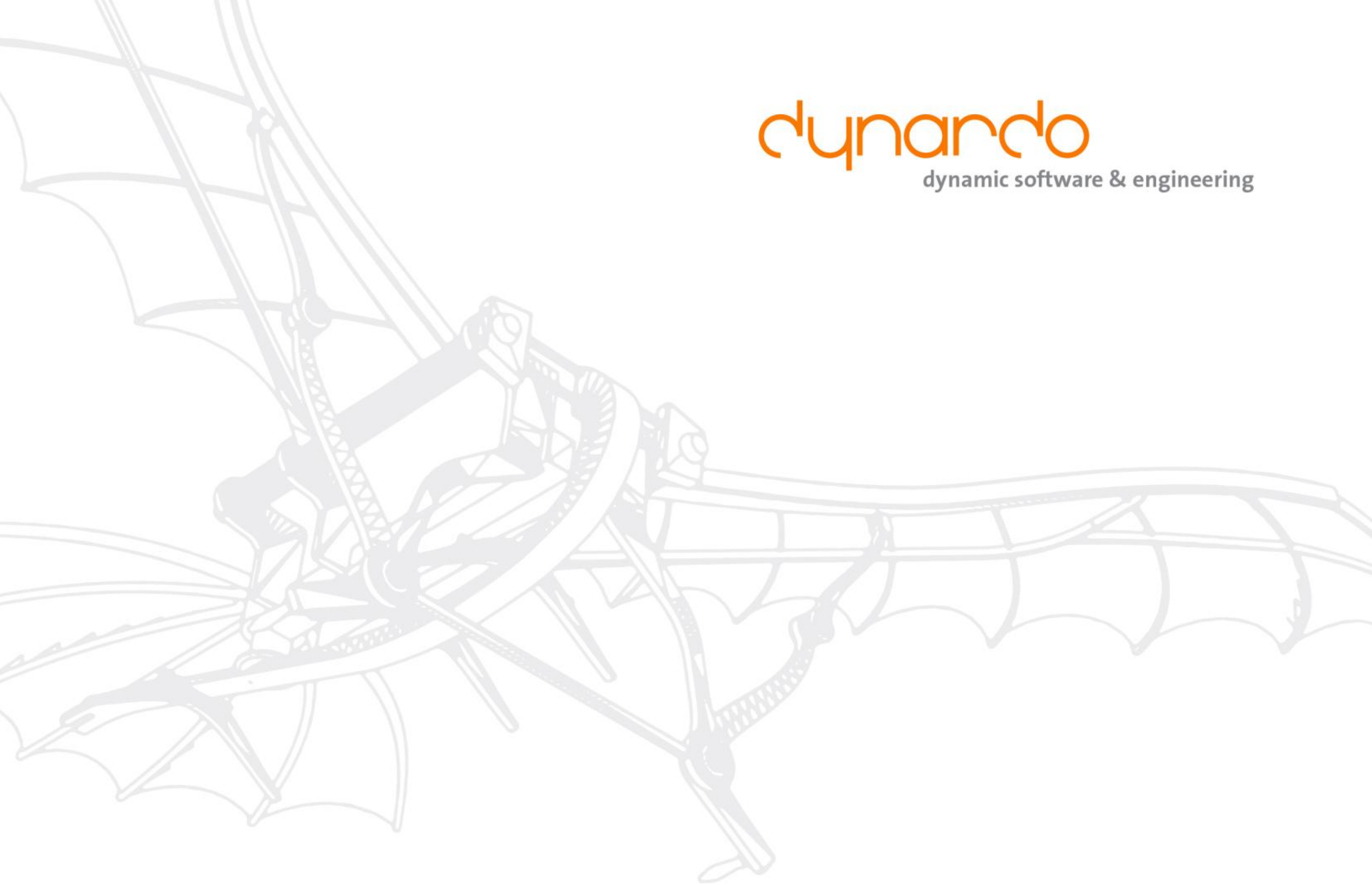

dynardo
dynamic software & engineering

Vorträge

Zufallsfelder in der Robustheits- und Zuverlässigkeitsbeurteilung von Bauteilen

Veit Bayer & Johannes Will

präsentiert auf der Simvec VDI Conference 2010
Quelle: www.dynardo.de/de/bibliothek

Zufallsfelder in der Robustheits- und Zuverlässigkeitsbeurteilung von Bauteilen

Random Fields in Robustness and Reliability Assessment of Structural Parts

Dr.-Ing. **Veit Bayer**, Dr.-Ing. Johannes Will, dynardo GmbH, Weimar

Kurzfassung

Es wird gezeigt, wie die Methodik der Zufallsfelder für Robustheits- und Zuverlässigkeitsanalysen im Rahmen der virtuellen Prototypentwicklung genutzt werden kann. Damit können räumlich streuende Daten untersucht werden, die durch Simulation eines Herstellungsprozesses mit zufälligen Parametern oder durch Messungen gewonnen werden. Durch Zerlegung des Zufallsfelds ist es möglich, verschiedene Ursachen der Streuung zu isolieren und deren räumliche, globale oder lokale Auswirkung auf die Struktur zu erkennen. Andererseits können mit Zufallsfeld - Parametrik imperfekte Strukturen mit räumlich verteilten zufälligen Eigenschaften, z.B. Herstellungstoleranzen von Umformbauteilen, generiert werden und der Einfluss der Imperfektionen von Bauteilen in Robustheitsbewertungen im Gesamtsystem, z.B. einer Crashberechnung untersucht werden. Die Ergebnisse der Robustheitsbewertung geben Aufschluss über die Sensitivität der Produktperformance gegenüber bestimmten Imperfektionsformen streuender Bauteile und ermöglichen in der Folge die Formulierung von Qualitätsanforderungen. Es werden Methoden gezeigt, wie Zufallsfelder parametrisiert werden und auf Basis der Parametrik die Zahl der Zufallsvariablen bei möglichst geringem Informationsverlust stark reduziert werden kann. Es werden verschiedene Anwendungen kurz vorgestellt und eine ausführliche Darstellung für die räumlich streuenden Verformungen eines Kfz - Bauteils infolge einer Crashsimulation mit zufälligen Parametern gegeben.

