Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Baustatik

Polymorphe Unschärfemodellierung in der nichtlinearen Strukturmechanik – Stabilität von Schalentragwerken, räumliche Variabilität und Metamodellierung

Marc Fina

BAUSTATIK

Polymorphe Unschärfemodellierung in der nichtlinearen Strukturmechanik – Stabilität von Schalentragwerken, räumliche Variabilität und Metamodellierung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Marc Fina

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 24. April 2020

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Wagner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf

Karlsruhe 2020

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Wagner

Organisation und Verwaltung:

Institut für Baustatik
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe

Telefon: (0721) 608–42280
Telefax: (0721) 608–46015
E-Mail: info@ibs.kit.edu

© 2020 Marc Fina
Institut für Baustatik
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Ohne Genehmigung des Autors ist es nicht gestattet, dieses Heft ganz oder teilweise auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen oder in elektronischen Medien zu speichern.

ISBN 978–3–935322–27–0

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Anwendung polymorpher Unschärfemodelle im Bereich der nichtlinearen Strukturmechanik diskutiert. Die Schwerpunkte der Arbeit sind die Einführung der Unschärfemodellierung im Schalenbeulen, Modellierung räumlicher Variabilität und Aspekte der Metamodellierung.

Eine realitätsnahe Tragwerksanalyse erfordert neben einem geeigneten Modell auch die Berücksichtigung von Unschärfen in den Eingangsdaten. Eine explizite Unterscheidung zwischen aleatorischen und epistemischen Unschärfen wird ermöglicht mit der polymorphen Unschärfemodellierung. Für die numerische Umsetzung wird die α-Level-Optimierung angewendet. Diese ist für große Modelle sehr rechenaufwendig. Deshalb werden effiziente und robuste Metamodelle benötigt. In dieser Arbeit werden verschiedene Metamodelle wie das *Kriging-Verfahren*, *Neuronale Netze* und die *hochdimensionale Modelldarstellung* im Rahmen der Unschärfemodellierung eingesetzt. Dabei wird der Einfluss der unterschiedlichen Ersatzmodelle auf die Qualität der unscharfen Ergebnisgrößen diskutiert. Die Unschärfe soll zukünftig bei der Entscheidungsfindung in einem Tragwerksentwurf berücksichtigt werden. Zur Unterstützung der Entscheidungsfindung wird eine globale Sensitivitätsanalyse auf Basis der Metamodelle angewendet.

Manche Eingangsparameter müssen durch räumlich korrelierte Felder beschrieben werden. Hierfür wird die Anwendung von Fuzzy-wahrscheinlichkeitsbasierten Zufallsfedern erläutert. Zur Diskretisierung dieser Felder im Rahmen der Finite-Element-Methode werden effiziente Methoden vorgestellt. Zusätzlich werden auch Problemstellungen mit zeitlichen Abhängigkeiten behandelt.

Ein großer Anwendungsbereich polymorpher Unschärfemodelle ist das Thema Schalenbeulen. Geometrische und materielle Imperfektionen haben einen großen Einfluss auf das Beulverhalten von Schalen. Das Dilemma ist, dass die Imperfektionen in der Regel unbekannt sind. In dieser Arbeit werden neben den bereits existierenden semi-empirischen und herkömmlichen probabilisitischen Ansätzen verschiedene Unschärfemodelle eingeführt, um aleatorische und epistemische Unschärfen bei der Modellierung von Imperfektionen zu berücksichtigen. Zur Modellierung der räumlichen Variabilität von Mantelimperfektionen wird ein Korrelationsmodell mit polymorph unscharfen Parametern entwickelt. Die Quantifizierung der Unschärfe basiert auf realen Messdaten von Imperfektionen. Zusätzlich werden weitere Unschärfemodelle für Aufstandsimperfektionen, Variationen der Schalendicke und materielle Imperfektionen diskutiert.

Weiterhin werden Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung im Rahmen der Unschärfemodellierung genannt. Abschließend wird das Konzept der polymorphen Unschärfemodellierung an weiteren Beispielen aus dem Ingenieurwesen gezeigt.

Abstract

In the present doctoral thesis, the application of polymorphic uncertainty models in the field of nonlinear structural mechanics is discussed. The main focuses of the thesis are the introduction of polymorphic uncertainty modeling in shell buckling, modeling of spatial variability and aspects of surrogate modeling.

