

## Vorträge

# Zusammenspiel Simulation und Versuch bei der statistischen Absicherung der virtuellen Produktentwicklung

Johannes Will

# Zusammenspiel Simulation und Versuch bei der statistischen Absicherung der virtuellen Produktentwicklung

Johannes Will

DYNARDO GmbH, Weimar, Germany

## Summary:

Das Zusammenwirken von Simulation und Versuch ist ein zentraler Bestandteil der virtuellen Produktentwicklung. Nur durch immer prognosefähigere Simulationen kombiniert mit optimal geplanten Experimenten lassen sich die Herausforderungen des globalen Wettbewerbes bestehen. Lag in der Vergangenheit der Schwerpunkt hierbei auf der Prognose einzelner Experimente oder im Abgleich einzelner Experimente müssen heute bei Robustheitsbewertungen, Zuverlässigkeitsanalysen oder der Robust Design Optimierung ganze Variationsräume ermittelt, definiert, möglichst effizient berechnet und mit Experimenten abgeglichen und bestätigt werden.

Für den rechnerischen Nachweis der Robustheit der virtuellen Designs gegenüber in Natura anzutreffenden Streuungen werden zum Beispiel in der Automobilindustrie zunehmend Robustheitsbewertungen durchgeführt. Für eine realitätsnahe Definition aussagekräftiger Eingangsstreuungen von Robustheitsbewertungen sind Messungen und Erfahrungen aus dem Versuch extrem wichtig. Weil Robustheitsbewertungen in komplexen Systemen zahlreiche Parameter aufweisen, werden stochastische Methoden zum Abscannen der hochdimensionalen Variationsräume notwendig. Zeitgleich müssen die Kriterien des Abgleichs zwischen Experiment und Simulation sowie zur Bewertung der Robustheit virtueller Designstände um statistische Maße der Variation, Korrelation und Bestimmtheit erweitert werden.

Ein weiterer Aspekt des Beitrags ist ein Ausblick auf die Verwendung der statistischen Ergebnisgrößen stochastischer Analysemethoden für konkrete Maßnahmen im realen Design oder in der Versuchsdurchführung. Nachdem mit Robustheitsbewertungen erfolgreich experimentelle Phänomene aufgefunden und deren Ursachen identifiziert werden können, wird die Methodik zunehmend zur statistischen beziehungsweise stochastischen Absicherung in der virtuellen Produktentwicklung vor dem Experiment eingesetzt. Hier stellt sich die spannende Frage, wie die statistischen Größen, die bekanntermaßen mit Fehlern und Wahrscheinlichkeiten behaftet sind in den Entscheidungsprozeß von Designänderungen oder Versuchsdurchführung einfließen. Damit versucht der Beitrag einen Bogen vom Versuch über die Simulation bis zurück zum Versuch zu spannen.

## Keywords:

Rechnerische Robustheitsbewertung, streuende Variablen, Verteilungsfunktionen, Korrelationen, Stochastische Analyse, Zufallsfelder

## 1 Statistische Absicherung der virtuellen Produktentwicklung

Das Zusammenwirken von Simulation und Versuch ist ein zentraler Bestandteil der virtuellen Produktentwicklung. Lag in der Vergangenheit der Schwerpunkt hierbei auf der Prognose einzelner Experimente oder im Abgleich einzelner Experimente müssen heute bei Sensitivitätsstudien, Robustheitsbewertungen, Zuverlässigkeitsanalysen oder der Robust Design Optimierung ganze Variationsräume ermittelt, definiert, möglichst effizient berechnet und mit Experimenten abgeglichen und bestätigt werden. Für eine realitätsnahe Ermittlung und Definition aussagekräftiger Variationsräume sind Messungen und Erfahrungen aus dem Versuch extrem wichtig. Weil die Variationsräume in komplexen Systemen zahlreiche Parameter aufweisen oder weil Unsicherheiten und Streuungen berücksichtigt werden müssen, werden stochastische Methoden zum Abscannen der hochdimensionalen Variationsräume notwendig [1]. Zeitgleich müssen die Kriterien des Abgleichs zwischen Experiment und Simulation um statistische Maße der Variation, Korrelation und Bestimmtheit erweitert werden [2]. Werden stochastische Berechnungen durchgeführt spricht man bezüglich der Analysemethode von stochastischer, bezüglich der Ergebniswerte von statistischer Absicherung der virtuellen Produktentwicklung.

