

Simulation von Flugzeug-Kabinenkomponenten unter Berücksichtigung unscharfer Randbedingungen

S. Klostermann^{1*}, D. Vogt¹, O. von Estorff², J. Schlattmann²

¹ EADS Innovation Works, Hamburg

² Technische Universität Hamburg-Harburg

Zusammenfassung

Das Verhalten realer Systeme ist wesentlich von Unsicherheiten beeinflusst. Diese können durch Schwankungen der Geometrie (Form und Lagetoleranzen), der Materialeigenschaften (Dichte, Elastizitätsmodul) oder der Lasten und Randbedingungen (Umgebungstemperatur, Anfangsgeschwindigkeit, Kräfte) begründet sein.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Vorgehen vorgestellt, bei dem die Unsicherheiten durch stochastische Felder dargestellt werden. Für ein stochastisches Feld wird dabei die Eigenschaft eines Parameters als Funktion des Ortsvektors oder des Orts- und Zeitvektors abgebildet. Der durchgeführten stochastischen Simulation liegt eine nichtlinear-dynamische FE-Simulation einer typischen Flugzeug-Bordküche zugrunde. Da eine nicht-invasive Methode zur Umsetzung der stochastischen Felder angewendet wird, sind keine Modifikationen am Gleichungslöser erforderlich.

Drei Hauptunsicherheiten werden in der Simulation durch stochastische Felder abgebildet: Unsicherheiten hinsichtlich des Beladungszustandes, im Einzelnen die Massenverteilung und die Steifigkeiten, werden durch dreidimensionale räumliche stochastische Felder berücksichtigt. Unsicherheiten aufgrund von Beschleunigungen der Kabinenkomponenten in Folge von Turbulenzen oder ungünstigen Flugzuständen werden durch einen zeitabhängigen stochastischen Prozess abgebildet. Die Strukturkräfte an den Anbindungspunkten der Flugzeug-Bordküche werden durch eine statistische Auswertung der stochastischen Simulationsergebnisse abgeschätzt. Die Analyse führt zu neuen Erkenntnissen über mögliche Worst-Case-Szenarien und die Systemrobustheit.

Keywords: stochastischer Prozess, stochastisches Feld, Robustheit

* Kontakt: Sönke Klostermann, EADS Innovation Works, Nesspiel 1, 21129 Hamburg, E-Mail: soenke.klostermann@eads.net

1 Einleitung

Das Verhalten realer Systeme ist wesentlich von Unsicherheiten beeinflusst. Diese Unsicherheiten können durch Schwankungen der Geometrie (Form und Lagetoleranzen), der Materialeigenschaften (Dichte, Elastizitätsmodul) oder der Lasten und Randbedingungen (Umgebungstemperatur, Anfangsgeschwindigkeit, Kräfte) hervorgerufen werden (Marczyk, 1999).

Unabhängig von der Simulationsmethode kann ein deterministisches Modell diese Unsicherheiten nicht abbilden und ist damit ungeeignet, Aussagen über die Robustheit des Systemverhaltens zu liefern. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Vorhersagen über das reale Systemverhalten können jedoch probabilistische Modelle auf Basis der deterministischen Modelle erstellt werden. Zur Realisierung stochastischer Einflussgrößen im probabilistischen Modell müssen die Einflussgrößen durch eine geeignete Darstellungsart im Modell berücksichtigt werden.

Materialeigenschaften, Fertigungstoleranzen oder Umgebungsbedingungen lassen sich zum Beispiel durch *stochastische Variablen* abbilden. Diese sind durch ihre Verteilungsfunktion gekennzeichnet und sind für eine Realisierung unabhängig von Zeit und Ort. Lokale räumliche oder zeitliche Schwankungen der Einflussgrößen lassen sich damit in der Simulation nicht darstellen.

Zur Berücksichtigung von lokalen Effekten können so genannte *stochastische Felder* verwendet werden. Für das stochastische Feld besteht eine Abhängigkeit der betrachteten Größe vom Ortsvektor im n -dimensionalen Raum. Zusätzlich kann eine Zeitabhängigkeit existieren (Haldar und Mahadevan, 2000). Bei einer ausschließlichen Abhängigkeit von der Zeit findet sich ebenfalls die Bezeichnung *stochastischer Prozess* (Marczyk, 1999). In Abbildung 1.1 ist ein kontinuierliches, eindimensionales stochastisches Feld dargestellt. Unterschiedliche Arten stochastischer Felder finden sich zum Beispiel bei Vanmarcke (1983) und Marczyk (1999).