A realistic structural analysis requires a suitable model as well as the consideration of uncertainties in the input data. The polymorphic uncertainty modeling allows to distinguish explicitly between aleatoric and epistemic uncertainties. For the numerical treatment the so-called α-level-optimization is used. This is very demanding for the computation of large models. Therefore, efficient and robust surrogate models are required. In this thesis different surrogate models like kriging, neural networks and the high-dimensional model representation are used in context of uncertainty modeling. The influence of the different models on the quality of the fuzzy result variables is discussed. The aim is to consider different kinds of uncertainties in a structural design process. Therefore, a global sensitivity analysis based on the surrogate models is applied to support the decision-making process.

Some input parameters have to be modelled by spatially correlated fields. Therefore, the use of fuzzy probability based random fields will be presented in detail. Efficient methods for the discretization of random fields within the framework of the finite element method are presented. Additionally, problems with time dependencies are discussed.

The use of polymorphic uncertainty models is particularly appropriate in shell buckling. Geometric and material imperfections have a great influence on the buckling behavior of shells. The dilemma is that the imperfections are usually unknown. In this thesis, in addition to the already existing semi-empirical and classical probabilistic approaches, different uncertainty models are introduced to consider aleatoric and epistemic uncertainties in modeling of imperfections. A correlation model with polymorphic uncertain parameters is developed for modeling spatial variability of initial imperfections. The uncertainty quantification is based on real imperfection measurements. Different uncertainty models for boundary imperfections, variations in shell thickness and material imperfections are also discussed.

Furthermore, possibilities for increasing the efficiency within the scope of uncertainty modeling are mentioned. Finally, the concept of polymorphic uncertainty modeling is shown within further engineering applications.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation und Ziele 1