## 2 Stochastische Analysemethoden

Stochastische Analysemethoden erweitern die Diskretisierung der Problemstellung um die Unsicherheit (Streuung) der Eingangsgrößen und führen im Raum der Unsicherheiten mittels sogenannter Samplingmethoden stichpunktartig Berechnungen durch. Mittels statistischer Maße wird dann die Variation wichtiger Ergebnisgrößen beschrieben, es werden Wahrscheinlichkeiten von Überschreitungen ermittelt und es werden Korrelationen der streuenden Ergebnisgrößen zu den streuenden Eingangsgrößen gesucht [3,4]. Ursprung der stochastischen Analyseverfahren ist das Monte Carlo Verfahren (Plain Monte Carlo – PMC). Hier werden rein zufällig Stützpunkte im Raum der streuenden Variablen ausgewertet. Weil Plain Monte Carlo Verfahren abhängig von der Wahrscheinlichkeit des zu untersuchenden Phänomen beziehungsweise der Konfidenz der Korrelationsmaße extrem viele Stützstellen benötigen und die sich daraus ergebende Anzahl von Berechnungen zu kostspielig sind, werden in der virtuellen Produktentwicklung stochastische Verfahren verwendet, die lernfähig bezüglich der Versagensbereiche (Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse, wie FORM, ISPUD, Importance oder Adaptive Sampling) oder lernfähig bezüglich der Struktur der Stützstellen (Latin Hypercube Sampling) sind [5-9].

Der Termini Zuverlässigkeitsanalyse wird in der Literatur für stochastische Analysemethoden verwendet, wenn kleine Wahrscheinlichkeitsmaße zu berechnen und abzusichern sind. Der Termini Robustheitsbewertung wird für stochastische Analysemethoden verwendet, wenn die Sensitivität des virtuellen Design gegenüber den Eingangsstreuungen untersucht werden soll. Gewöhnlich werden dann keine kleinen Wahrscheinlichkeiten abgesichert und neben der Variation von Ergebnisgrößen sollen die Zusammenhänge (Korrelationen) zwischen streuenden Eingangs- und Ergebnisgrößen ermittelt werden. Weil der Berechnungsaufwand effizienter Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse unter Anderem stark von der Anzahl der berücksichtigten streuenden Variablen abhängt, sind Robustheitsbewertungen zur Identifikation der wichtigen streuenden Variablen in der Regel eine notwendige Vorstufe der Zuverlässigkeitsanalyse.[9]

### 2.1 Robustheitsbewertungen in der virtuellen Produktentwicklung

Robustheitsbewertungen sind in aller Regel der erste Schritt bei der Einführung stochastischer Analysemethoden in die virtuelle Produktentwicklung [10]. Die statistischen Ergebnisgrößen der Variation von Ergebnisgrößen virtueller Design sind das Produkt aus Übertragungsfunktion (Simulationsmodell) und der Definition des Raums der streuenden Eingangsgrößen. Damit ist die Definition der streuenden Ergebnisgrößen der essentielle Input stochastischer Analyse und die erste Schnittstelle zum Versuch beziehungsweise zur Qualitätssicherung, der die Streuung von Eingangsgrößen mit Versuchen erfasst. In der Folge wird deshalb diskutiert, wie Eingangsstreuungen erfasst, extrahiert und in der stochastischen Analyse integriert werden.

### 3 Zusammenspiel von Versuch und Simulation zur Berücksichtigung streuender Größen in der virtuellen Produktentwicklung

#### 3.1 Extraktion einzelner streuender Größen und Integration in die virtuelle Produktentwicklung

Einzelne streuende Ergebnisgrößen wie zum Beispiel Fließgrenze oder Zugfestigkeit eines metallischen Werkstoffs werden häufig durch Mindest- und Maximalwerte angeben oder es werden aus Messungen Mittelwert und Standardabweichung extrahiert. Samplingverfahren der stochastischen Analyse benötigen darüber hinaus eine Definition von Verteilungsfunktionen. Die Übersetzung des vorhandenen Wissens über mögliche beziehungsweise gemessene Streuungen ist deshalb häufig der erste Arbeitsschritt einer Robustheitsbewertung.

Idealerweise sind Versuchsergebnisse vorhanden, diese können eingelesen werden und es kann mittels eines best fit (Kolmogorov Koeffizient) eine Verteilungsfunktion in die Versuchsdaten gefittet werden (Abbildung1).

