

**Effiziente Methoden zur Analyse des Einflusses
von Unsicherheiten in komplexen
Ingenieurmodellen**

HABILITATIONSSCHRIFT

der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
Dr.-Ing. Thomas Most
geb. am 15. Juni 1975 in Bad Salzungen

Weimar, Juli 2012

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke, Bauhaus-Universität Weimar

Prof. Dr. techn. Christian Bucher, Technische Universität Wien

Wissenschaftlicher Vortrag mit Colloquium am 24. Mai 2013

Heft 9

der Mitteilungen des Graduiertenkollegs 1462 “Bewertung gekoppelter numerischer und experimenteller Partialmodelle im Konstruktiven Ingenieurbau”

Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland 2013

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. F. Werner

Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Morgenthal

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. C. Könke

Graduiertenkolleg 1462 “Bewertung gekoppelter numerischer und experimenteller Partialmodelle im Konstruktiven Ingenieurbau”

Berkaer Str. 9, 99425 Weimar

© Dr.-Ing. T. Most (thomas.most@dynardo.de)

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.
Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form - durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren - reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werde.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strukturmechanik sowie am Graduiertenkolleg 1462 “Modellqualitäten” der Bauhaus-Universität Weimar.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Christian Bucher und Herrn Professor Carsten Könke für die Motivation, meine wissenschaftliche Arbeit nach der Promotion fortzusetzen. Beiden danke ich für eine unvergessliche Zeit am Institut für Strukturmechanik, für das dort herrschende angenehme Arbeitsklima im Umfeld motivierter und kompetenter Kollegen. In Zusammenarbeit mit den beiden Professoren, den Doktoranten und Post-Doktoranten des ISM sind viele kreative Ideen entstanden, die in diese Arbeit mit eingeflossen sind.

Für die daran anschließende Zeit am Graduiertenkolleg 1462 möchte ich insbesondere Herrn Prof. Tom Schanz, Herrn Prof. Frank Werner sowie Herrn Prof. Carsten Könke für die tiefgründigen Diskussionen danken, die immer wieder den Blick über den Tellerrand der eigenen Arbeit geschärft haben. Im Zusammenspiel mit meinem Kollegen Prof. Tom Lahmer sowie den 12 Doktoranten des Graduiertenkollegs ist eine sehr motivierende Gruppendynamik entstanden, die sehr zu neuen Ideen inspiriert hat. In dieser Zeit ist ein Großteil der Veröffentlichungen dieser Arbeit entstanden.

Abschließend möchte Herrn Dr. Johannes Will für die Motivation und die eröffneten Möglichkeiten in meiner jetzigen Funktion bei der Dynardo GmbH danken, diese Ideen und Ansätze innerhalb einer praxistauglichen Softwareumgebung umzusetzen und weiterzuentwickeln.

Kurzfassung

Im Ingenieurwesen ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten beim Nachweis von Tragkonstruktionen unverzichtbar. Dabei kommen oftmals probabilistische Methoden zum Einsatz. Allerdings werden durch den Einzug numerischer Diskretisierungsverfahren, wie zum Beispiel der Finite Elemente Methode, viele Fragestellungen mit immer aufwendigeren Modellen untersucht. Die meisten probabilistischen Methoden sind aufgrund ihres hohen Aufwandes, im Bezug auf die Anzahl von Modellauswertungen, im Regelfall für solche komplexen Analysemodelle nur bedingt anwendbar. Weiterhin benötigen viele probabilistische Methoden ausreichend genaue Informationen über die stochastischen Eigenschaften der untersuchten unsicheren Modell-eingangsgößen, um nutzbare Ergebnisse zu liefern. Diese Informationen liegen speziell im Bauingenieurwesen aufgrund mangelnden Wissens oder aufwendiger Messverfahren oftmals nur eingeschränkt vor.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Methoden zur Variations-, Sensitivitäts- und Zuverlässigkeitsanalyse, welche dazu dienen die Streuung von Ergebnisgrößen, deren Ursachen sowie Auftretenswahrscheinlichkeiten von Versagensszenarien zu analysieren, näher untersucht und weiterentwickelt. Dabei wurde einerseits auf eine effiziente Anwendbarkeit Wert gelegt, und andererseits die Aussagequalität infolge mangelnder Informationen bewertet.

