by using the *Ramberg-Osgood* material law. To determine characteristic material parameters for fatigue analysis, the residual strength after cyclic loading, stiffness degradation under cyclic loading, and the fatigue failure in Wöhler tests were determined.

To allow the determination of non-linear material laws independent of the influence of the testing equipment, an improved testing device for tension, com-

pression, and tension-compression tests of flat specimens was developed.

A finite element fatigue analysis program for the use of the experimentally determined material laws and failure criteria was developed. The use of stand-alone program routines leads to a reduction in computing time allowing a fatigue life simulation. The continuum mechanics failure analysis allows a precise analysis of the lamina stress state resulting from external loading, combined with a degradation analysis using stress-based degradation criteria, and, finally, the prediction of structural failure.

The analysis of the degradation development under cyclic loading was in good agreement with the failure development examined on quasi-isotropic specimens. X-Ray analysis was used to detect the failure development and computational tomography allowed to allocate the failure regions to the laminae which are the level of analysis in the finite element fatigue program. The simulation of experimental tests of a quasi-isotropic notched structure helped validating the developed fatigue analysis, showing a conservative life-time prediction. Variational analyses showed the effect of non-linear material laws and a degradation law.

The development of the integrated finite element structural and fatigue analysis is a significant progress of the analysis concept as it allows further insight into the complex interactions resulting from geometry, loading, degradation, and damage propagation.