Abstract

It is demonstrated how the methodology of random fields can be exploited successfully for robustness and reliability analyses in the scope of virtual prototyping. One application is to analyse spatially scattering data, which are gained from simulated manufacturing processes with random parameters, or from measurements. A suitable decomposition of the data, interpreted as random field, allows for isolating different causes of scatter and observing their global or local spatial impact on the analysed structure. On the other hand, by simulation of

modelled random fields, imperfect structures with spatially random properties such as manufacturing tolerances from sheet metal forming can be generated for subsequent robustness assessment of the imperfect structures, e.g. in a crash analysis. The results of the robustness analysis give insight into the sensitivity of the structure towards certain shapes of imperfection, which, in turn, enables the formulation of quality requirements. Methods are introduced of how to parameterize random fields and how to reduce the number of random parameters drastically, while retaining as much of information as possible. A few application examples are sketched briefly. A more detailed example shows the analysis of random deformations of a car part, obtained from crash simulations with random parameters.

1. Einführung

Die Entwicklung von Bauteilen im Automobilbau oder im Bereich hochwertiger Konsumgüter zeigt zwei wesentliche Trends. Zum einen werden immer mehr Bauteile oder auch ganze Strukturen mit numerischen Methoden optimiert. Zum anderen wird die Herstellung von Prototypen zur experimentellen Qualifizierung von Bauteilen immer weiter reduziert und durch Methoden des *virtual prototyping* ersetzt. Weil in der Produktentwicklung häufig an Grenzen gegangen wird tendieren optimierte Strukturen dazu sensitiv gegenüber Streuungen, natürlichen Materialstreuungen oder Herstellungstoleranzen zu reagieren, wenn diese Streuungen nicht im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Zur Sicherung der Produktqualität, Vermeidung von Rückrufen und Einhaltung von Sicherheitsanforderungen ist die Optimierung durch Untersuchungen der Robustheit und Zuverlässigkeit zu begleiten. Unter der varianzbasierten Robustheitsuntersuchung versteht man i.A. die Sicherstellung einer geringen Sensitivität des Bauteils bzw. Bauteilverhaltens gegenüber streuenden Einflüssen in einem Bereich relativ hoher Wahrscheinlichkeiten, während die Zuverlässigkeitsanalyse die Absicherung gegenüber dem seltenen Ereignis des Ausfalls darstellt. Versuche an Prototypen sind auf Grund des geringen Stichprobenumfangs allein nicht in der Lage, hierüber Aussagen zu treffen. Deshalb werden zunehmend stochastische Analysen in die virtuelle Produktentwicklung eingeführt [1], [2].

Für belastbare Ergebnisse aus stochastischen Untersuchungen sind die zufälligen Einflussgrößen möglichst realistisch zu modellieren. Für räumlich verteilte Größen wie z.B. Materialeigenschaften oder Geometrieabweichungen ist die Methodik der Zufallsfelder anzuwenden. Was ist, anschaulich betrachtet, ein Zufallsfeld? Eine physikalische oder geometrische Größe, deren Definitionsbereich die betrachtete Struktur ist, nimmt an jedem Punkt der Struktur einen zufälligen Wert an. Anders ausgedrückt, der Wert der Größe an einem betrachteten

Punkt ist eine Zufallsvariable. Die Variablen an verschiedenen Orten sind allerdings zueinander korreliert. Benachbarte Punkte haben eine hohe Korrelation, das heißt sie nehmen zwar zufällige, aber ähnliche Werte an. Die Korrelation nimmt typischerweise mit dem Abstand zweier Punkte ab.

Eine punktweise oder bereichsweise Betrachtung mit Hilfe einzelner CAD- bzw. FE - Parameter ist i.d.R. nicht ausreichend. Einzelne Modellparameter können solche räumlichen statistischen Verteilungen nicht abbilden. Eine zufällige Variation eines Geometrieparameters beispielsweise erzeugt von der Topologie her stets ähnliche Strukturen, keine zufällige Fluktuation der Geometrie. Dagegen ist es durch Analyse von vermessenen oder durch Simulation des Herstellungsprozesses mit zufälligen Parametern erzeugten imperfekten Strukturen möglich, wie später gezeigt wird, eine Parametrik auf Basis der Zufallsfeldmethodik zu erzeugen, welche die Imperfektionen realistisch abbildet.

Die Methodik der Zufallsfelder erlaubt es einerseits, die Ursachen räumlicher Streuungen, insbesondere der räumlichen Zusammenhänge zu analysieren. Hierfür bietet die dynardo GmbH mit SoS (*Statistics on Structure*) ein einfach bedienbares Werkzeug an [3]. Andererseits können mittels Zufallsfeldern imperfekte Strukturen simuliert und einer weiteren Untersuchung zugeführt werden, als Ersatz für Experimente. Dazu muss allerdings die statistische Charakteristik bekannt sein. Für Sensitivitätsstudien sind dabei Modellannahmen auf der Basis weniger Messwerte meist ausreichend. Auch hierfür entwickelt dynardo Software, die bereits im Prototypstadium erfolgreich angewendet wird. Mit dem Softwarepaket können der gesamte Prozess der CAE-basierten Robustheitsbewertung von der Simulation von Herstellungstoleranzen (z.B. Blechumformung) bis zur Varianzanalyse der Bauteilperformance abgebildet werden und wiederum Rückschlüsse von der streuenden Performance zu den Eingangsstreuungen gezogen werden.