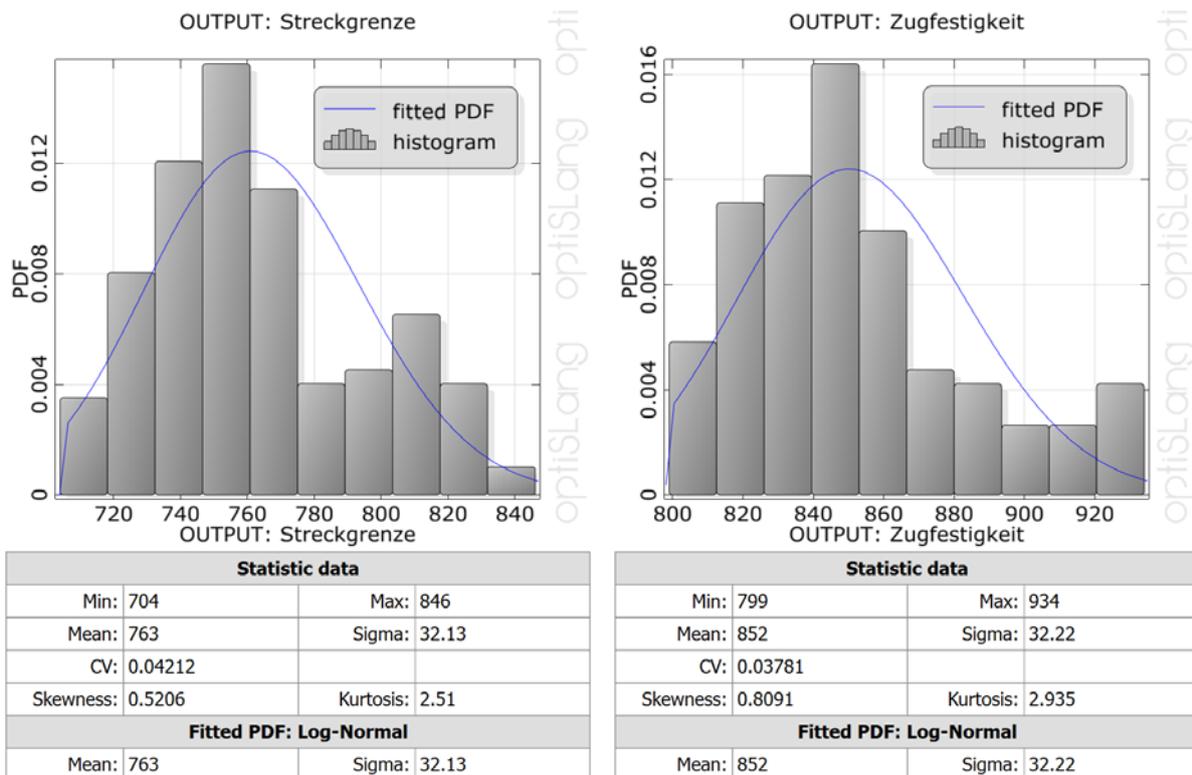


Abbildung 1 Fit von Verteilungsfunktionen in einen Versuchsdatensatz, Streckgrenze und Zugfestigkeit

Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass es im Sinne der Absicherung gegenüber möglichen Eingangsstreuungen ratsam ist, nicht nur gegen einzelne Stichprobensets von Messungen abzusichern und die Annahmen der möglichen Eingangsstreuungen aufzuweiten und damit im Sinne der Absicherung konservative Werte für die Streuungen anzunehmen. Häufig kann zum Beispiel beobachtet werden, dass im Laufe der Produktion unterschiedliche Streuungen der Eingangswerte zum Beispiel aus unterschiedlichen Lieferungen gemessen werden können. Abhängig von der Motivation der statistischen Absicherung kann diese Aufweitung gemessener Streuungen zum Beispiel auch Einkaufsbedingungen berücksichtigen.

OUTPUT: Streckgrenze vs. OUTPUT: Zugfestigkeit, (linear)  $r = 0.729$

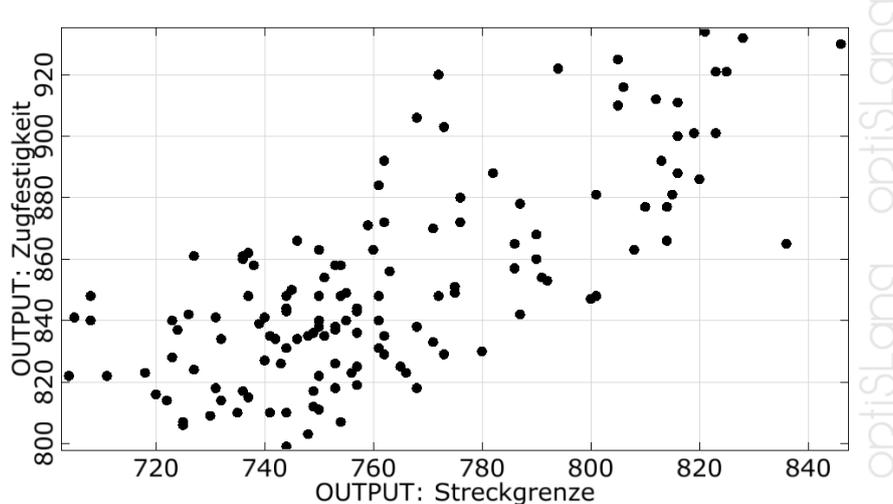


Abbildung 2 Ermittlung linearer Korrelation ( $r=0.729$ ) zwischen zwei streuenden Eingangsvariablen, hier Fließgrenze und Zugfestigkeit

Neben der Definition der Verteilungsfunktion ist zu prüfen, ob Korrelationen zwischen einzelnen streuenden Variablen zu vorhanden sind. Wiederum am Beispiel metallischer Werkstoffe soll das Beispiel der Korrelation von Fließgrenze und Zugfestigkeit angeführt werden (Abbildung 2). Spielen beide Eingangsgrößen bei der Beschreibung des plastischen Materialverhaltens eine Rolle, muss sowohl die Streuung der einzelnen Größen als auch die Korrelation zwischen beiden berücksichtigt werden und das Werkzeug der stochastischen Analyse muss in der Lage sein die Korrelation aus Versuchsdaten zu extrahieren und beim Samplingverfahren der stochastischen Analyse zu berücksichtigen.