Die vorliegende Arbeit ist als kumulative Habilitationsschrift aufgebaut. Sie enthält ausgewählte Veröffentlichungen des Authors aus den Jahren 2007 bis 2012, welche in einem Hauptteil eingeordnet und zusammengefasst werden. Die vorgestellten Ergebnisse wurden innerhalb des DFG-geförderten Forschungsprojektes “Zuverlässigkeitsbeurteilung vorgeschädigter komplexer Tragstrukturen auf der Basis neuronaler Netzwerkapproximation” sowie innerhalb des Graduiertenkollegs 1462 “Modellqualitäten” an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität erzielt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Probabilistisches Modell	4
2.1	Zufallszahlen	4
2.1.1	Verteilungsfunktion	4
2.1.2	Stochastische Momente	5
2.1.3	Maximale-Entropie-Verteilung	6
2.2	Abhängigkeiten zwischen Zufallszahlen	8
2.3	Stochastische Felder	10
2.3.1	Modellierung	10
2.3.2	Lokale Mittelwertbildung	12
2.3.3	Diskretisierung	12
3	Ermittlung stochastischer Kenngrößen	15
3.1	Ermittlung der Eigenschaften von Zufallsvariablen aus direkt gemessenen Größen	15
3.2	Berücksichtigung von ungenauen stochastischen Eigenschaften	16
3.3	Identifikation indirekt gemessener Größen	19
3.3.1	Maximum-Likelihood-Methode	20
3.3.2	Aktualisierungsverfahren nach Bayes	21
3.4	Identifikation der statistischen Eigenschaften stochastischer Felder	23
4	Variationsanalyse	25
4.1	Analytische Vorgehensweise	25
4.2	Analyse durch Stichprobenentnahme	26
4.3	Approximation von Antwortgrößen	29
4.4	Stichprobenentnahme bei ungenauen Verteilungsfunktionen	32
5	Sensitivitätsanalyse	34
5.1	Varianzbasierte Sensitivitätsmaße	34

5.1.1	Definition	34
5.1.2	Schätzverfahren	36
5.2	Berücksichtigung korrelierter Modelleingangsgrößen	39
5.3	Berücksichtigung ungenauer Verteilungsfunktionen	39
6	Zuverlässigkeitsanalyse	42
6.1	Sicherheitsfaktoren	43
6.2	Stichprobenverfahren	44
6.2.1	Monte Carlo Simulation	45
6.2.2	Importance Sampling	45
6.2.3	Directional Sampling	47
6.3	Approximationsmethoden	49
6.3.1	First Order-Second Moment Methode	49
6.3.2	Zuverlässigkeitsmethode erster Ordnung	49
6.3.3	Anwendung von Meta-Modellen	51
6.4	Berücksichtigung ungenauer Verteilungsfunktionen	52
7	Probabilistische Bewertung von Modelprognosen	55
7.1	Sensitivitätsanalyse	56
7.2	Abschätzung der Modellunsicherheit	57
7.3	Bayes'sche Modellbewertung	58
8	Schlussfolgerungen	60
	Literatur	62
	Paper I, Probabilistic Engineering Mechanics, 2007	67
	Paper II, Probabilistic Engineering Mechanics, 2008	93
	Paper III, Computers and Geotechnics, 2010	117
	Paper IV, Probabilistic Engineering Mechanics, 2011	147
	Paper V, Computers and Structures, 2011	167
	Paper VI, Bautechnik, 2011	191
	Paper VII, Proceedings ICASP 2007	207
	Paper VIII, Proceedings CC 2007	217
	Paper IX, Proceedings IFIP 2010	233

Paper X, Proceedings ICASP 2011	247
Paper XI, Proceedings WOST 2011	257
Paper XII, Proceedings REC 2012	275

Kapitel 1

Einleitung

Für die Analyse von Ingenieurfragestellungen stehen in heutiger Zeit eine Vielzahl von spezifischen Methoden zur Verfügung. Dabei werden oftmals analytische Beschreibungen gewählt, welche auf Basis von Erfahrungen und Beobachtungen das Verhalten von Strukturen und Systemen repräsentieren sollen. Alternativ dazu haben in den letzten Jahrzehnten numerische Diskretisierungsmethoden einen immer größeren Einfluss gewonnen. Aufgrund steigender Rechnerkapazitäten werden die verwendeten Analysemodelle und Methoden in der Regel immer komplexer. Dabei nimmt nicht nur die Abbildungsgenauigkeit bestimmter physikalischer Phänomene zu, sondern auch der numerische Aufwand.

Bei der Analyse von Strukturen und Systemen ist der Ingenieur nicht nur daran interessiert, ein beobachtetes Struktur- oder Systemverhalten einer konkreten Situation mit entsprechenden Modellen abzubilden, sondern diese entwickelten und validierten Modelle zu nutzen, um unbekannte Situationen zu prognostizieren, um somit schlussendlich prototypische Tests größtenteils virtuell durchführen zu können. Dabei sind die äußeren Einwirkungen nicht exakt bekannt und auch die Geometrie- und Materialeigenschaften unterliegen gewissen Streuungen.