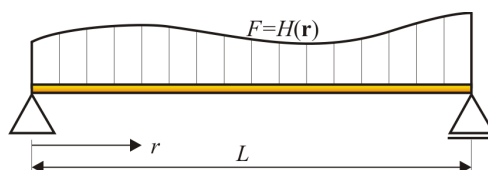


Abbildung 1.1: Eindimensionales stochastisches Feld

Wesentlich zur Anwendung kontinuierlicher stochastischer Felder $H(\mathbf{r})$ in der Simulation ist ein Ansatz zur Beschreibung der Felder durch diskrete Zufallsvariablen (Haldar und Mahadevan, 2000). Bei Anwendung der stochastischen Felder in der FEM ist die Auflösung des Feldes lediglich durch die Diskretisierung der Elemente begrenzt. Die in der Literatur beschriebenen Ansätze (Bucher, 2006; Ghanem und Spanos, 1991; Haldar und Mahadevan, 2000) erfordern die Kenntnis der stochastischen Felder, die zum Beispiel aus Messungen stammen können.

In dem vorliegenden Beitrag werden stochastische Felder in einem industriellen Beispiel einer nichtlinear-dynamischen FE-Simulation berücksichtigt. Durch die Verwendung eines nicht-invasiven Ansatzes ist eine Anpassung an verschiedene Gleichungslöser möglich. In der Simulation wird das Systemverhalten einer typischen Flugzeug-Bordküche eines modernen Langstreckenflugzeugs unter *emergency landing conditions* entsprechend FAR §25.562 untersucht, da es sich bei der Bordküche um eine der massereichsten Kabinenkomponenten handelt. Weiterhin weist der Beladungszustand der Bordküche im Verlauf einer Flugmission ein hohes Maß an Unsicherheiten auf. Die Modellierung der Unsicherheiten basiert auf gemessenen Daten sowie auf einem Eigenwert-Ansatz. Dieser Ansatz erlaubt die Verwendung stochastischer Felder in der FE-Simulation ohne detaillierte Kenntnis der zugrunde liegenden stochastischen Eigenschaften. Insbesondere für Konzeptstudien und frühe Phasen der Produktentwicklung kann der genannte Ansatz zur Anwendung kommen.

2 Modellierung der Unsicherheiten

Die stochastische Simulation basiert auf dem LS-DYNA[®]-Modell einer typischen Flugzeug-Bordküche (LSTC, 2007). Die Verwendung eines nicht-invasiven Ansatzes ermöglicht die einfache Nutzung eines kommerziellen Gleichungslösers. Drei Hauptunsicherheiten werden in der Simulation durch stochastische Felder abgebildet. Unsicherheiten der auf die Kabinenkomponenten wirkenden Beschleunigungen durch Turbulenzen und ungünstige Flugzustände werden durch ein zeitabhängiges stochastisches Feld (stochastischer Prozess) modelliert. Maßgeblich für die Auslegung von Kabinenkomponenten unter ungünstigen Lastbedingungen sind im Wesentlichen die Luftfahrtvorschriften FAR §25.561 und FAR §25.562. Die Unsicherheiten, bedingt durch den Beladungszustand der Bordküche, im Einzelnen die Massenverteilung und die Steifigkeiten, werden durch dreidimensionale räumliche stochastische Felder berücksichtigt. Die Beladung der Bordküche befindet sich primär in den Trolleys und den sogenannten Standard Units.

Die Eigenschaften von stochastischen Prozessen oder Feldern können durch zeitliche oder räumliche Autokorrelationsfunktionen aus direkten Messungen der Unsicherheiten abgeleitet werden. Im vorliegenden Fall werden gemessene Beschleunigungsverläufe aus Schlittenversuchen, die entsprechend den Zulassungsvorschriften für Kabinenkomponenten durchgeführt wurden, als Grundlage der Modellierung des stochastischen Prozesses der Bordküchenbeschleunigung verwendet. Die Sollbeschleunigung in x-Richtung ist durch einen Beschleunigungsimpuls mit einer Maximalbeschleunigung von 16 g gegeben. Der Maximalwert der Beschleunigung muss innerhalb von 90 ms erreicht werden. Nach einer diskreten Fourier-Transformation der Beschleunigungszeitverläufe in den Frequenzraum werden für die Real- und Imaginärteile der Beschleunigung für diskrete Frequenzen unter Annahme Gaußscher Verteilungsfunktionen die statistischen Momente bestimmt. In einem zweiten Schritt werden die gewonnenen Daten zur Modellierung des stochastischen Prozesses verwendet. Insgesamt 50 Zufallsvariablen beschreiben den stochastischen Prozess im Frequenzraum. Die Zufalls-

variablen definieren die Real- und Imaginärteile von 25 äquidistanten Frequenzen im Frequenzbereich bis 60 Hz. Die Real- und Imaginärteile höherer Frequenzen werden zur Rücktransformation in den Zeitbereich zu Null gesetzt.