### 3.2 Extraktion räumlich korrelierter streuender Größen und Integration in die virtuelle Produktentwicklung

Man spricht von räumlich korrelierten Größen, wenn der Wert der Eingangsgröße signifikant von einer Raumkoordinate abhängt. Nimmt man zum Beispiel die Wandstärke umgeformter Blechbauteile, ist diese Größe von der Ausdünnung im Umformprozess abhängig und die Ausdünnung ist sehr unterschiedlich über das Bauteil verteilt. Diese Überlegung lässt sich im Extremfall auf jede Eingangsgröße übertragen, so ist hat auch die geometrische Abweichung eines Gussbauteiles von der Idealform eine räumliche Struktur oder der Elastizitätsmodul an jeder Stelle im Blechbauteil ist ein anderer. Die Signifikanz der räumlichen Korrelation, ob diese räumliche Variationen von Geometrie oder Struktureigenschaften einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisgrößen haben, muss im Zweifelsfall überprüft werden. Es sei darauf hingewiesen, dass der Trend zu immer detaillierter Abbildung der CAE Modellierung dazu führt, dass räumliche Korrelationen von Struktureigenschaften immer wichtiger werden.

#### 3.2.1 Integration räumlich korrelierter deterministischer Größen in virtuelle Modelle

Folgerichtig werden heute zum Beispiel in der Strukturcrashanalyse der Automobilindustrie im Zweifelsfall die räumliche Verteilung von Blechdicke und verfestigter Fließgrenze wichtiger Blechteile berücksichtigt. Die Dickenverteilungen werden hier aus Simulationen der Umformprozesse ermittelt und auf die Diskretisierungen der Crashvernetzung gemappt (Abbildung 3), die räumliche Verteilung wird hier also innerhalb der virtuellen Simulation ermittelt und übertragen.

Es gibt heute auch schon Beispiele wo Diskretisierungen virtueller Modelle auf gemessene Größen gemappt werden, wie zum Beispiel die Berücksichtigung gemessener Toleranzen von Rohkarossen für Strukturcrashlastfälle oder die Berücksichtigung gemessener Dicken von Gussbauteilen für Komfortuntersuchungen von Bremsensystemen. Die räumliche Verteilung der geometrischen Abweichung von der Sollgeometrie wird mittels 3D-Lasermessung aufgenommen und die FE-Schalen oder Volumendiskretisierungen wird in die Messpunkte gemappt und in das virtuelle Produkt

eingebaut. Mittels Nachrechnungen wird dann überprüft, ob die Abweichungen von der idealisierten Geometrie des virtuellen Prototypen nennenswert Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben.