Zur Berücksichtigung dieser Unsicherheiten wurden im Ingenieurwesen verschiedene Ansätze entwickelt und etabliert. Ein häufiges Vorgehen basiert auf probabilistischen Beschreibungen der Unsicherheiten in Form von Zufallszahlen, stochastischen Feldgrößen sowie stochastischen Prozessen. Die Analyse des Modells unter Berücksichtigung der Streuungen der Eingangsparameter kann dann anhand verschiedener stochastischer Methoden durchgeführt werden. Innerhalb von Variationsanalysen wird zum Beispiel nur die resultierende Streuung der Antwortgrößen untersucht. Sensitivitätsstudien hingegen analysieren die Ursachen der Antwortgrößenstreuungen und mit Hilfe von Zuverlässigkeitsanalysen wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer ungewünschten Situation, zum Beispiel des Versagens einer Struktur, berechnet. Viele dieser Analysemethoden benötigen allerdings eine Vielzahl von Modellauswertungen, bei denen das zugrundeliegende Analysemodell

für verschiedene Eingangsparameterkonfigurationen untersucht wird. Für aufwendige Modelle stellt die Anwendbarkeit probabilistischer Methoden somit erhöhte Anforderungen an die Effizienz dieser Verfahren.

Um eine probabilistische Beschreibung von Unsicherheiten im Rahmen stochastischer Analysen sinnvoll anzuwenden, ist es notwendig, dass die stochastischen Eigenschaften der streuenden Eingangsparameter ausreichend genau bekannt sind. Allerdings ist in praktischen Anwendungen eine ausreichend genaue Beschreibung oftmals aufgrund mangelnder Information nicht möglich. In solchen Fällen ist es sehr hilfreich, die Qualität der Aussage stochastischer Analysen zu bewerten. Diese Problematik wurde in einigen Studien bereits untersucht. Dabei haben sich verschiedene Vorgehensweisen etabliert: Eine Möglichkeit dieser Problematik Rechnung zu tragen, ist es analog der Bayes'schen Philosophie die Unsicherheit in abgeleiteten stochastischen Kenngrößen, wie zum Beispiel Mittelwert und Standardabweichung einer Zufallszahl, ebenfalls durch probabilistische Modelle zu beschreiben (Der Kiureghian 1989), (Der Kiureghian and Ditlevsen 2009). Aufgrund der verschiedenen Ursachen von Unsicherheiten unterscheidet man häufig zwischen aleatorischen Unsicherheiten, welche die tatsächlichen Streuungen darstellen, und epistemischen Unsicherheiten, welche durch mangelndes Wissen oder ungenaue Messungen begründet sein können. Epistemische Unsicherheiten werden oftmals auch als Unschärfe bezeichnet und in einigen Studien als Intervallgrößen abgebildet. Beispiele für solche Ansätze, sind Random sets (Dubois and Prade 1991), Probability boxes (Ferson et al. 2003) sowie die Fuzzy Randomness Methode (Möller and Beer 2004).

Im Hinblick auf die Effizienz ergeben sich für diese erweiterten probabilistischen sowie auch für Intervallgrößenansätze starke Einschränkungen, da innerhalb dieser Methoden mehrere stochastische Analysen mit verschiedenen stochastischen Parametersätzen durchgeführt werden müssen. Da die meisten Verfahren, zum Beispiel zur Sensitivitäts- und Zuverlässigkeitsanalyse, als einzelne Analyse (unter Annahme exakter Verteilungsparameter) bereits kaum für komplexe Modelle anwendbar sind, ist diese weitergehende Untersuchung in der Regel nur an einfachen Beispielen möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Methoden zur Variations-, Sensitivitäts- sowie Zuverlässigkeitsanalyse hinsichtlich ihrer Eignung zur Anwendung für komplexe Ingenieurmodelle untersucht und entsprechend weiterentwickelt. Mit komplexen Modellen seien dabei die Modelle bezeichnet, deren Auswertung relativ aufwendig ist und die in der Regel eine Vielzahl von streuenden Eingangsparametern besitzen. Weiterhin wurde die Fragestellung der Identifikation stochastischer Kenngrößen untersucht und die Fragestellung von Unsicherheit in diesen Kenngrößen und deren Einfluss auf die Ergebnisse probabilistischer Analysen näher beleuchtet. Als Abschluss der Arbeit wurde die Fragestellung der Bewertung der Prognosequalität