Im Folgenden werden typische Anwendungen kurz skizziert. In den Abschnitten 3. ff. werden der theoretische Hintergrund von Zufallsfeldern, deren Parametrik, sowie Möglichkeiten der Analyse und Synthese aufgezeigt.

2. Anwendung von Zufallsfeldern in der Robustheits- und Zuverlässigkeitsanalyse

Für das Achsschenkelgelenk eines PKW wurde in [4] untersucht, inwieweit Herstellungstoleranzen das Schwingungsverhalten des Bremssystems und damit die Neigung zum Quietschen beeinflussen. Es stand nur eine Messung zur Verfügung, die bereits signifikante Ab-

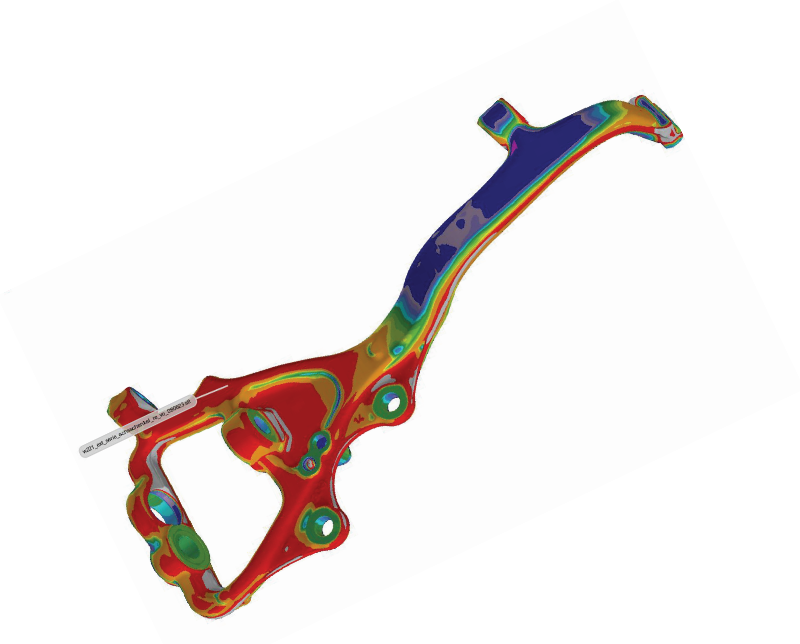

Bild 1: Gemessene Geometrie eines PKW - Achsschenkelgelenks.

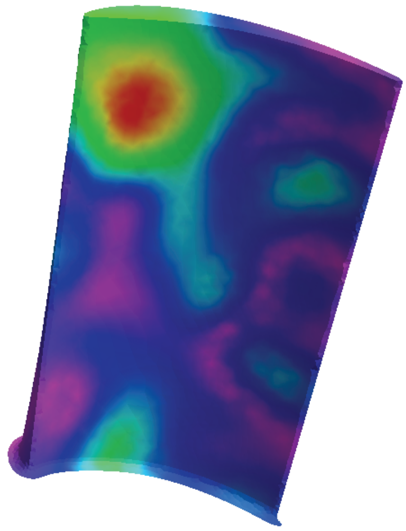

Bild 2: Turbinenschaufel mit Zufallsfeld - Realisation der imperfekten Oberfläche.

weichungen von der CAD Geometrie aufwies, Bild 1. Auf Basis dieser Messung wurde ein realistisches Modell eines Zufallsfelds gebildet. Es zeigte sich in manchen Frequenzbereichen ein signifikanter Einfluss auf das Quietschverhalten. Das heißt, dass die Geometrieabweichung dieses Bauteils in der Robustheitsbeurteilung des Komfortverhaltens des Bremssystems berücksichtigt werden muss.

In [5] wurde eine Studie über die zuverlässigkeitsbasierte Optimierung einer Turbinenschaufel durchgeführt, Bild 2. In die Robustheitsuntersuchung des optimalen Designs wurden neben Geometrie-, Material- und Betriebsparametern auch Herstellungstoleranzen der Schaufel berücksichtigt, die als Zufallsfeld modelliert wurden. Für die anschließende Zuverlässigkeitsanalyse wurde die Zustandsfunktion mit dem adaptiven Antwortflächenverfahren [6] approximiert. Da effektive Verfahren für die Zuverlässigkeitsberechnung empfindlich gegenüber der Dimension sind, musste die Zahl der zufälligen Parameter reduziert werden. Dazu wurde nach der Robustheitsuntersuchung der Einfluss aller Variablen auf die Zuverlässigkeitskriterien durch das *Metamodel of optimal Prognosis* [7], [8] untersucht und nur die wichtigsten Variablen ausgewählt. Dabei erwiesen sich auch einige Zufallsfeld - Parameter als relevant.