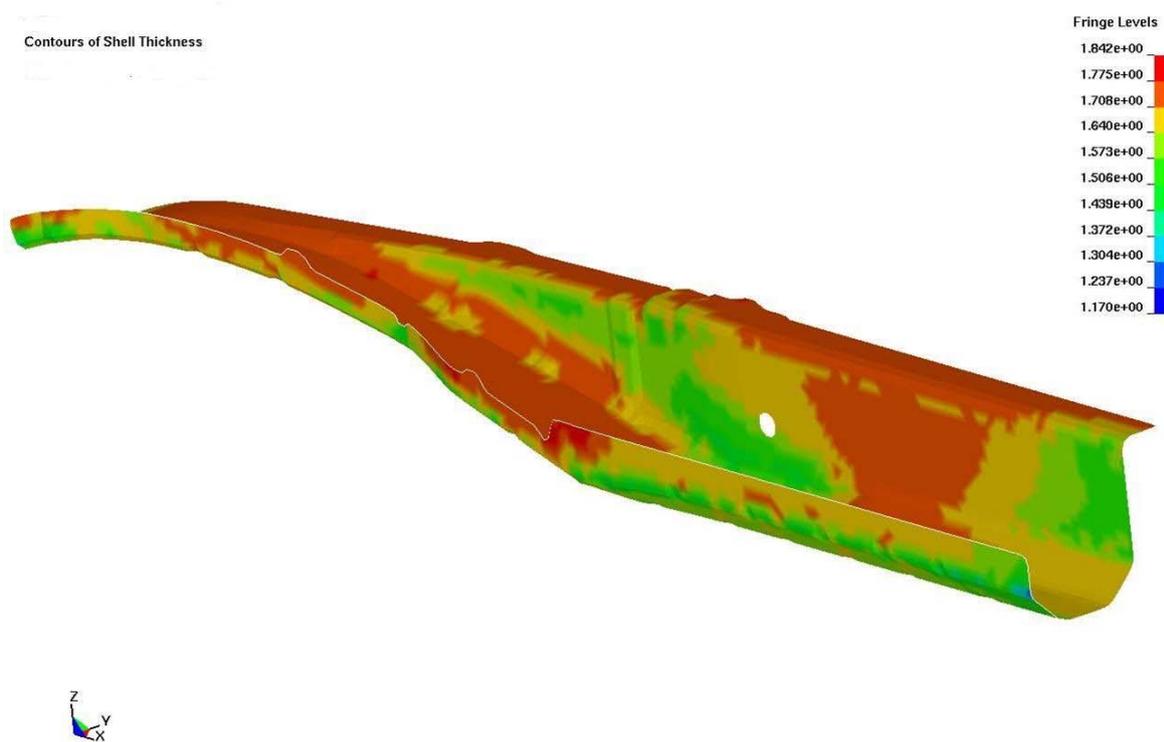


Abbildung 3 räumliche Verteilung der Ausdünnung einer deterministischen Umformsimulation gemappt auf das FE-Netz einer Crashsimulation

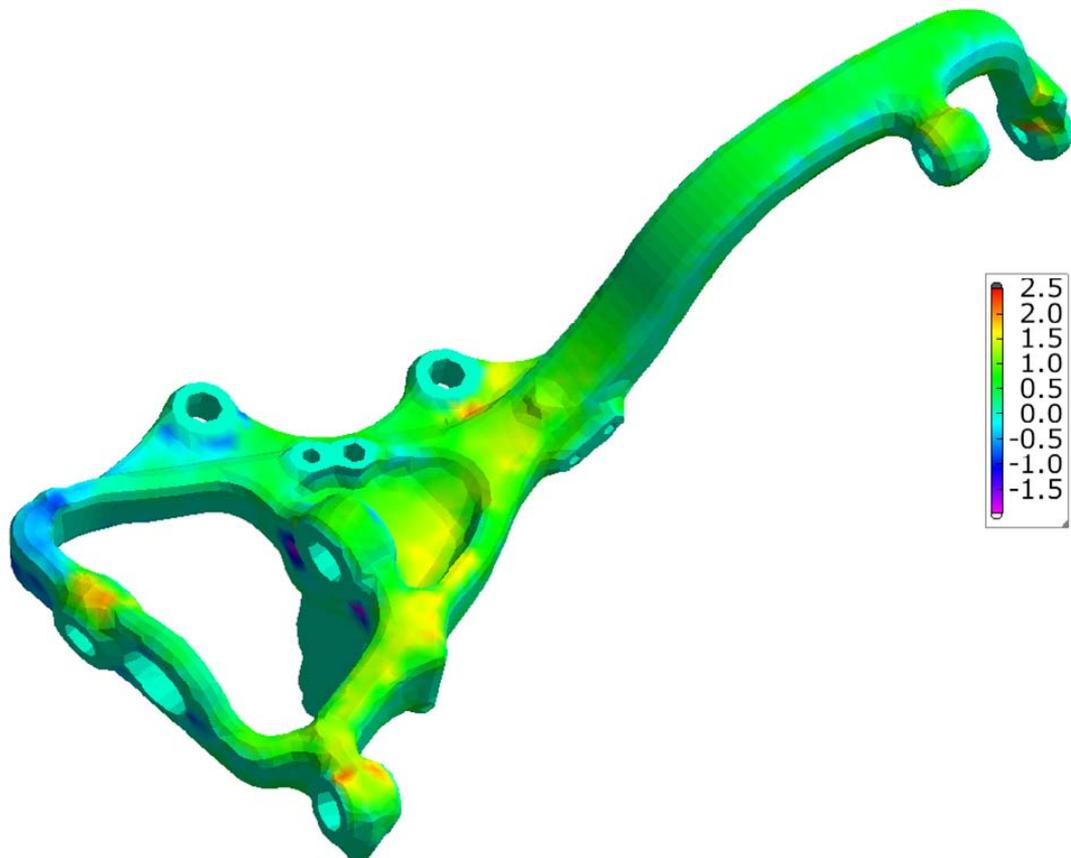


Abbildung 4 Räumliche Verteilung von Toleranzen eines Gussbauteiles aus einer Bauteilvermessung, dargestellt als Differenz zwischen idealer und gemessener Geometrie

### 3.2.2 Integration der Streuung räumlich korrelierter Größen in rechnerische Robustheitsbewertungen

Können durch die Berücksichtigung simulierter bzw. vermessener räumlicher Korrelation von Eingangsgrößen nennenswerte Differenzen der Ergebnisgrößen schon für einzelne Realisierungen der Bauteile beobachtet werden, stellt sich die Frage, wie stark die Streuung der räumlich korrelierten Eingangsgrößen auf die Ergebnisgrößen wirkt. Diese Fragestellung kann mit Robustheitsbewertungen untersucht. Neben den Streuungen einzelner Eingangsgrößen werden dann auch Streuungen der räumlich korrelierten Eingangsgrößen berücksichtigt.

