

Kurzfassung

Faser-Kunststoff-Verbunde sind aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften und Formgebungsmöglichkeiten der Trendwerkstoff im Rahmenbau von Hochleistungs-Sportfahrrädern. Hierbei ermöglicht die zunehmende Berücksichtigung von Leichtbau-Technologien eine Erhöhung der Leistungs-Gewichts-Relation, um den stetig wachsenden Anforderungen an die Fahreigenschaften, die Haltbarkeit und das Gewicht gerecht zu werden.

Ein geschichtlicher Rückblick über die letzten Jahrzehnte im Fahrradrahmenbau zeigt eine deutliche Gewichtsreduktion bei steigender Funktionalität. Besonders der Einsatz neuartiger Werkstoffe ermöglichte immer wieder eine wesentliche Erhöhung der Leichtbaugüte. In den Anfängen begannen die Rahmenhersteller mit Gusseisen, anschließend wurde Stahl verwendet und schließlich Leichtmetalle, wie Aluminium. Die derzeit leichtesten Rahmen werden aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff gefertigt.

Die Anwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden ist deutlich komplexer und fordert eine integrierte Betrachtungsweise von den Werkstoffen über die Bauweise, der Fertigungstechnologie sowie der Bauteilprüfung. Die erzielbare Leistungsfähigkeit eines Hochleistungs-Rahmens wird hierbei wesentlich in der Konstruktions- und Dimensionierungsphase vorgegeben. Eine Übersicht über derzeitige Bauweisen und Fertigungstechnologien zeigt deren spezifische Eigenschaften.

Um in der Entwicklung eine möglichst gute Lösung innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters zu erreichen, können praktikable und effiziente Simulationswerkzeuge einen erheblichen Beitrag leisten. Hierzu wurde ein Werkzeug entwickelt, welches mit Hilfe eines Gradientenverfahrens an parametrischen Geometrie FE-Modellen zur Gestaltoptimierung und Optimierung der Laminatkonfiguration angewendet werden kann. Dieses ist auf in Differentialbauweise gefertigte Rahmen ausgerichtet und berücksichtigt in besonderem Maße die werkstoff- und fertigungsspezifischen Anforderungen von Faser-Kunststoff-Verbunden.

Zur Verbesserung der Festigkeitsvorhersage dient ein Modell zur vollständigen schichtenweisen Bruchanalyse, welches aus den Bausteinen Spannungsermittlung mit Berücksichtigung werkstofflicher Nichtlinearitäten, Festigkeitskriterium mit Unterscheidung der Bruchtypen Zwischenfaserbruch und Faserbruch sowie Steifigkeitsdegradation der Einzelschicht nach Eintritt von unkritischen Matrixbrüchen besteht. Das

Modell erlaubt die Vorhersage des gesamten Schädigungsprozesses unter quasi-statischer Belastung vom Erstsichtversagen bis hin zum Laminatversagen. Weiterhin wurde das Modell in ein kommerzielles FE-Programm implementiert und erlaubt die Analyse von komplex geformten Strukturen.

Unter Anwendung der Simulationswerkzeuge konnten drei Hochleistungs-Rahmen in Differentialbauweise entwickelt werden, die weltweit zu den leichtesten und steifsten gehören. Hierbei lieferte das Optimierungswerkzeug die Ausgangsgestalt sowie die in den Rohren notwendige Laminatkonfiguration zur Erreichung höchstmöglicher Steifigkeits-zu-Gewichtsverhältnisse. Aufbauend auf den Erkenntnissen erfolgte die detaillierte Rahmenkonstruktion. Kritische Bereiche am Rahmen konnten durch die abschließende Anwendung des Festigkeitsanalysewerkzeugs aufgedeckt und beseitigt werden. Es konnte eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Festigkeitsanalysewerkzeugs mit Prüfstandsversuchen gezeigt werden. Die erzielten herausragenden Fahreigenschaften und die Haltbarkeit der entwickelten Rahmen konnten sowohl auf Prüfständen als auch im Alltag bereits ausgiebig unter Beweis gestellt werden.