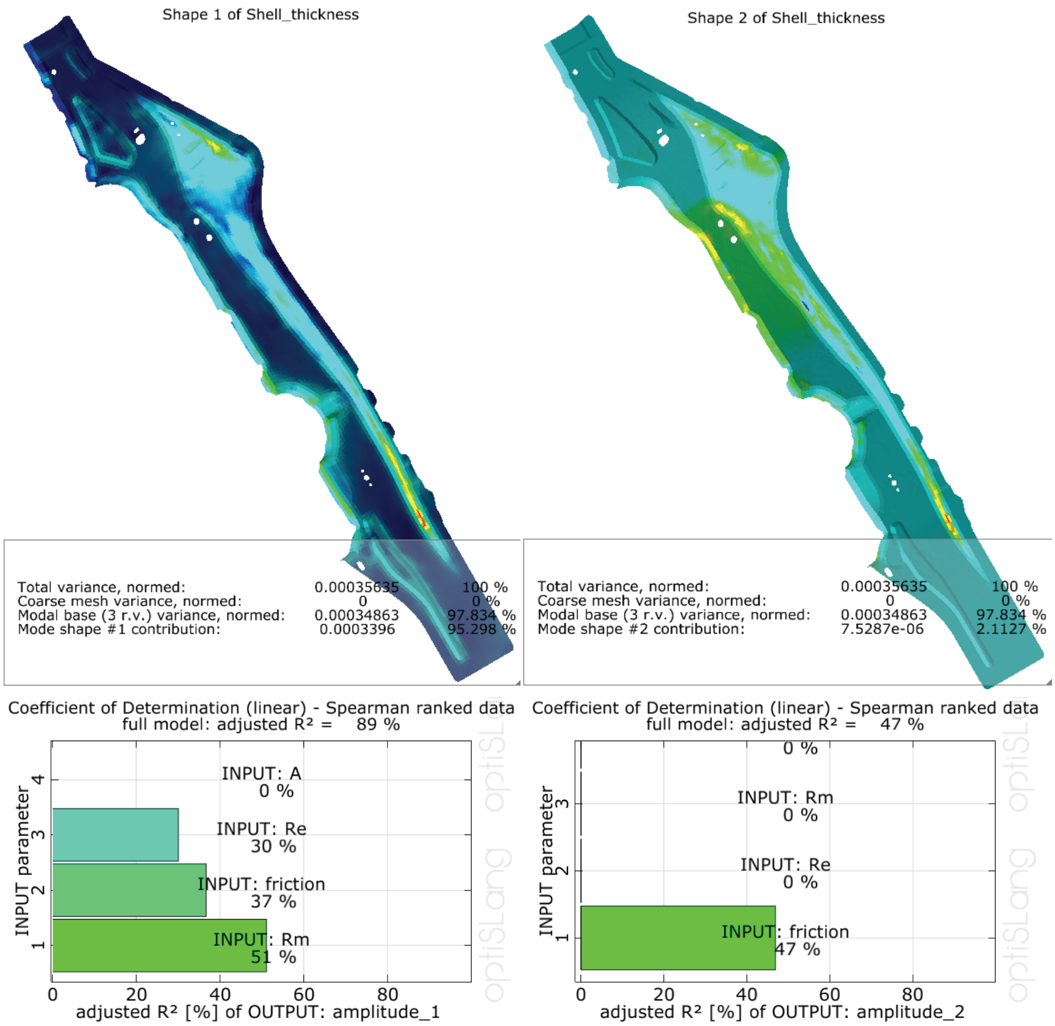

Bild 3: Umformbauteil: Erste zwei Streuformen der Blechdicke und deren Abhängigkeit von Herstellungsparametern.

Wie erwähnt kann die Zufallsfeld - Parametrik auch dazu verwendet werden, die Ursachen von streuenden Bauteileigenschaften zu untersuchen. Die Simulation eines Blechumformprozesses mit zufälligen Prozessparametern resultiert in streuenden Blechdicken, die entsprechend der in Abschnitt 3 erläuterten Parametrik in Streuformen zerlegt werden. Bild 3 zeigt zwei der Streuformen, typisch sind lokal sehr begrenzte Effekte. Darunter sind jeweils die statistischen Zusammenhänge (als *Coefficient of Determination* [1]) zwischen den Amplituden der Streuformen und den Prozessparametern dargestellt. Deutlich sind die Einflüsse einzelner Prozessparameter auf verschiedene Streuformen. So können die räumlichen Einflüsse der Eingangsgrößen auf die Ergebnisse der Simulation isoliert werden. Im weiteren Verlauf der Untersuchung werden die Imperfektionen auf das FE-Netz der Crashberechung übertragen und damit die streuende Bauteilperformance ermittelt.

3. Zufallsfelder

Ein Zufallsfeld ist eine Funktion, welche auf den räumlichen Koordinaten einer Struktur definiert ist und deren Wert an jedem Ort eine Zufallsvariable ist. Die Variablen an unterschiedlichen Orten können miteinander korreliert sein. Die Mittelwerte aller Variablen werden durch die Mittelwertsfunktion über dem Ort beschrieben, die Streuungen und Korrelationen durch die Autokovarianzfunktion. Unter der vereinfachenden Annahme, dass alle Zufallsvariablen normal verteilt sind, beinhalten Mittelwerts- und Autokovarianzfunktion die vollständige stochastische Beschreibung des Zufallsfelds [9]. Zur Verarbeitung auf dem Computer ist die Zufallsfunktion zu diskretisieren, z.B. an den Knoten oder Elementmittelpunkten des zu Grunde liegenden Strukturmodells. Die Zufallsvariablen werden im Vektor $\mathbf{X}$ zusammengefasst. Damit geht die Mittelwertsfunktion in den Mittelwertsvektor über, die Kovarianzen zwischen den diskreten Punkten werden in der Kovarianzmatrix $\mathbf{C}_{XX}$ zusammengefasst. Letztere stellt allein die Charakterisierung der zufälligen Fluktuation dar. Die Mittelwerte werden vor der weiteren Analyse von gegebenen Daten abgezogen bzw. bei der Modellierung zunächst außer Acht gelassen und bei der Zuführung von simulierten Realisationen zu einer Strukturanalyse wieder addiert, um physikalisch korrekte Werte zu erhalten.