Eine mögliche Vorgehensweise ist es n-Bauteile zu vermessen, beziehungsweise zu simulieren und per Zufallsgenerator in der Robustheitsbewertung zu verwenden. Diese Vorgehensweise erlaubt es allerdings nur die daraus resultierende Variation der Ergebnisgrößen zu bestimmen. Typischerweise resultieren die Streuungen räumlich korrelierter Größen aus verschiedenen Ursachen. Um in diesem Fall Korrelationen bestimmen zu können, muss eine Parametrisierung der räumlich korrelierten Streuungen eingeführt werden.

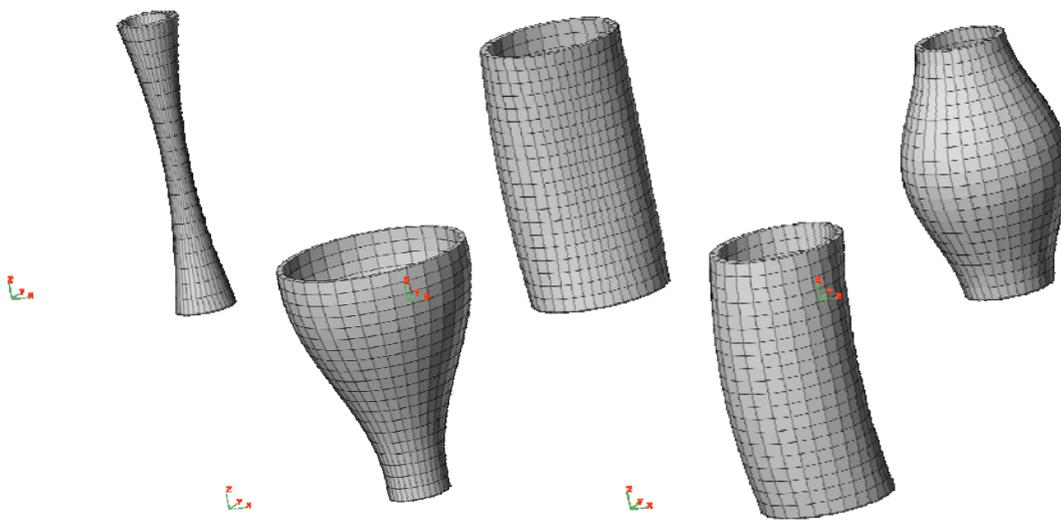


Abbildung 5 Parametrisierung geometrischer Streuungen eines Zylinder mittels Zufallsfelder

Zur Parametrisierung streuender räumlich korrelierter Variablen kann die Theorie der Zufallsfelder verwendet werden. Dahinter steht die Annahme, dass die resultierende Streuung sich aus n-möglichen Formen (Abbildung 5) mit n-streuenden Amplituden zusammensetzt. Diese Formen können aus mehreren Messungen der Streuungen mittels Schätzung von Kovarianzmatrizen und Korrelationslängen ermittelt werden. Aus den n-möglichen Formen können ähnlich der Selektion wichtiger Modalformen über den Abfall von Partizipationsfaktoren die für die gemessene Variation wichtigen Zufallsfelder und ihre zufälligen Amplituden extrahiert werden. Mittels dieser Parametrisierung der Zufallsfelder können dann n-Realisierungen von Bauteilen simuliert werden, die in Summe der Statistik der gemessenen Bauteile entsprechen (Abbildung 6). Diese Parametrik erlaubt es in der Korrelationsanalyse der Robustheitsbewertung, diejenigen Formen zu identifizieren, welche für die Ergebnisvariation verantwortlich sind. Mit dieser Vorgehensweise können wichtige Formen der Streuung räumlich korrelierter Größen aus n-Messungen beziehungsweise aus n-Prozesssimulationen ermittelt werden. Im günstigen Fall kann aus den Formen auf die zu Grunde liegenden Mechanismen geschlossen, die zur Streuung führen geschlossen werden.

