

Kurzfassung

Ein Beitrag zur strukturmechanischen Optimierung realer Bauteile in metallischer und Faserverbundbauweise unter Verwendung von wirkebenenbasierten Bruchkriterien

In dieser Arbeit wird zunächst ein mathematischer Einblick in die Theorie klassischer Optimierungsalgorithmen gegeben. Durch die Kombination von Optimierungsalgorithmen mit der Finite-Elemente-Methode gelangt man zu sogenannten Strukturoptimierungsverfahren, welche anschließend ausführlich erläutert werden, wobei auch auf Besonderheiten der verschiedenen Verfahren, von denen die optimalitätskriterienbasierten Methoden nicht auf klassische sensitivitätsbasierte Optimierungsalgorithmen angewiesen sind, eingegangen wird.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Strukturoptimierungsverfahren werden anhand von akademischen und praktischen Beispielen aufgezeigt. Hierbei werden optimalitätskriterien- und sensitivitätsbasierte Algorithmen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass sensitivitätsbasierte Verfahren ein breiteres Anwendungsspektrum bieten und in der Regel zu besseren Ergebnissen führen, obwohl sie nach gegenwärtigem Entwicklungsstand auf lineare Problemstellungen beschränkt sind. Nichtsdestotrotz bieten optimalitätskriterienbasierte Verfahren den Vorteil der einfachen Integrierbarkeit in bestehende Finite-Elemente-Systeme und führen für bestimmte Spezialprobleme auf effiziente Weise zu sehr guten Lösungen. Dies wird mit Hilfe eines selbstentwickelten und implementierten optimalitätskriterienbasierten Topologieoptimierungsalgorithmus gezeigt, welcher für einige Testprobleme im Vergleich zu kommerzieller Software außerordentlich gute Ergebnisse erzielt.

Weiteres Optimierungspotential für mechanische Strukturen erschließt sich bei Nutzung von Materialien mit orthotropen Steifigkeitseigenschaften, wie sie beispielsweise Faser-Kunststoff-Verbunde aufweisen. Im zweiten Teil dieser Arbeit wird daher auf die Besonderheiten und mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe detailliert eingegangen. Insbesondere der Versagensvorhersage wird große Aufmerksamkeit gewidmet, wobei hier der Fokus auf wirkebenenbasierten Bruchkriterien liegt, von denen das Bruchkriterium nach Puck und das LaRC04-Bruchkriterium intensiv behandelt und schließlich beide Kriterien zusammen mit dem Pauschalbruchkriterium nach Hill anhand ihrer Bruchkurven für ein ausgewähltes Material verglichen werden.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird gezeigt, auf welche Weise durch eine Verwendung realistischer Bruchkriterien, wie sie die wirkebenenbasierten Kriterien darstellen, in Verbindung mit Optimierungsverfahren für Materialparameter von Faser-Kunststoff-Verbunden zusätzliches Leichtbaupotential in Strukturbereichen mit weitestgehend ebenen Spannungszuständen, aber auch bei Anwesenheit räumlicher Spannungszustände, erschlossen werden kann. Letztere treten z.B. in Lasteinleitungsbereichen auf. Hierfür wird anhand einer neu entwickelten, strukturoptimierten Unterlegscheibe aufgezeigt, welche große Leistungsfähigkeit die Strukturoptimierung in Verbindung mit wirkebenenbasierten Bruchkriterien bietet, um Schädigungen in solchen hochbelasteten Bereichen einer Faser-Kunststoff-Verbund-Struktur zu vermeiden.

Abstract

A Contribution to the Structural Optimization of Real Metallic and Fiber-Reinforced Plastic Components Using Fracture Plane-Based Failure Criteria

At the beginning of this thesis, a mathematical view of the theory of classical optimization algorithms is given. The connection of optimization algorithms with the finite element method leads to so-called structural optimization procedures, which are explained in detail afterwards. A closer look is taken at the particularities of different methods, of which, specifically, the optimality criteria-based methods do not depend on classical sensitivity-based optimization algorithms.

The applicability of the structural optimization procedures is demonstrated with the help of academic and practical examples. In the process, the optimality criteria- and sensitivity-based algorithms are compared in terms of their capabilities. It could be shown that sensitivity-based methods offer a wider scope of applications and typically lead to better results, although they are restricted to linear problems at their current state of development. Nevertheless, optimality criteria-based methods offer the advantage of easy integration into existing finite element systems and find very good solutions for specific problems in a very efficient way. This is shown with the help of a self-developed and -implemented optimality criteria-based topology optimization algorithm, which achieves, for some test problems, excellent results compared to commercial software.

Further optimization potential for mechanical structures becomes accessible through the use of materials with orthotropic stiffness properties, as exemplified by fiber-reinforced plastics. Hence, the second part of this thesis addresses in detail the particular features and mechanical properties of these materials. Special attention is devoted to failure prediction, with a specific focus on action plane-based fracture criteria, of which the fracture criterion proposed by Puck and the LaRC04 criterion are intensively studied and finally compared together with the Tsai-Hill criterion in terms of their fracture curves, based on data for a selected real material.

The last part of the thesis demonstrates in which way the application of realistic fracture criteria, as they are posed by action plane-based criteria, in combination with optimization algorithms for the material parameters of fiber-reinforced plastics, can offer access to additional lightweight construction potential in structural regions with approximate plane stress states, as well as in the presence of spatial stress states. The latter appear in load application regions, for example. On the basis of a newly developed, structurally optimized washer, the great capabilities of structural optimization in connection with action plane-based failure criteria, in terms of avoidance of damage in these highly stressed areas of fiber-reinforced plastic structures, are shown.