Für die Analyse und Simulation des Zufallsfelds müssen durch eine geeignete Transformation statistisch äquivalente, jedoch unabhängige Zufallsvariablen gefunden werden. Sie ergeben sich aus der Karhunen - Loève - Entwicklung der Kovarianzmatrix [10]. Dazu wird mit der Kovarianzmatrix eine Eigenwertzerlegung vorgenommen:

$$\mathbf{\Psi}^T \mathbf{C}_{XX} \mathbf{\Psi} = \mathrm{diag}\{\lambda_i\} \tag{4.1}$$

In obiger Gleichung ist $\mathbf{\Psi}$ eine Matrix mit den spaltenweise einsortierten Eigenvektoren, $\mathrm{diag}\{\lambda_i\}$ enthält die korrespondierenden Eigenwerte. Für die Eigenwertanalyse sind Standardalgorithmen verwendbar. Mit dem originalen Zufallsvektor $\mathbf{X}$ und der Modalmatrix $\mathbf{\Psi}$ wird ein neuer Zufallsvektor $\mathbf{Y}$ definiert:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{\Psi}^T \mathbf{X} \tag{4.2}$$

Die Komponenten Y_i sind unkorreliert, normal verteilt, und ihre Standardabweichungen sind durch die Eigenwerte der Kovarianzmatrix gegeben: $\sigma_{Y_i} = \sqrt{\lambda_i}$.

Für eine Simulation des Zufallsfelds werden zunächst Realisationen der Zufallsvariablen $\mathbf{Y}$ generiert. Diese werden durch Umkehrung der Transformation Gl. (4.2) in den Raum der physikalisch sinnvollen Originalvariablen $\mathbf{X}$ projiziert:

$$\mathbf{X} = \mathbf{\Psi} \mathbf{Y} \tag{4.3}$$

Somit erhält man eine Darstellung des Zufallsfelds, diskretisiert dargestellt im Zufallsvektor $\mathbf{X}$, durch Summation deterministischer Formfunktionen – den Eigenvektoren $\boldsymbol{\psi}_i$, welche durch die Realisationen der zufälligen Amplituden Y_i skaliert sind. Für die weitere Analyse werden mit den Realisationen von $\mathbf{X}$ imperfekte Strukturen erzeugt, abhängig von der Aufgabenstellung durch Knotenverschiebung, Änderung der Elementeigenschaften etc. und im Format des Referenz - FE - Modells ausgegeben.

Sind streuende Daten der Struktur gegeben, z.B. durch Messung oder Simulation des Herstellungsprozesses, können durch die Beziehung (4.2) die zugehörigen Stichproben der Amplituden rekonstruiert werden. Wie in Abschnitt 5 gezeigt, werden mit Hilfe von Robustheitskriterien die wichtigsten Zufallsvariablen und zugehörigen Imperfektionsformen identifiziert. So ist die Ermittlung von „hot spots" auf der Struktur und eine Analyse ihrer Ursachen möglich.

4. Datenreduktion

Der Aufstellung und Eigenwertzerlegung der i.A. voll besetzten Kovarianzmatrix sind durch Speicherplatz und Rechenzeit Grenzen gesetzt. Deshalb sind Maßnahmen der Datenreduktion notwendig, sowie Kriterien der Größenordnung des damit verbundenen Informationsverlusts. In SoS wird optional eine Vergröberung des Strukturmodells auf Basis der Polygonreduktion [11] durchgeführt. Die Übertragung der Daten vom Referenznetz auf das vergröberte Raster erfolgt durch lokale gewichtete Mittelung. Für die Darstellung der Auswertungsergebnisse auf dem Referenzmodell werden diese wiederum durch geeignete Interpolation (*Moving Least Squares Regression* [12]) zurück übertragen.

In der Analyse von Zufallsfeldern zeigt sich, dass die Eigenwerte der Kovarianzmatrix, die von Eigenwertlösern nach Größe sortiert ausgegeben werden, typischerweise eine stark abfallende Tendenz haben. Das bedeutet, dass Eigenwerte höherer Ordnung nur noch einen geringen Beitrag zur gesamten Fluktuation des Zufallsfelds leisten. Dies macht man sich zu Nutze, um die Dimension der Aufgabe zu reduzieren, indem die Reihenentwicklung Gl. (4.3) abgeschnitten wird. Die Qualität der Näherung wird durch die *variability fraction* [13] dargestellt:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{N_\lambda} \lambda_i}{\mathrm{trace}(\mathbf{C}_{XX})} \; ; \quad 0 < Q \leq 1 \tag{5.1}$$

Sie muss bei unterschiedlichen Netzen auf die Dimension des jeweiligen Netzes bezogen werden:

$$\begin{gathered}\frac{\sum\limits_{i=1}^{N_\lambda}\lambda_i}{\mathrm{trace}(\mathbf{C}_{XX})} \equiv \frac{\sum\limits_{i=1}^{N_\lambda}\lambda_i \Big/ \dim(\mathbf{C}_{XX})}{\mathrm{trace}(\mathbf{C}_{XX}) \Big/ \dim(\mathbf{C}_{XX})}\\ \frac{\sum\limits_{i=1}^{N_\lambda}\lambda_i}{\sum\limits_{j=1}^{N_{\mathrm{supports}}}\sigma_j^2} \Rightarrow \frac{\sum\limits_{i=1}^{N_\lambda}\lambda_i \Big/ \dim(\mathbf{C}_{XX})}{\sum\limits_{j=1}^{N_{\mathrm{supports}}}\sigma_j^2 \Big/ N_{\mathrm{supports}}}\end{gathered} \tag{5.2}$$

In obigen Formeln repräsentiert die Spur der Kovarianzmatrix die Summe der Varianzen an allen N_{supports} Stützstellen des Zufallsfelds, während die Summation der Eigenwerte die Gesamtstreuung der bei N_λ abgeschnittenen Reihenentwicklung der Kovarianzmatrix ergibt.

