

**Multi-objective design optimization  
under epistemic uncertainty**

**Multikriterielle Tragwerksoptimierung  
bei epistemischer Unschärfe**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
eingereichte

**Dissertation**

von

Mgr. inż. Aleksandra Serafińska  
geboren am 24. Juni 1983 in Wrocław (Polen)

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Erster Gutachter:     | Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske<br>Technische Universität Dresden |
| Zweiter Gutachter:    | Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wall<br>Technische Universität München          |
| Dritter Gutachter:    | Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf<br>Technische Universität Dresden          |
| Tag der Einreichung:  | 11. Oktober 2016  |
| Tag der Verteidigung: | 17. März 2017   |

# Summary

In the present thesis, novel numerical methods for the structural design under uncertainty are proposed. The aspiration for the optimal fulfillment of numerous design requirements implies the formulation of a design task as a multi-objective optimization problem. The present thesis introduces various enhancements of multi-objective optimization methods in the context of synergy with uncertainty analysis and the structural analysis accomplished in the framework of the finite element method.

The first main contribution of the present work is the development of two multi-objective optimization algorithms working in an uncertain environment with epistemic uncertainty characteristic. The quantification of epistemic uncertainty succeeds with the uncertainty model fuzziness based on the fuzzy set theory. A consistent method for the evaluation of the uncertain analysis input parameters modelled as fuzzy sets within the optimization algorithm is developed. Since the ordering of the objective function outputs and conjugate decision vectors is an intrinsic procedure of every optimization algorithm, novel methods for the comparison of multiple uncertain objective functions responses are introduced. The first proposed algorithm represents a scalarization approach for the multi-objective optimization, which functionality is based upon the weighted sum method and uncertainty measures, imposing a total order of the decision space. In contrary, the second algorithm constitutes a vector optimization method accounting for a strict partial order, which is based on the dominance principle of fuzzy sets and fuzzy vectors. Both evolutionary algorithm based approaches enable the identification of robust designs.

The second part of the thesis is devoted to the solution of structural design tasks by means of the multi-objective optimization methods, especially focusing on the structural durability enhancement. In particular, the second novel development of this thesis is a numerical approach for the fail-safe structural design. The optimization-driven adaption of the design configuration involves the application of structural elements hindering the escalation of damage and failure processes. The investigated failure model is based on a discontinuity field influenced by uncertainty and modelled in the framework of configurational mechanics.

Further investigations on durability conducted in the scope of the present work concern the resistance of structures to the damage induced by the degradation of surfaces subjected to frictional contact and wear. The final novel contribution of this thesis consists of a numerical design optimization approach focusing on the enhancement of wear performance. The basis for the improvement of various wear characteristics constitutes the developed finite element wear analysis, which considers the geometry alteration due to material loss as well as the friction-wear interaction in the scope of the novel metamodel based constitutive equation for friction.

The developments being part of the present thesis contribute to the structural design under uncertainty, facilitating the decision making process.

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Dissertation werden numerische Ansätze zum Tragwerksentwurf unter Berücksichtigung der Unschärfe entwickelt. Um die zahlreichen Entwurfsziele bestmöglich zu erfüllen, ist es vorteilhaft, die Entwurfsaufgabe als eine multikriterielle Optimierungsaufgabe zu formulieren. In dieser Arbeit werden diverse Erweiterungen der Methode der multikriteriellen Optimierung im Hinblick auf die Synergie mit der Unschärfeanalyse sowie der Tragwerksanalyse auf Basis der Finite Elementen Methode vorgeschlagen.

Der erste Forschungsbeitrag dieser Arbeit besteht in der Entwicklung zweier multikriterieller Optimierungsalgorithmen, deren Funktionalität auf der Berücksichtigung und Evaluierung unscharfer Größen mit epistemischer Unschärfecharakteristik beruht. Die Beschreibung epistemischer Unschärfe erfolgt mit dem Unschärfemodell Fuzziness, das auf der Grundlage der Fuzzy-Mengen Theorie formuliert ist. Ausgehend von der grundlegenden Funktion eines jeden Optimierungsalgorithmus die Ordnung der Zielfunktionswerte und der zugehörigen Entscheidungsvektoren zu bestimmen, werden in dieser Arbeit neue Methoden für den Vergleich mehrfacher unscharfer Zielfunktionswerte geschaffen. In dem ersten von den zwei entwickelten Optimierungsverfahren wird das multikriterielle Optimierungsproblem in ein skalares Optimierungsproblem übergeführt, indem die Methode der gewichteten Summe sowie die Unschärfemaße eingesetzt werden. Diese Methode impliziert eine totale Ordnung des Entscheidungsraums. Im Gegensatz dazu gehört das zweite Verfahren zu der Kategorie der Vektoroptimierungsmethoden und berücksichtigt die strenge partielle Ordnung des Entscheidungsraums, die auf dem Prinzip der PARETO-Dominanz beruht. Dabei ermöglichen die beiden sich auf den evolutionären Algorithmen stützenden Verfahren das Ermitteln robuster Tragwerksentwürfe.

Der zweite Teil der Arbeit widmet sich der Lösung der Tragwerksentwurfaufrage mit den Methoden der multikriteriellen Optimierung, wobei der Fokus auf der Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Tragwerke liegt. Mit dem zweiten Forschungsbeitrag dieser Dissertation wird ein neues numerisches Verfahren für den Entwurf optimaler, versagen- und ausfallsicherer Tragwerke vorgeschlagen. Der optimierungsgesteuerte Entwurf beruht auf Einführung spezieller Bauteile, die die Ausbreitung der Schädigungs- und Versagensprozesse einschränken. Dem eingeführten Versagensmodell liegt ein durch den Einfluss unscharfer Faktoren bestimmtes Diskontinuitätsbild zugrunde. Dabei erfolgt die Versagensmodellierung mit den Methoden der Mechanik im materiellen Raum.

Bei der in dieser Arbeit vorgenommenen Fortsetzung der Studie zur Dauerhaftigkeit der Tragwerke wird diese im Kontext des Widerstands gegen Schädigung der Oberflächen, die Reibung- und Abriebprozessen ausgesetzt sind, betrachtet. Der dritte Forschungsbeitrag dieser Dissertation besteht in numerischen, optimierungsbasierten Entwurfsverfahren zur Erhöhung der Abriebhaltbarkeit. Der Steigerung diverser Abriebleistungsmerkmale liegt eine realitätsnahe Finite Elemente Analyse zugrunde, die die geometrische Veränderung infolge des Materialabtrags wiedergibt sowie die Reibung-Abrieb Interaktion berücksichtigt, einschliesslich des auf den Metamodellen basierten Reibgesetzes.

Die im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelten Methoden liefern einen Beitrag zum dauerhaftkeitsorientierten Tragwerksentwurf bei Unschärfe sowie unterstützen die die Dimensionierung begleitenden Entscheidungsprozesse.