

Robustheitsbewertungen bezüglich der virtuellen Auslegung passiver Fahrzeugsicherheit

Johannes Will^{1*}, Hans Baldauf²

¹ DYNARDO – Dynamic Software and Engineering GmbH, Weimar

² BMW AG, München

Zusammenfassung

Eine der wichtigsten Aufgabenstellungen der Fahrzeugentwicklung ist die stetige Verbesserung der passiven Sicherheitssysteme. Hierfür werden von Gesetz und Verbraucherschutz definierte Aufprallszenarien in der virtuellen Produktentwicklung vorausberechnet und in verschiedenen Testphasen am Fahrzeug verifiziert. In den Crashtests können bei wichtigen Performancegrößen der Rückhaltesysteme erhebliche Streuungen festgestellt werden. Ursache hierfür sind Streuungen von Eingangsgrößen, sowohl Größen der Auslegung passiver Sicherheitssysteme sowie der Fahrzeugstruktur, der Lasten als auch der Testbedingungen. Eine Berücksichtigung von Eingangsstreuungen in der virtuellen Produktentwicklung als auch eine wirtschaftliche Auslegung der Rückhaltesysteme gegenüber akzeptablen Überschreitenswahrscheinlichkeiten streuender Performancegrößen kann nur durch eine Integration stochastischer Betrachtungs- und Simulationsmethoden in die virtuelle Produktentwicklung erreicht werden. Im ersten Teil werden notwendige Randbedingungen einer erfolgreichen Integration rechnerischer Robustheitsbewertungen für den virtuellen Entwicklungsprozess der Auslegung der passiven Fahrzeugsicherheit sowie der Stand der Umsetzung bei der BMW AG diskutiert. Im zweiten Teil werden exemplarisch an Beispielen rechnerische Robustheitsbewertungen vorgestellt.

Keywords: rechnerische Robustheitsbewertung, stochastische Analyse

* Kontakt: Dr.-Ing. Johannes Will, DYNARDO – Dynamic Software and Engineering GmbH, Luthergasse 1d, D-99423 Weimar, E-Mail: johannes.will@dynardo.de

1 Einführung

Eine der wichtigsten Aufgabenstellungen der Fahrzeugentwicklung ist die stetige Verbesserung der passiven Sicherheitssysteme. Hierfür werden von Gesetz und Verbraucherschutz definierte Aufprallszenarien in der virtuellen Produktentwicklung vorausberechnet und in verschiedenen Testphasen am Fahrzeug verifiziert. In der Vergangenheit wurden bei der virtuellen Auslegung passiver Sicherheitssysteme mittels Mehrkörper- oder Finite Elemente Programmen deterministische Modelle verwendet. Das heißt, für die Eingangsparameter wie Fahrzeuggeometrien, Massenstrom Airbag oder Sitzposition des Dummy wurden konkrete Werte verwendet.

In Realität können bei den Crashtests erhebliche Streuungen festgestellt werden. Ursache der Streuungen wichtiger Performancegrößen sind Streuungen von Eingangsgrößen, sowohl Größen der Auslegung passiver Sicherheitssysteme sowie der Fahrzeugstruktur, der Lasten als auch der Testbedingungen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit aus den Vorausberechnungen nicht nur Einzelwerte sondern auch möglichst prognosesichere Aussagen über die Streuung wichtiger Performancegrößen bezüglich der zu erwartenden Testergebnisse zu extrahieren.

Eine mögliche Vorgehensweise, die Streuungen von Versuchsergebnissen über Berechnung von „worst case“ Fällen mit unteren und oberen Grenzen von Eingangsparameterwerten abzuschätzen, ist wegen der Komplexität der Rückhaltesysteme und deren numerischer Modelle zunehmend unpraktikabel. Zudem stellt sich bei der Definition eines „worst case“ die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit der „worst case“ ein mögliches Versuchsergebnis ausschließen soll. Werden in Ermangelung belastbarer Daten über Wahrscheinlichkeiten die „worst cases“ sehr konservativ gewählt, führt eine Absicherung mittels „worst cases“ zu unwirtschaftlichen Strukturen.

Eine Berücksichtigung von Eingangsstreuungen in der virtuellen Produktentwicklung als auch eine wirtschaftliche Auslegung der Rückhaltesysteme gegenüber akzeptablen Überschreitenswahrscheinlichkeiten streuender Performancegrößen kann nur durch eine Integration stochastischer Betrachtungs- und Simulationsmethoden in die virtuelle Produktentwicklung erreicht werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Notwendigkeit stochastischer Simulationsmethoden darüber hinaus durch Trends der virtuellen Produktentwicklung wächst.