Im Gegensatz zu den Beschleunigungen werden die stochastischen Felder zur Beschreibung der Beladungsunsicherheiten nicht aus direkten Messungen gewonnen. Es wird ein Ansatz über die Eigenwerte des Finite-Elemente-Netzes angewendet (Bayer und Roos, 2006). Die Eigenschaften (Dichte, Elastizitätsmodul) der einzelnen Elemente werden durch stochastische Superposition der Eigenvektoren generiert. Durch einen Fourier-artigen Ansatz werden die Eigenmoden des Finite-Elemente-Netzes zur Beschreibung der Materialeigenschaften Dichte und E-Modul über dem Element genutzt. Die Anzahl der zu betrachtenden Eigenmoden kann über eine Primfaktorenzerlegung bestimmt werden. Für einen Balken bestehend aus sechs Finiten Elementen sind entsprechend Abbildung 2.1 vier Eigenmoden $\Psi_i, i = 1, \dots, 4$ zu berücksichtigen.

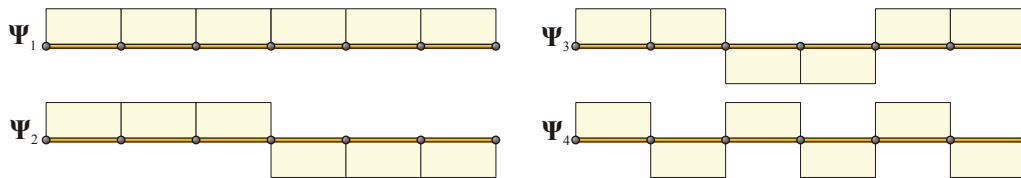


Abbildung 2.1: Eigenformen für sechs Elemente eines Balkens

Jede Eigenform wird eindeutig durch Amplitude und Phase beschrieben. Die Anzahl zu betrachtender Phasen einer Eigenform entspricht der diskreten Wellenlänge der entsprechenden Halbwelle. Für die erste Eigenform Ψ_1 in Abbildung 2.1 werden sechs Phasen betrachtet. Für jede Eigenform werden die Amplitude und die Phase durch Zufallszahlen bestimmt. Die Eigenformen werden anschließend zu einem Eigenformvektor Θ aufsummiert, der die Elementeigenschaften des jeweiligen Materialparameters eindeutig beschreibt. Für zwei- und dreidimensionale stochastische Felder wird für jede Raumrichtung ein Eigenformvektor Θ benötigt. Die Eigenschaften des Elementes werden durch Projektion der einzelnen Eigenformvektoren auf das Element zugewiesen. Für ein einfaches dreidimensionales stochastisches Feld mit 27 Elementen ist die Zuweisung der Eigenformvektoren in Abbildung 2.2 dargestellt.

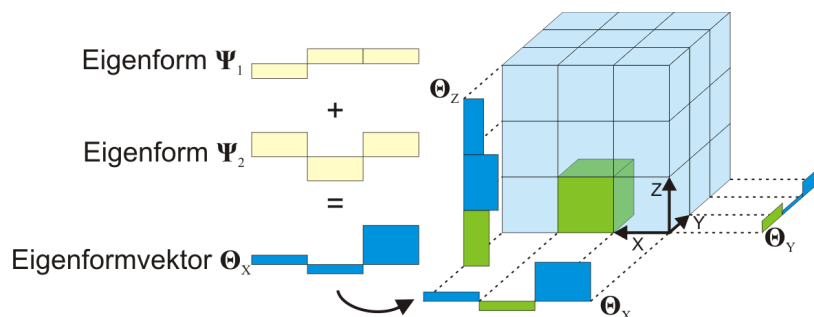


Abbildung 2.2: Eigenformvektoren eines dreidimensionalen stochastischen Feldes

Der Beladungszustand der Bordküche wird durch 8412 Volumenelemente innerhalb der Trolleys und Standard Units für die Dichte und den E-Modul durch stochastische Felder beschrieben (Abbildung 2.3). Zur Modellierung der stochastischen Felder werden 466 Zufallsvariablen zur Beschreibung der Amplituden und Phasen der Eigenformen verwendet. Für eine möglichst breite Ausnutzung des Parameterraumes werden für die Zufallsvariablen der stochastischen Felder Gleichverteilungen angenommen.