1.2 Stand der Technik und Einordnung der Arbeit 3

1.3 Gliederung der Arbeit 9

2 Kontinuumsmechanische Grundlagen **14**

2.1 Kinematik 14

2.1.1 Konfigurationen und Bewegung eines materiellen Körpers . 14

2.1.2 Der materielle Deformationsgradient 16

2.1.3 Der Green-Lagrange-Verzerrungstensor 17

2.2 Spannungen 21

2.3 Bilanzgleichungen der Mechanik 23

2.3.1 Massenerhaltung 23

2.3.2 Impulserhaltung 24

2.3.3 Drehimpulserhaltung 26

2.3.4 Energieerhaltung 27

2.4 Konstitutive Modellierung 29

2.4.1 Hyperelastisches Material 29

2.4.2 Isotropes Materialverhalten 31

2.4.3 Transversal isotropes Materialverhalten 32

2.5 Variationsformulierung 33

2.6 Linearisierung 35

3 Grundgleichungen der Schale **38**

3.1 Schalenkonzept 38

3.2 Differentialgeometrie 39

3.3 Schalenkinematik 40

3.4 Schnittgrößen 46

3.5 Stoffgesetz 47

3.6 Materialmatrix 50

3.7 Variationsformulierung und Linearisierung 51

3.8 Finite-Elemente-Formulierung 54

4 Stabilität von Tragwerken **64**

4.1 Einordnung von Stabilitätsproblemen 64

4.2 Lösung nichtlinearer FE-Gleichungen 67

4.3 Pfadverfolgungsalgorithmen 69

4.3.1 Laststeuerung 71

4.3.2 Verschiebungssteuerung 72

4.3.3 Bogenlängenverfahren 72

4.4 Numerische Berechnung von Stabilitätspunkten 74

4.4.1 Mathematische Betrachtungsweise 75

4.4.2 Klassische und lineare Beulanalyse 76

4.5 Begleitende nichtlineare Stabilitätsuntersuchung 77

4.6 Verhalten bei Imperfektionen 79

5 Grundgleichungen der Strukturdynamik **83**

5.1 Prinzip der virtuellen Verschiebungen 83

5.2 Semidiskrete Bewegungsgleichung 84

5.3 Zeitintegrationsverfahren 85

5.3.1 Explizite Verfahren 85

5.3.2 Implizite Verfahren 86

6 Polymorphe Unschärfemodellierung **88**

6.1 Basisunschärfemodelle 88

6.1.1 Zufallsvariable 89

6.1.2 Fuzzy-Variable 91

6.1.3 Intervallvariable 94

6.2 Polymorphe Unschärfemodelle 95

6.2.1 Intervall-wahrscheinlichkeitsbasierte Zufallsvariable 95

6.2.2 Fuzzy-wahrscheinlichkeitsbasierte Zufallsvariable 96

6.2.3 Zusammenfassung polymorpher Unschärfemodelle 97

6.3 Numerische Strukturanalyse mit unscharfen Daten 100

6.3.1 α-Level-Optimierung 100

6.3.2 Monte-Carlo-Simulation 101

6.3.3 Fuzzy- und Fuzzy-stochastische Strukturanalyse 102
6.4 Modellierung räumlicher Variabilität 104
6.4.1 Grundlagen der multivariaten Stochastik 104
6.4.2 Zufallsfelder 105
6.4.3 Intervall-wahrscheinlichkeitsbasiertes Zufallsfeld 106
6.4.4 Fuzzy-wahrscheinlichkeitsbasiertes Zufallsfeld 107
6.4.5 Übersicht der Unschärfemodelle 108
6.4.6 Methoden zur Diskretisierung von Zufallsfeldern 109
6.4.7 Beispiel: Quadratplatte mit Imperfektionen 113
6.4.8 Beispiel: Eingespannte Lochplatte mit Imperfektionen . . . 115
6.5 Modellierung unscharfer Ergebnisprozesse 117

7 Methoden der künstlichen Intelligenz 119
7.1 Idee der Metamodellierung 120
7.2 Die statistische Versuchsplanung 121
7.3 Metamodelle in der Unschärfemodellierung 126
7.3.1 Polynominterpolation als Metamodell 130
7.3.2 Methode der kleinsten Fehlerquadrate als Metamodell . . . 132
7.3.3 Nichtlineare Methode der kleinsten Fehlerquadrate 137
7.3.4 Kriging-Verfahren 139
7.3.5 Künstliche Neuronale Netze 145
7.3.6 Hochdimensionale Modelldarstellung - HDMR 149
7.3.7 Zusammenfassung der Metamodelle 154
7.4 Methoden zur Beurteilung der Qualität eines Metamodells 155
7.5 Globale Sensitivitätsanalyse 159
7.5.1 Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse 160
7.5.2 Monte-Carlo-Integration 162
7.6 Numerische Beispiele 165
7.6.1 Benchmark-Funktionen 165
7.6.2 Elastisch gebetteter Bohrpfahl mit Imperfektion 171
7.6.3 Einmassenschwinger 179

8 Zylinderschale mit Imperfektionen 182

8.1 Historischer Überblick 183

8.1.1 Deterministisches vs. probabilistisches Bemessungskonzept 183

8.1.2 Schalenbeulen in der aktuellen Norm 185

8.1.3 Einführung der Unschärfemodellierung im Schalenbeulen . 188

8.2 Unschärfemodell für Mantelimperfektionen 191

8.2.1 Auswertung einer Imperfektionsdatenbank 191

8.2.2 Ein Korrelationsmodell für Mantelimperfektionen 193

8.2.3 Definition geeigneter Korrelationsfunktionen und Fitting . 201

8.2.4 Das Korrelationsmodell mit unscharfen Parametern 203

8.2.5 Darstellung der Imperfektionen als fp-rf-Zufallsfeld 209

8.2.6 Schleifenalgorithmus der Stabilitätsanalyse unter Unschärfe 212

8.2.7 FE-Modell der Zylinderschale 214

8.2.8 Ergebnisse einer probabilistischen Modellierung 219

8.2.9 Ergebnisse der Unschärfemodellierung 221

8.2.10 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse 224

8.3 Ein Gesamtmodell für geometrische und materielle Imperfektionen 226

8.3.1 Unschärfemodell für Aufstandsimperfektionen 226

8.3.2 Unschärfemodell für materielle Imperfektionen 231

8.3.3 Unschärfemodell für Imperfektionen der Schalendicke . . . 232

8.3.4 Ergebnisse der Unschärfemodellierung 234

8.3.5 Diskussion zur Entscheidungsfindung 239

8.3.6 Zusammenfassung 240

9 Weitere Beispiele aus dem Ingenieurwesen 243

9.1 Zwischenstufe der Ariane-Rakete 243

9.1.1 FE-Modell der Kegelschale 243

9.1.2 Unschärfemodell für Mantelimperfektionen 245

9.1.3 Ergebnisse und Diskussion 249

9.2 Dynamische Untersuchung eines Propfans 251

9.2.1 FE-Modell des Propfans 252

9.2.2 Geometrische Imperfektionen des gekrümmten Rotorblatts 255

9.2.3 Fuzzy-stochastische Analyse der Propfan-Rotation 258

10 Zusammenfassung und Ausblick **262**

10.1 Zusammenfassung 262

10.2 Ausblick für weitere Forschungsvorhaben 265

Literaturverzeichnis **271**

ISBN 978-3-935322-27-0