Der Einfluss von transversalen Stoßeinwirkungen auf Fahrradrahmen wurde an Sturzversuchen an kompletten Rennrädern sowie an repräsentativen Ober- und Unterrohren aus Aluminium und kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff untersucht und die auftretenden Schädigungen ermittelt. Hierbei zeigte sich, dass insbesondere an Rahmen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff nicht sichtbare Schäden bereits bei geringsten Stoßeinwirkungen auftreten, unabhängig vom verwendeten Fasertyp. Durchgeführte zyklische Prüfungen an vorgeschädigten Rennradrahmen unter geringer Stoßeinwirkung zeigten keinen messbaren Verlust an Steifigkeit oder Haltbarkeit der untersuchten Rahmen. Untersuchungen zum Einfluss des Fasertyps auf die Impakteigenschaften zeigten deutliche Unterschiede bei den aufgetretenen visuell erkennbaren Schäden.

Abstract

Fiber reinforced plastics are the trend material for high-performance bicycle frames. The technical reasons are primarily the excellent mechanical properties and the possibility to realize structures with complex shapes. The enhanced application of lightweight construction technologies allows an increase of the performance-to-weight ratio to achieve the continuous increasing requirements on riding characteristics, durability and lightweight.

A historical review over the last decades of frame building shows a significant weight reduction by increased functionality. Especially the employment of new materials often permitted a significant improvement in the lightweight performance. At the beginning, the frame manufacturing started with cast iron, followed from steel up to the light metals. Presently, the lightest frames are made of carbon fiber reinforced plastics. An overview over currently used metallic and non-metallic frame materials clarifies their mechanical properties and suitable fields of application.

The application of fiber reinforced plastics is more complex compared to metals and demands a very close interaction between all disciplines involved in the development process such as material science, design, manufacturing and testing. The achievable performance considerably depends on the selected design and the accuracy of dimensioning in the development period. A review of existing design practices and corresponding manufacturing technologies explains their specific attributes.

Practicable and efficient simulation programs contribute to find a reliable solution in the product development within a given time frame. A developed tool based on parametric geometry FE-models allows the optimization of the frame shape as well as the laminate configuration in each frame tube. The tool assumes frames in a differential design and considers especially the material and manufacturing requirements of fiber reinforced plastics.

Furthermore, a strength simulation tool for anisotropic multi-axial and multiply layered laminates was developed which allows a lamina-by-lamina fracture analysis. The tool consists of three modules: i.e. the determination of stress distribution considering material non-linearities, strength criteria allowing a differentiation of inter-fiber failure and fiber failure as well as a degradation model characterizing matrix cracking compatible with the damage conditions. The tool predicts the complete damage process

from the first ply failure to the last ply failure of a laminate under static load. In addition, the tool is implemented in a FE-code allowing the analysis of complex formed structures.

Utilizing the simulation tools, three high-performance bicycle frames in differential design were developed which belong to the lightest and stiffest worldwide. The optimization tool provided the basic shape and laminate configuration in each tube to achieve the maximal stiffness-to-weight ratio. The detailed frame designs are based on the determined basic shapes. Highly stressed spots including the kind of lamina failure were detected with the strength simulation tool and adequate solutions were developed. A comparison between the strength prediction and the experiment under frontal load showed a good agreement. Meanwhile, the excellent riding performance and durability was proven on several test rigs as well as in extensive practical riding tests.

The influence of transverse impact loads on lightweight bicycle frames made of aluminum and carbon fiber reinforced plastics was shown in falling tests of complete road bikes and on adequate tubular substructures. Visually not observable damages occurred by small impact loads, independent from the carbon fiber used. Examinations under fatigue load yield in the result that visually not observable damages had none measurable influence on the stiffness and fatigue behavior on the investigated frames. Whereas the fiber type, intermediate-modulus and high modulus fibers, influences considerably the initial observable damages.