5. Anwendungsbeispiel

An Hand einer Robustheitsbewertung eines Crashlastfalls soll die Analyse räumlich streuender Daten mit Hilfe der Methodik der Zufallsfelder demonstriert werden. In [14] wurde eine stochastische Robustheitsuntersuchung der Karosserie eines PKW durchgeführt. In einem frühen Entwicklungsstadium wurde ein Beulphänomen untersucht, das mit deterministischen rechnerischen Untersuchungen nicht nachvollzogen werden konnte. In der stochastischen Analyse trat das Phänomen mit geringer Wahrscheinlichkeit auf. Nach Analyse der Ursachen konnte es durch konstruktive Verbesserungen abgestellt werden. Hier werden nun weitergehende Auswertungen mit SoS [3] vorgestellt. Ziel ist es mit Hilfe der Zufallsfeldparametrik die Streuform zu ermitteln und die dafür verantwortlichen Eingangsstreuungen zu identifizieren.

Das FE-Modell des Bauteils besteht aus 4914 Knoten und 4826 Schalenelementen. In der stochastischen Robustheitsuntersuchung werden Parameter des Reparaturcrash - Lastfalls als streuende Eingangsgrößen eingeführt, außerdem streuende Struktureigenschaften wie z.B. Blechdicken und Fließgrenzen. Die räumlich korrelierten streuenden Eigenschaften (Bauteildicke und Verfestigung) werden wiederum nach einer Robustheitsuntersuchung des Blechumformprozesses festgelegt. Es wurden in der Simulation 150 Strukturen mit streuenden Eigenschaften erzeugt und für den Crashlastfall berechnet. Bild 4 zeigt die Maxima der plastischen Dehnungen nach dem Aufprall aus allen simulierten Lastfällen. Mit dieser Darstellung wird der kritische Bereich sofort sichtbar: Im linken Drittel des Trägers sind deutlich die Spitzen der Plastifizierung erkennbar, die mit dem Beulphänomen [14] korrespondieren. In den grau hinterlegten Bereichen treten keine Streuungen auf, da diese nicht plastisch ver-

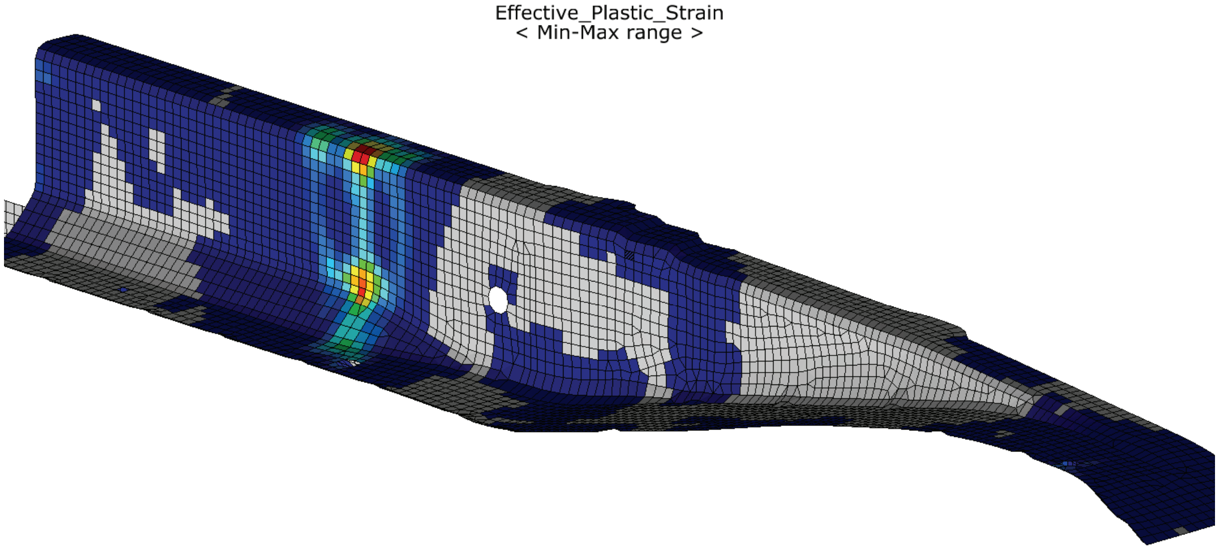

Bild 4: Maxima der plastischen Dehnungen nach Reparaturcrash.

formt wurden.

Der andere Vorteil und die Besonderheit der Zufallsfeld - Betrachtung liegt darin, dass die einzelnen Imperfektionsformen (Eigenvektoren der Kovarianzmatrix, Gl. (4.1) ff.) isoliert und der Relevanz bzw. Größenordnung nach bewertet werden können und deren Ursachen, d.h. ihre statistische Abhängigkeit von den Eingangsstreuungen analysiert werden können. Dazu werden die plastischen Dehnungen wie in Abschnitt 3 beschrieben in einzelne Streuformen zerlegt. Bild 5 zeigt die erste Eigenform, der mit der korrespondierenden zufälligen Amplitude bereits über 96% der Gesamtstreuung entsprechend Gl. (5.1) ff. abdeckt. Deutlich wird, dass diese Streuform auch einen wesentlichen Anteil des auch in Bild 4 erkennbaren lokalen Effekts abbildet, was mit anderen Reihenentwicklungen nicht erreichbar ist. Die folgenden Eigenformen erfassen noch 1,2% und 0,8%. Das bedeutet, dass mit nur 3 Zufallsvariablen statt ursprünglich 4826 (ein zufälliger Wert pro Element) 98% der Streuung der plastischen Dehnungen erfasst werden.