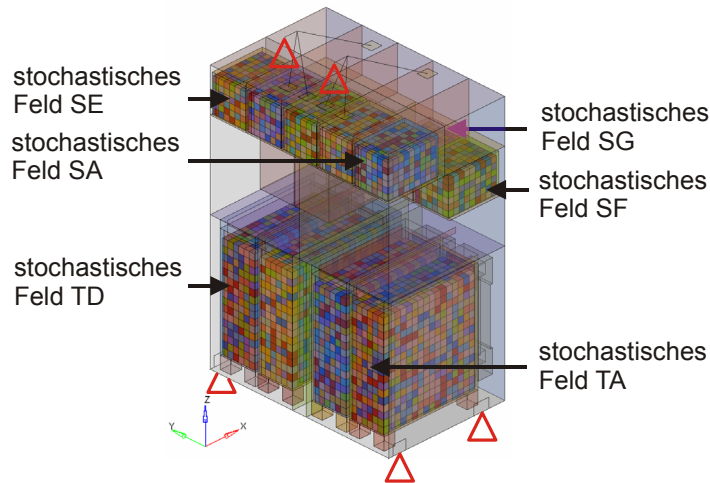


Abbildung 2.3: Bordküche mit stochastischen Feldern der Beladung

Im verwendeten Gleichungslöser LS-DYNA[®] werden die Elementeigenschaften entsprechend der Hierarchie in Abbildung 2.4 zugewiesen. Einem *PART kann nur jeweils eine Materialkarte zugeordnet werden. Durch die Modellierung der Beladungselemente mit stochastischen Feldern müssen für die Volumenelemente zusätzlich jeweils ein *MAT und ein *PART definiert werden.

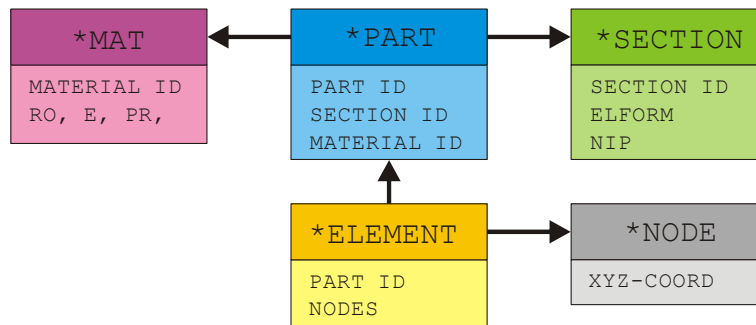


Abbildung 2.4: Organisationshierarchie in LS-DYNA[®]

Die stochastische Simulation umfasst 600 Stichproben, die auf einem Linux-HPC-Cluster berechnet werden. Das Sampling der Pseudozufallszahlen zur Beschreibung der stochastischen Felder und Prozesse erfolgt durch einen Latin-Hypercube-Algorithmus.

3 Ergebnisse

Die Verbindung der Bordküche mit der Struktur des Flugzeugs erfolgt über insgesamt acht Anbindungspunkte. An der Unterseite der Bordküche befinden sich Befestigungspunkte, die mit den Sitzschienen des Kabinenbodens verbunden sind. An der Oberseite besteht eine Verbindung über zwei so genannte Tie-Rods. Diese sind an einem Rumpfspant befestigt (Abbildung 2.3). Die Reaktionskräfte infolge der Beschleunigung werden über die acht Anbindungspunkte in die Flugzeugstruktur eingeleitet. Die Verteilungsdichten der maximalen Kräfte in x-Richtung an den acht Anbindungspunkten der Bordküche an die Flugzeugstruktur sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Für die Anbindungskräfte erhält man unimodale Verteilungen, die eine starke Ähnlichkeit mit Gaußschen Verteilungen aufweisen. In Abbildung 3.1 wird deutlich, dass die stärker belasteten Anbindungspunkte eine höhere Varianz der Maximalkräfte zeigen.

