

Methods for a robust structural design under consideration of polymorphic uncertain data

Methoden für einen robusten Strukturentwurf
unter Berücksichtigung polymorpher Datenunschärfe

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Maria Böttcher

Gutachter: **Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske**
Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. Udo Nackenhorst
Leibniz Universität Hannover

Assoc. Prof. Dr. Rafi L. Muhanna
Georgia Institute of Technology

Tag der Verteidigung: 18. September 2026

Summary

In the present thesis, numerical methods are discussed and developed in order to enhance decision making for structural design. The main objective is generating actionable insights about the robustness of a design under polymorphic uncertain data. A framework of the steps needed to enable the robustness evaluation is introduced in this thesis, combining methods for uncertainty modeling, metamodeling with adaptive sampling, and uncertainty analysis.

A fundamental requirement for gaining insight about the structure's robustness is an adequate modeling strategy of the present uncertainty for the input parameter. Polymorphic uncertainty models, combining concepts of probability and possibility theory, are applied to quantify the input parameters, to account for the individual contributions of aleatoric and of epistemic uncertainty sources, which, in turn, are propagated to the structural response prediction. Challenges that can arise when dealing with real engineering data are discussed. Novel methods are developed to handle engineering data specific particularities, such as bias and dependencies. Incorrect assumptions for the uncertainty quantification can thus be avoided, which would otherwise lead to a distortion of the designs' performance and, especially, robustness quantification.

While a structural analysis is commonly conducted using a finite element or a similarly complex numerical simulation, the strong increase in samples generated for an uncertainty analysis requires the use of a computationally inexpensive replacement model. Metamodels are applied to approximate the functional input-to-output behavior. The procedure of generating and training a metamodel is presented, and selected model types are introduced. Since the prediction accuracy is highly dependent on the training data, the challenge of creating a high quality data set while minimizing the required number of data samples is addressed. Adaptive sampling strategies are described, and a novel method, which is developed in the context of this work, is presented.

The evaluation of polymorphic uncertain output quantities, which result from the uncertainty analysis, is enabled by the use of information reduction measures, which allow for a quantification of performance and robustness of the structural response. The focus is on quantifying the robustness, which here refers to the stability of the performance under common, foreseeable fluctuations of the input parameters. A further contribution of this thesis is the detailed investigation of different measures regarding their characteristics and interpretability. Visualization methods are developed, and a discussion about the comparability between measures for random and for fuzzy quantities is conducted. The separation between the influence of aleatoric and epistemic uncertainty sources is investigated, and possible decisions for next steps within the design optimization, based on the results, are discussed using engineering examples.

The developments presented in this thesis contribute towards a more informed decision making for a realistic design optimization by enhancing the comprehensibility and, therefore, the usability of structural response predictions under polymorphic data uncertainty.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden numerische Methoden diskutiert und entwickelt, um die Entscheidungsfindung bei der Tragwerksplanung zu unterstützen. Das Ziel besteht darin, praktisch umsetzbare Erkenntnisse über die Robustheit des Entwurfs unter polymorph unscharfen Daten zu gewinnen. In dieser Dissertation werden die Schritte für ein Rahmenkonzept vorgestellt, die zur Bewertung der Robustheit erforderlich sind, wobei Methoden zur Unschärfemodellierung, Erstellung von Metamodellen mit adaptiver Stichprobengenerierung und Unschärfeanalyse kombiniert werden.

Eine grundlegende Voraussetzung für die Gewinnung von Erkenntnissen über die Robustheit von Strukturen ist eine adäquate Modellierungsstrategie der vorliegenden Unschärfe für die Eingangsparameter. Polymorphe Unschärfemodelle, die Konzepte der Probabilistik und Possibilitätstheorie kombinieren, werden zur Quantifizierung der Eingangsparameter angewendet, um die individuellen Beiträge aleatorischer und epistemischer Unschärfequellen zu berücksichtigen, die wiederum auf die Vorhersage des Strukturverhaltens übertragen werden. Herausforderungen werden diskutiert, die bei der Nutzung realer Ingenieurdaten auftreten können. Neuartige Methoden werden entwickelt, um mit den Besonderheiten von Ingenieurdaten, wie beispielsweise Bias und Abhängigkeiten, umzugehen. In diesem Zusammenhang können fehlerbehaftete Annahmen für die Unschärfequantifizierung vermieden werden, die andernfalls zu einer verzerrten Quantifizierung der Leistungsfähigkeit und insbesondere der Robustheit des Entwurfs führen würden.

Während eine Strukturanalyse üblicherweise mit Hilfe einer Finite-Elemente-Methode oder einer ähnlich komplexen numerischen Simulation durchgeführt wird, erfordert die starke Zunahme der für eine Unschärfeanalyse generierten Samples die Verwendung eines rechnerisch kostengünstigen Ersatzmodells. Metamodelle werden angewendet, um das funktionale Input-Output-Verhalten zu approximieren. Das Vorgehen zur Generierung und zum Training eines Metamodells wird erläutert und ausgewählte Modelltypen werden vorgestellt. Da die Qualität der Approximation in hohem Maße von den Trainingsdaten abhängt, wird die Herausforderung der Erstellung eines hochwertigen Datensatzes bei gleichzeitiger Minimierung der erforderlichen Anzahl von Samples adressiert. Adaptive Sampling-Strategien werden beschrieben und eine neuartige Methode vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde.

Die Bewertung polymorph unscharfer Output-Mengen, die aus der Unschärfeanalyse resultieren, wird durch den Einsatz von informationsreduzierenden Maßen ermöglicht, die eine Quantifizierung der Leistungsfähigkeit und Robustheit der Strukturantwort erlauben. Der Fokus liegt auf der Quantifizierung der Robustheit, die sich hier auf die Stabilität der Leistungsfähigkeit unter üblichen, vorhersehbaren Schwankungen der Input-Parameter bezieht. Ein weiterer Beitrag dieser Arbeit ist die detaillierte Untersuchung verschiedener Maße hinsichtlich ihrer Charakteristika und Interpretierbarkeit. Dabei werden Visualisierungsmethoden entwickelt und eine Diskussion über die Vergleichbarkeit zwischen Maßnahmen für Zufalls- und Fuzzy-Größen geführt. Die Trennung zwischen dem Einfluss aleatorischer und epistemischer Unschärfequellen wird untersucht, und mögliche Entscheidungen für die nächsten Schritte innerhalb der Entwurfsoptimierung auf der Grundlage der Ergebnisse werden anhand von Ingenieurbeispielen diskutiert.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Weiterentwicklungen tragen zu einer fundierteren Entscheidungsfindung für eine realitätsnahe Entwurfsoptimierung bei, indem sie die Verständlichkeit und damit die Anwendbarkeit von Vorhersagen über die Leistungsfähigkeit der Struktur unter polymorpher Datenunschärfe verbessern.