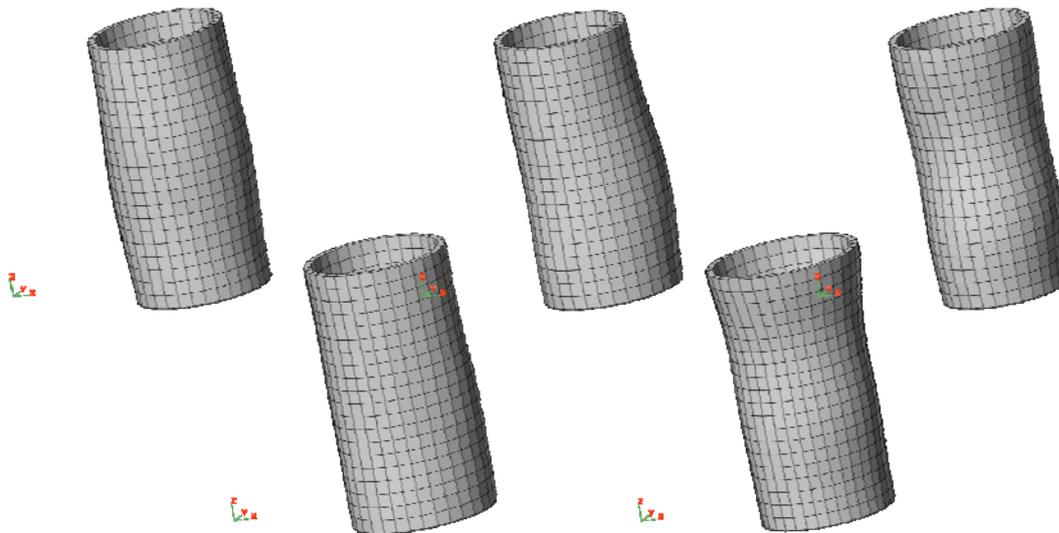


Abbildung 6 Realisierung der imperfekten Struktur aus n-Zufallsfeldern mit n-zufälligen Amplituden

#### 4 Suche einzelner Versuchsergebnisse im Variationsraum der Robustheitsbewertung

Heute werden in der virtuellen Produktentwicklung zu festgelegten Zeitpunkten Validierungs- und Absicherungsversuche durchgeführt. Es passiert immer wieder, dass in Experimenten Phänomene festgestellt werden können, die in einzelnen virtuellen Vorausberechnungen nicht beobachtet worden sind und es stellt sich die Frage ob Eingangsstreuungen dafür verantwortlich sind. Dann wird mittels Robustheitsbewertungen untersucht, ob Streuungen von Materialgrößen, Umweltbedingungen oder von Testrandbedingungen als Ursachen identifiziert werden können.

Wurden in der Vergangenheit einzelne Simulationen mit einzelnen Messungen verglichen, so ermöglichen Robustheitsbewertungen den Vergleich des Streubandes der Robustheitsbewertung mit dem Vergleich einzelner oder mehrerer Versuchswerte. Dabei wird erwartet, dass jeder einzelne Versuch im Streuband der Robustheitsbewertung liegt. Ist das nicht der Fall, werden vom Simulationsmodell noch nicht alle physikalischen Phänomene ausreichend gut berücksichtigt oder der in Natura vorhandene Raum der Eingangsstreuungen ist noch nicht vollständig beschrieben. Somit kann im Umkehrschluss überprüft werden, ob experimentelle Phänomene, die bisher in einzelnen Berechnungen der virtuellen Prototypen nicht nachvollzogen werden können ihre Ursachen in den Eingangsstreuungen haben. Robustheitsbewertungen zum Auffinden von Versuchspänomenen stehen häufig am Anfang der Integration stochastischer Berechnungen in virtuelle Produktentwicklungsprozesse.

#### 5 Ableitung von Maßnahmen im realen Design, auf die Versuchsplanung und die virtuelle Produktentwicklung

Nachdem mit Robustheitsbewertungen erfolgreich experimentelle Phänomene aufgefunden und deren Ursachen identifiziert werden können, wird die Methodik zunehmend zur statistischen beziehungsweise stochastischen Absicherung in der virtuellen Produktentwicklung vor dem Experiment eingesetzt. Dann werden die statistischen Ergebnisgrößen für konkrete Maßnahmen im Simulationsmodell, im realen Design oder in der Versuchsdurchführung verwendet. Hier stellt sich die spannende Frage, wie die statistischen Größen, die bekanntermaßen mit Fehlern und Wahrscheinlichkeiten behaftet sind in den Entscheidungsprozeß von Designänderungen oder Versuchsdurchführung einfließen.