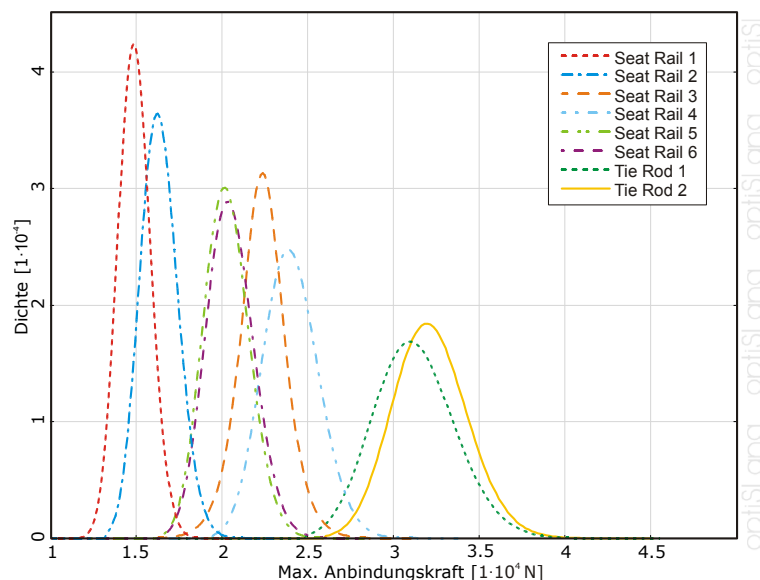


Abbildung 3.1: Verteilungsdichten der maximalen Anbindungskräfte

Eine Analyse der paarweisen Korrelationskoeffizienten ermöglicht die Ableitung der Zusammenhänge zwischen unsicheren Parametern und Systemantworten. Für die unsicheren Parameter der Beschleunigung ergeben sich im Frequenzbereich bis etwa 10 Hz schwache bis mittlere Korrelationen zwischen der Amplitude der Beschleunigung und den maximalen Strukturlasten. Insgesamt sind die Unsicherheiten der Beschleunigung von geringerem Einfluss auf die Strukturlasten als die Unsicherheiten der Beladung. Das Streudiagramm in Abbildung 3.2 zeigt die maximale Summe der Strukturlast über der Gesamtmasse der Bordküche. Zwischen den beiden Größen besteht eine schwache Rangkorrelation von $r_S \approx 0,19$. Eine statistische Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt einen starken Einfluss des Beladungszustandes auf die simulierten maximalen Strukturlasten. Eine detaillierte Untersuchung der Beladungszustände führt zu der Erkenntnis, dass die Massenverteilung und Steifigkeitsverteilung innerhalb der Trolleys und Standard Units einen stärkeren Einfluss auf die Strukturlasten haben als die Gesamtmasse.

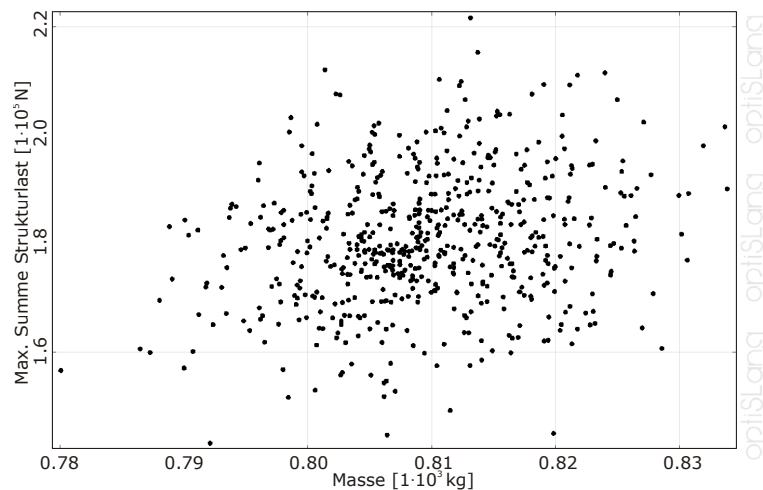


Abbildung 3.2: Streudiagramm der maximalen Strukturlast über der Masse

In Abbildung 3.3 sind die maximalen Elementdehnungen für die Beladung innerhalb der vier Trolleys für zwei unterschiedliche Simulationen dargestellt. Auf der linken Seite sind die Dehnungen für die Simulation mit höchster maximaler Summe der Anbindungskräfte dargestellt. Deutlich wird die starke Komprimierung der Elemente im vorderen Bereich der Beladung. Die Betrachtung der Elementeneigenschaften zeigt, dass die relativ weichen Elemente im vorderen Bereich durch die steiferen und massereicheren Elemente stark komprimiert werden. Auf der rechten Seite findet sich die korrespondierende Darstellung für die minimale Strukturlast. Analog zu den Steifigkeits- und Dichteverteilungen weisen die Elementdehnungen ein wesentlich homogeneres Gefüge auf.

