

**Numerische Entwurfsmethoden**  
**unter Berücksichtigung polymorpher Unschärfe**  
Aspekte zeitlicher und räumlicher Abhängigkeiten

**Numerical design methods**  
**under consideration of polymorphic uncertainty**  
aspects of time and spatial dependencies

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

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Marco Götz  
geboren am 12. Juni 1987 in Gera

Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf Technische Universität Dresden
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske Technische Universität Dresden
Dritter Gutachter:	Prof. Dr. techn. Günther Meschke Ruhr-Universität Bochum
Tag der Einreichung:	18. November 2016
Tag der Verteidigung:	21. April 2017

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit sind der numerische Entwurf von Strukturen unter Berücksichtigung polymorpher Unschärfe thematisiert und Aspekte zeitlicher und räumlicher Abhängigkeiten diskutiert.

Für eine realitätsnahe Simulation von Strukturen ist eine adäquate Modellierung der Datenunschärfe erforderlich. Die verfügbaren Informationen müssen berücksichtigt werden, nicht validierbare Voraussetzungen für Unschärfemodelle sind zu vermeiden. Die entwickelte polymorphe Unschärfemodellierung – einzuordnen in den Kontext der *imprecise probability* – ist aufgrund der expliziten Unterscheidung aleatorischer und epistemischer Unschärfe dafür geeignet. Aufgrund der Allgemeingültigkeit des Unschärfemodells „fuzzy-wahrscheinlichkeitsbasierte Fuzzy-Zufälligkeit“ ist dessen numerische Implementation ausführlich dargelegt.

Eine Strukturanalyse unter Berücksichtigung von Unschärfe ist durch Orts- und Zeitabhängigkeit gekennzeichnet. In dieser Arbeit sind Methoden zur Erfassung der Abhängigkeit getrennt für Eingangs- und Ergebnisparameter entwickelt. Die Definition der Fundamentalmodelle Fuzziness und Zufälligkeit ermöglicht die Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Eingangsparameter aller vorgestellten Unschärfemodelle. Die Ortsabhängigkeit der Eingangsparameter wird durch stochastische Felder oder dem formulierten Fuzzy-Feld in die Strukturanalyse einbezogen. Die Entwicklung der erweiterten Fuzzy-Strukturanalyse ermöglicht die Berechnung und Visualisierung orts- und zeitabhängiger Struktursimulationsergebnisse. Der Vorteil gegenüber anderen Fuzzy-Strukturanalysemethoden ist, dass eine Beurteilung der gesamten Struktur möglich und eine a priori Festlegung auf eine erwartete relevante Zielgröße nicht erforderlich ist.

Für den numerischen Entwurf unter Berücksichtigung unscharfer Entwurfsparameter ist die Definition von Ersatzmodellen für die Einzel- und Mehrkriterienoptimierung erforderlich. Die Vergleichbarkeit unscharfer Größen kann nicht direkt, sondern nur auf Grundlage deterministischer Werte erfolgen. Dafür sind unschärfereduzierende Maße anzuwenden. Verfügbare deterministische Optimierungsalgorithmen sind für die Berücksichtigung unscharfer Parameter erweitert. Eine alternative Möglichkeit für die Lösung der Entwurfsaufgabe ist die Formulierung als inverses Problem und die resultierende Ermittlung zulässiger Entwurfsteilräume. Dafür ist ein Algorithmus basierend auf vorhandenen Daten entwickelt.

Die Strukturanalyse oder Optimierung unter Berücksichtigung von unscharfen Parametern ist nur mit effizienzsteigernden Maßnahmen möglich. Neben der Parallelisierung der unscharfen Analyse sind in dieser Arbeit Methoden des *data minings* und des maschinellen Lernens angewendet. Dabei wird die Relevanz von Sensitivitätsanalysen hervorgehoben. Die Entwicklung von Sensitivitätsmaßen basierend auf vorhandenen Daten ermöglicht die Durchführung einer orts- und zeitabhängigen Struktur-Sensitivitätsanalyse. Zur Verbesserung des Modellverständnisses und für eine detaillierte Datenexploration sind Visualisierungsmethoden höherdimensionaler Parameterräume diskutiert. Die entwickelten und vorgestellten Methoden sind Werkzeuge, deren Anwendung problemspezifisch zu adaptieren ist.

Die analysierten Beispiele verdeutlichen, dass die Anwendung der Methoden für verschiedene Ingenieuraufgaben möglich ist und dass die Berücksichtigung polymorpher Unschärfe effiziente Algorithmen erfordert.

Das entwickelte Software-Framework „Engineering Design considering Uncertainties“ ermöglicht die problemspezifische Anwendung aller diskutierten Methoden zur Strukturanalyse und Optimierung für eine adäquate Erfassung der Datenunschärfe.

# Summary

In the presented thesis the numerical design of structures under consideration of polymorphic uncertainty is discussed. Especially aspects of time and spatial dependencies are in focus.

The realistic simulation of structures requires adequate modelling of data uncertainty. Available information needs to be considered and not validatable assumptions have to be avoided. The developed polymorphic modelling of uncertainty, which can be seen in the context of „imprecise probability“, is an appropriate way for modelling data uncertainty, because the characteristics of aleatoric and epistemic uncertainty are distinguished explicitly. The uncertainty model „fuzzy probability based fuzzy randomness“ contains many other models implicitly. Therefore, the numerical implementation of this model is explained in detail.

Structural analysis under consideration of uncertainty is characterised by time and spatial dependencies. These dependencies are taken into account separately for input and result parameters. The definition of the fundamental models fuzziness and randomness allow the consideration of these dependencies of input parameters for all proposed uncertainty models. The spatial dependence of random input parameter is represented by random fields. A new method for fuzziness – fuzzy field – is defined. The development of an enhanced fuzzy structural analysis allows the computation and visualisation of time and spatial dependent structural simulation results. Compared to other fuzzy structural analysis methods, the advantage is the possibility to evaluate the full structure. This means, that an a priori definition of expected relevant results is not necessary.

The numerical design under consideration of uncertain design parameters requires the definition of surrogate models for single and multiobjective optimization tasks. A comparison of uncertain quantities cannot be performed directly, thus it needs to be done on the basis of deterministic values, which can be found by applying information reducing measures. Available deterministic optimization algorithms are enhanced to consider uncertainty quantities. Another possibility to solve the numerical design task is the formulation of an inverse problem and the computation of resulting permissible design spaces. Therefore an algorithm based on available data is developed.

The numerical optimization under consideration of uncertain parameters is possible by applying efficiency-raising methods. Beside parallelization of the uncertain analysis, methods of data mining and computational intelligence are developed or presented. The relevance of sensitivity analysis is highlighted. The development of sensitivity measures based on available data allows a time and spatial dependent sensitivity analysis for the full structure. Furthermore, visualization methods of parameter spaces of higher dimensionality are discussed. The developed and presented methods can be seen as tools, their applicability depends on the problem.

Examples show that the application of the defined methods is possible for different practical relevant engineering tasks and that the consideration of polymorphic uncertainty requires efficient algorithms.

The developed software framework „Engineering Design considering Uncertainties“ allows the problem dependent application of all discussed methods for an structural analysis and design for an adequate consideration of data uncertainty.