Mit Hilfe der Beziehung (4.2) wird eine Stichprobe der ersten Amplitude erzeugt und in optiSLang [8] weiter untersucht. Mit Hilfe des *Metamodel of optimized Prognosis* [7] werden eine Untermenge der insgesamt 55 Eingangsparameter und ein Funktional automatisch ermittelt, um für die erste Amplitude eine optimale Approximationsfunktion aufzustellen. Die Approximationsgüte *Coefficient of Prognosis* (CoP) wird bestimmt, indem für eine Teilmenge der Stützstellen das Bestimmtheitsmaß, also das Quadrat der Korrelation zwischen Appro-

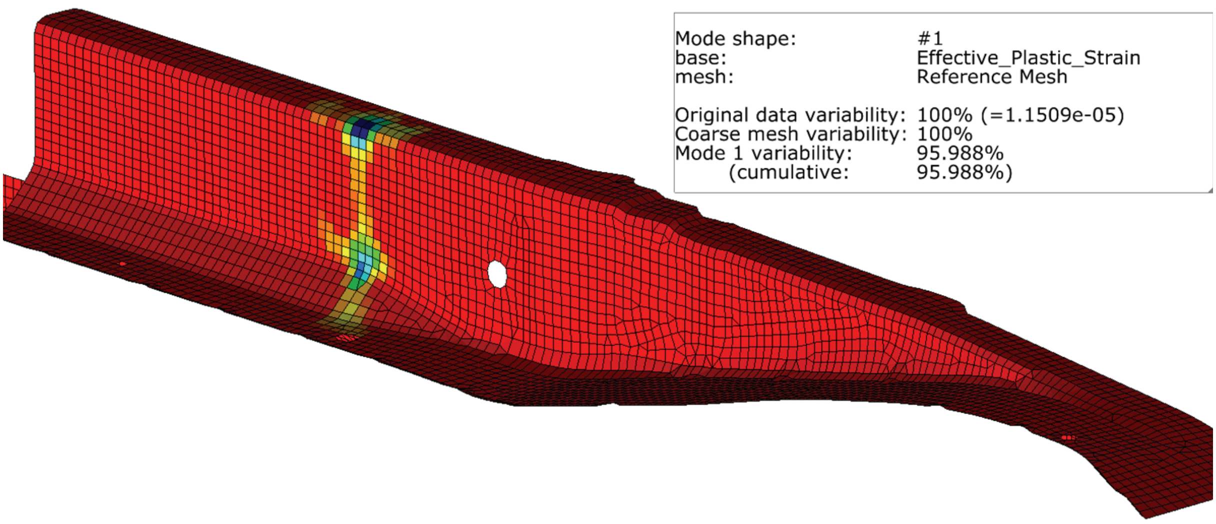

Bild 5: Erste Eigenform der plastischen Dehnungen.

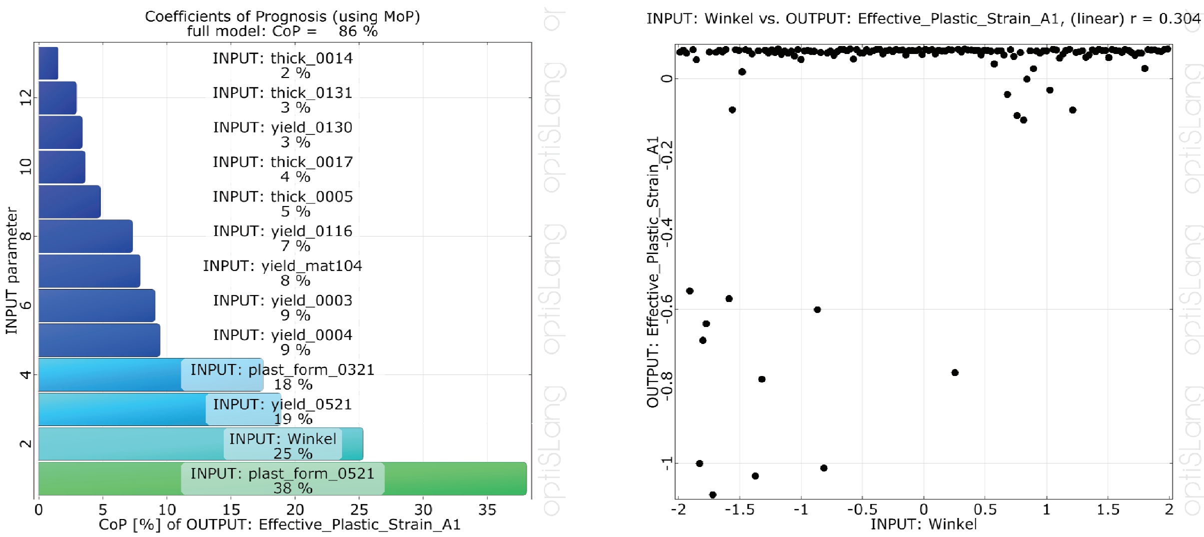

Bild 6, links: CoP des Metamodells für die Amplitude der ersten Streuform.