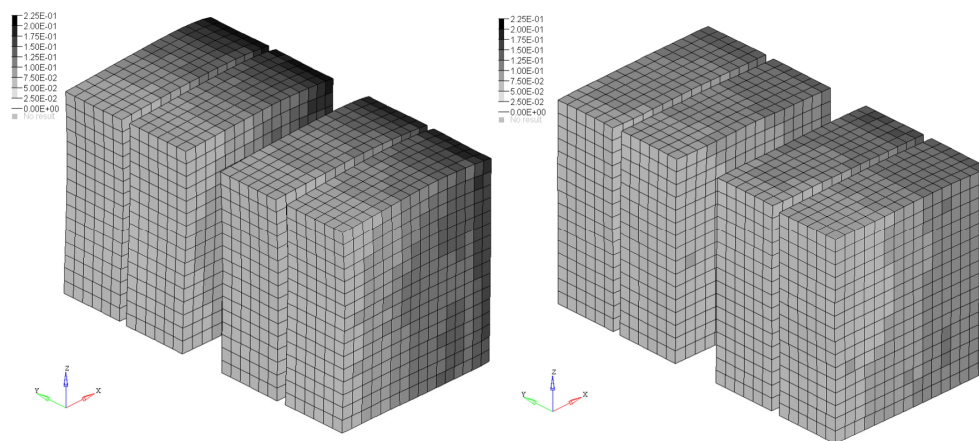


Abbildung 3.3: Elementdehnungen für Simulationen mit höchster (links) und niedrigster (rechts) Strukturlast

4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden stochastische Felder im Falle eines industriellen Beispiels der nichtlinear-dynamischen FE-Simulation angewendet. Für eine typische Bordküche eines modernen Langstreckenflugzeugs wurden Unsicherheiten der Beladung und der Belastungen durch stochastische Felder und Prozesse modelliert. Die Nutzung eines nicht-invasiven Ansatzes ermöglicht eine Anpassung an andere Beispiele oder die Verwendung unterschiedlicher kommerzieller Gleichungslöser. Die Analyse der Simulationsergebnisse zeigt einen starken Zusammenhang zwischen der Beladungsverteilung und den maximal auftretenden Strukturbelastungen an den Anbindungspunkten der Bordküche. Weiterhin können Frequenzen der Beschleunigung identifiziert werden, die einen vorrangigen Einfluss auf die Maximalkräfte haben. Die statistische Auswertung zeigt den starken Einfluss der Unsicherheiten auf die Simulationsergebnisse. Insbesondere die starke Streuung der maximalen Strukturlasten unterstreicht diese Einschätzung. Die Sensitivität des Systems gegenüber der Beladungsverteilung rechtfertigt die Anwendung stochastischer Felder zur Beschreibung der Unsicherheiten, da eine homogene Erhöhung der Beladungsmasse innerhalb der Trolleys und Standard Units einen weniger ausschlaggebenden Effekt zur Folge hätte. Die durchgeführte stochastische Simulation der Flugzeug-Bordküche führt zu neuen Erkenntnissen über mögliche Worst-Case-Szenarien und die Systemrobustheit.

Literatur

- BAYER, V. ; ROOS, D.: Non-Parametric Reliability Analysis using Random Fields and Robustness Evaluation. In: *Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 3.0*. Weimar, Germany : Dynardo GmbH, November 2006
- BUCHER, C.: *Introduction to Stochastic Structural Analysis*. Weimar, Germany : Bauhaus-Universität, Institute of Structural Mechanics, 2006
- GHANEM, R. G. ; SPANOS, P. D.: *Stochastic Finite Elements : A Spectral Approach*. New York, USA : Springer, 1991
- HALDAR, A. ; MAHADEVAN, S.: *Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis*. New York, USA : John Wiley & Sons, 2000
- LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION (LSTC) (Hrsg.): *LS-DYNA® Keyword User's Manual*. Livermore, USA : LSTC, 2007
- MARCZYK, J.: *Principles of Simulation-Based Computer-Aided Engineering*. Barcelona, Spain : FIM Publications, 1999
- VANMARCKE, E.: *Random Fields : Analysis and Synthesis*. Cambridge, USA : The MIT Press, 1983