Wie im Abschnitt 3.1 ausgeführt wurde, sind bei Robustheitsbewertungen konservative, tendenziell zu große Eingangsstreuungen zu empfehlen. Deshalb bedeuten Überschreitungen von Zielkriterien mit kleinen Wahrscheinlichkeiten (z.B. 1 oder 2%) nicht zwangsläufig Überschreitungen dieser Zielkriterien in der Realität. Eher sind kleine Überschreitungen so zu interpretieren, dass die Sicherheitsabstände knapp bemessen sind. Mittels Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse können Überschreitenswahrscheinlichkeiten in den Unterräumen der wichtigen streuenden Variablen mit

möglichst präzisen Eingaben zu den tatsächlich auftretenden Eingangsstreuungen genauer abgeschätzt werden. Mit oder ohne Verifizierung der Wahrscheinlichkeiten können die Ergebnisse der Robustheitsbewertung zum Anlass genommen werden Sicherheitsabstände gezielt zu erhöhen.

Treten Überschreitungen von Zielkriterien mit hoher Wahrscheinlichkeit auf (z.B. >10%) und sind die Annahmen zu den dafür verantwortlichen Eingangsstreuungen in Realität zu erwarten, sind Designänderungen zur Erhöhung der Sicherheitsabstände zu empfehlen. Im Anschluss an Designmaßnahmen empfiehlt es sich mittels einer Robustheitsbewertung die erzielte Verbesserung zu bestätigen.

Für den folgenden Absicherungsversuch im realen Design kann das Wissen um die wichtigen Eingangsstreuungen verwendet werden, um die Versuchsplanung so zu optimieren, dass die interessanten Bereiche des Robustheitsraumes versuchstechnisch abgesichert werden.

Das generierte Wissen welche Eingangsstreuungen für die Performancekriterien wichtig sind, kann zur Ableitung von Bemessungslastfällen für die virtuelle Produktentwicklung verwendet werden. Diese Bemessungslastfälle werden dann typischerweise für kritische Konfigurationen von Testrandbedingungen oder ungünstige Konfigurationen von Materialparametern durchgeführt und sichern bei Einhaltung der Zielkriterien gewünschte Sicherheitsabstände. In gleicher Art und Weise kann das Wissen um typische Streumaße von Performancekriterien in der Folge verwendet werden, um Sicherheitsabstände für deterministische Bemessungslastfälle unter Verwendung von Mittelwerten festzulegen.

## 6 References

- [1] Will, J.: Variation Analysis as Contribution to the Assurance of Reliable Prognoses in Virtual Product Development, Proceeding NAFEMS Seminar "Reliable Use of Numerical Methods in Upfront Simulations" March 2007, Wiesbaden,
- [2] Will, J.: The Calibration of Measurement and Simulation as Optimization Problem, Proceeding NAFEMS Seminar Virtual Testing – Simulationsverfahren als integrierter Baustein einer effizienten Produktentwicklung April 2006, Wiesbaden, Germany
- [3] Will, J.; Bucher, C.: Robustness Analysis in Stochastic Structural Mechanics, Proceedings NAFEMS Seminar Use of Stochastics in FEM Analyses; May 2003, Wiesbaden
- [4] Will, J.; Bucher, C.: Statistische Maße für rechnerische Robustheitsbewertungen CAE-gestützter Berechnungsmodelle, Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 3.0, 2006, Weimar, Germany ([www.dynardo.de](http://www.dynardo.de))
- [5] U. Bourgund, C. Bucher: „Importance Sampling Procedure Using Design Point (ISPUD) – a Users Manual, Bericht Nr. 8-86, Institut für Mechanik, Universität Innsbruck, 1986
- [6] C. Bucher: "Adaptive Sampling – An Iterative Fast Monte Carlo Procedure" Structural Safety 5, Nr. 2, 1988
- [7] C. Bucher, M. Macke: "Response Surfaces for Reliability Assessment", [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)
- [8] R. Rackwitz, B. Fissler: "Structural reliability under combined under combined random load sequences", Computers and Structures 9, S. 489-494, 1988
- [9] Roos
- [10] Will, J: Introduction of robustness evaluation in CAE-based virtual prototyping processes of automotive applications; Proceedings EUROMECH colloquium Efficient Methods of Robust Design and Optimization, September 2007, London
- [11] Will, J.; Menke, T.; Stühmeyer, A.: Rechnerische Robustheitsbewertungen von Umformprozessen; Proceedings Internationale Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“, 2006, 9./10. Mai, Stuttgart, Germany
- [12] Will, J.; Frank, T.: Robustness Evaluation of crashworthiness load cases at Daimler AG; Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 5.0, 2008, Weimar, Germany ([www.dynardo.de](http://www.dynardo.de))
- [13] Will, J.; Baldauf, H.: Integration rechnerischer Robustheitsbewertungen in die virtuelle Auslegung passiver Fahrzeugsicherheit bei der BMW AG, VDI-Berichte Nr. 1976, Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, 2006, Seite 851-873
- [14] optiSLang - the Optimizing Structural Language, Version 3.0, DYNARDO, Weimar, 2008, [www.dynardo.com](http://www.dynardo.com)
- [15] SoS - Statistics\_on\_Structure, Version 1.0, DYNARDO 2007, Weimar, [www.dynardo.com](http://www.dynardo.com)