Rechts: Streuung der ersten Amplitude über dem Anprallwinkel.

ximation und den Daten berechnet wird. Dies erlaubt eine Reihung der Einflussgrößen, dargestellt links in Bild 6. Den größten Einfluss üben die Streuungen der plastischen Dehnungen (Verfestigung) nach dem Umformprozess, des Anprallwinkels, sowie der Fließspannung des Blechs aus. Die rechte Darstellung in Bild 6 zeigt, wie kleine bzw. negative Anprallwinkel betraglich große Amplituden erzeugen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Es wird dargelegt, wie die Theorie der Zufallsfelder im Rahmen der virtuellen Prototypentwicklung genutzt werden kann. Varianzbasierte Robustheitsuntersuchungen, z.B. von Herstellungsprozessen, erzeugen räumlich verteilte zufällige Eigenschaften der betrachteten Bauteile. Sie können durch Simulation eines Herstellungsprozesses mit zufälligen Parametern bestimmt werden oder durch Messungen gewonnen werden. Durch Interpretation der Daten als Zufallsfeld und Zerlegung mit Hilfe der Karhunen - Loève Entwicklung, Abschnitt 3, wird eine Parametrik der räumlichen Streuungen gewonnen. Aus den Formfunktionen der Reihenentwicklung lassen sich u.U. Mechanismen erkennen. Durch statistische Zusammenhänge der zugehörigen Amplituden mit den Eingangsgrößen lassen sich verschiedene Ursachen der Streuung isolieren, wie im Anwendungsbeispiel in Abschnitt 5, demonstriert wird. Auf Basis der räumlichen Daten oder durch geeignete Modellannahmen können Zufallsfelder modelliert und simuliert werden. Diese Parametrik der streuenden Eigenschaften kann als Eingangsinformation einer Robustheitsbewertung der Strukturanalysen verwendet werden. Damit kann die Sensitivität eines Bauteils oder einer Baugruppe auf Imperfektionen von räumlich verteilten streuenden Größen wie Geometrie, oder Materialeigenschaften untersucht werden. Die Untersuchung der Imperfektionsform erlaubt wiederum Rückschlüsse auf die Ursachen und ermöglicht die Formulierung von Qualitätsanforderungen.

Dynardo bietet mit SoS (Statistics on Structure) eine Software für die Analyse räumlich streuender Daten an. Statistische Parameter werden direkt auf der Referenzstruktur dargestellt. Dazu ist der Import von Strukturmodellen und Ergebnisdaten aus verschiedenen gängigen FE - Programmen möglich. Neben dem reinen Postprocessing der Daten können auch statistische Zusammenhänge der Ergebnisse zu den Eingangsgrößen dargestellt werden. Für weitere Analysen, insbesondere weiterführende statistische Untersuchungen, ist der Export verschiedener Daten nach optiSLang möglich. Die Verwaltung verschiedener Netze in SoS, z.B. für das Einlesen von Messdaten oder zum Übertragen von Daten zwischen verschiedenen Netzen (etwa aus der Umformsimulation und der Crashberechnung) ist einer der nächsten Entwicklungsschritte. Ferner werden vorhandene Algorithmen zur Simulation von Zufallsfeldern in SoS implementiert. Damit soll die Prozesskette von der stochastischen Analyse der Herstellungssimulation bis zur Robustheitsbewertung der Performance des imperfekten Bauteiles in der Strukturanalyse mit Zufallsfeldern geschlossen werden. So können verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten innerhalb einer nutzerfreundlichen Oberfläche realisiert werden.

7. Referenzen

[1] Bucher, C.: Basic concepts for robustness evaluation using stochastic analysis. EUROMECH Colloq. Efficient Methods of Robust Design and Optimization. London 2007.

[2] Will, J.: State of the Art - robustness in CAE-based virtual prototyping processes of automotive applications. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 4.0. Weimar 2007.

[3] SoS – Statistics on Structure, User's Manual Version 2.3.0. Dynardo GmbH, Weimar 2010.

[4] Nunes, R. F.; Will, J.; Bayer, V.; Chittepu, K.: Robustness Evaluation of brake systems concerned to squeal noise problem. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 4.0. Weimar 2007.

[5] Roos, D.; Einzinger, J.; Bayer, V.: Robust Design Optimization applied to Structural, Thermal and Fluid Analysis including Manufacturing Tolerances. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 6.0. Weimar 2009.

[6] Bayer, V.; Roos, D.; Adam, U.: Structural Reliability Analysis by Random Field Modeling with Robustness Methods and Adaptive Response Surfaces. Proc. 11th Int. Conf. on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. St. Julians, Malta 2007.

[7] Will, J.; Most, T.: Metamodel of optimized Prognosis (MoP) - an automatic approach for user friendly parameter optimization. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 6.0. Weimar 2009.

[8] optiSLang – the Optimizing Structural Language, User's Manual Version 3.1. Dynardo GmbH, Weimar 2009.

[9] Vanmarcke, E.: Random Fields: Analysis and Synthesis. Cambridge: MIT Press 1983.

[10] R. Ghanem and P.D. Spanos. Stochastic Finite Elements - a Spectral Approach. New York, Berlin: Springer 1991.

[11] Melax, S.: A simple, fast and effective polygon reduction algorithm. Game Developer (November 1998) S. 44-49.

[12] Most, T.; Bucher, C.: A moving least square weighting function for the elementfree galerkin method which almost fulfills essential boundary conditions. Structural Engineering and Mechanics 21 (2005) S. 315-332.

[13] Brenner. C.E.: Ein Beitrag zur Zuverlässigkeitsanalyse von Strukturen unter Berücksichtigung von Systemuntersuchungen mit Hilfe der Methode der Stochastischen Finite Elemente. Dissertation. Leopold Franzens Universität Innsbruck 1995.

[14] Will, J.; Frank, T.: Rechnerische Robustheitsbewertung von Strukturcrashlastfällen bei der Daimler AG. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 5.0. Weimar 2008.