- durch zunehmende Optimierungen können Designs an ihre Grenzen kommen und sehr sensibel gegenüber Streuungen werden
- weil Hardwarezyklen immer später und seltener erfolgen, muss der Einfluss von Streuungen, die in den Hardwaretests noch vorhanden waren und deren Einfluss damit wenigstens stichprobenweise erfasst war, in der virtuellen Produktentwicklung berücksichtigt werden

- wenn in kürzerer Zeit immer größere Konstruktionsänderungen (hohe Innovationsgeschwindigkeit) umgesetzt werden und immer komplexere Komponentensysteme zusammenwirken ist das a priori Wissen (Erfahrungswerte) über deren zuverlässige Funktionsweise gering. Die Robustheit der Systeme muss an virtuellen Modellen untersucht werden.
- wesentliche Fahrzeug Konzeptentscheidungen müssen in einem frühen Entwicklungsstadium auf Basis virtueller Auslegung getroffen werden. Dies erfordert eine bestmögliche Kenntnis über den Grad der Zielerfüllung (Gesetze, Verbraucherschutz) bzw. eine quantitative Einschätzung des Restrisikos.

Um das manchmal gegenüber kleinen Änderungen von Randbedingungen „chaotisch“ anmutende Verhalten des Fahrzeugcrashtest und erst recht seiner Vorausberechnung erfassen zu können, sind mindestens zwei wesentliche Randbedingungen zu erfüllen.

Das vorhandene Wissen über Eingangsstreuungen und Unsicherheiten z.B. in Randbedingungen, Materialwerten oder Lastcharakteristika ist in eine geeignete statistische Beschreibung, in so genannte Verteilungsinformationen zu übersetzen und als wesentliche Eingangsinformation stochastischer Analysen in die virtuelle Produktentwicklung zu integrieren. Gleichzeitig ist zu sichern, dass die verwendeten numerischen Modelle alle mit den wesentlichen Streuungen verbundenen physikalischen Phänomene enthalten und die Approximationsmethoden zur Vorausberechnungen (explizite FEM, Mehrkörperprogramme) nicht zuviel Streuung (numerisches Rauschen) der Performancegrößen verursachen.

Erst wenn gesichert ist, dass alle für die zu bewertenden Performancegrößen wesentlichen Eingangsstreuungen erfasst sind und die numerischen Modelle und die CAE-Solver eine geeignete Prognose erlauben, sind die resultierenden Prognosen über die Streuung der Versuchsergebnisse belastbar. Es sollte erwähnt werden, dass auch schon auf dem Wege dahin wertvolle Erkenntnisse über das Wirken von Übertragungsmechanismen einzelner Eingangsstreuungen gesammelt werden können und die Qualität/Prognosefähigkeit der Vorausberechnung wesentlich verbessert werden kann. In praktischen Anwendungen ist häufig nicht davon auszugehen, dass alle wesentlichen Eingangsstreuungen am Beginn stochastischer Berechnungen realitätsnah erfasst werden können und dass alle Simulationsprozesse prognosefähig sind. Deshalb wird man realistischweise mit relativ groben Annahmen über Eingangsstreuungen/Eingangsunsicherheiten starten und dann schrittweise das Wissen über wichtige Eingangsstreuungen verbessern.

Zur Untersuchung der Streuung auf die Performancegrößen, die aus Modellunzulänglichkeiten oder Fehlern der Approximationsverfahren resultieren, werden „numerische Robustheitsbewertungen“ durchgeführt. Hierbei werden numerische Parameter wie Zeitschrittwahl, Skalierungsfaktoren oder Kontakteinstellungen variiert und deren Einfluss auf die Ergebnisgrößen untersucht. Zur Sicherung der Prognosefähigkeit sollte die „Streuung“ wichtiger Performancewerte infolge von

Approximationsfehlern der CAE-Solver oder Instabilitäten der numerischen Modelle im Vergleich zur Streuung der Performancegrößen aus physikalischen Eingangsstreuungen (im realen Fahrzeug vorhandenen) gering sein. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass eine Trennung und getrennte Untersuchung der Streuung aus numerischen Einflüssen und der Streuung infolge physikalischer Eingangsstreuungen unbedingt zu empfehlen ist. Bei Problemstellungen mit Verzweigungspunkten beinhaltet das Trennen der Einflüsse aus numerischem Rauschen und physikalischem Phänomen das Identifizieren von physikalischen Parametern, die auf die Verzweigungspunkte wirken. Gelingt es nicht, die Streuung aus numerischen Einflüssen gering zu halten, ist die Prognosefähigkeit der Vorausberechnung möglicherweise nicht belastbar und es besteht die Gefahr der Kaffeesatzleserei.

2 Rechnerische Robustheitsbewertungen

2.1 Statistische Beschreibung der Eingangsgrößen

Physikalische Eingangsstreuungen werden mittels Verteilungsfunktionen beschrieben. Wichtige Verteilungstypen sind z.B. Gleichverteilung für Reibkennwerte, Normalverteilung für Massenstromkennwerte oder Lognormalverteilung für Materialwerte. Bestehen zwischen einzelnen streuenden Eingangsgrößen Zusammenhänge, müssen diese bei den Eingangsinformationen berücksichtigt werden.

OUTPUT: Streckgrenze vs. OUTPUT: Zugfestigkeit, $r = 0.660$

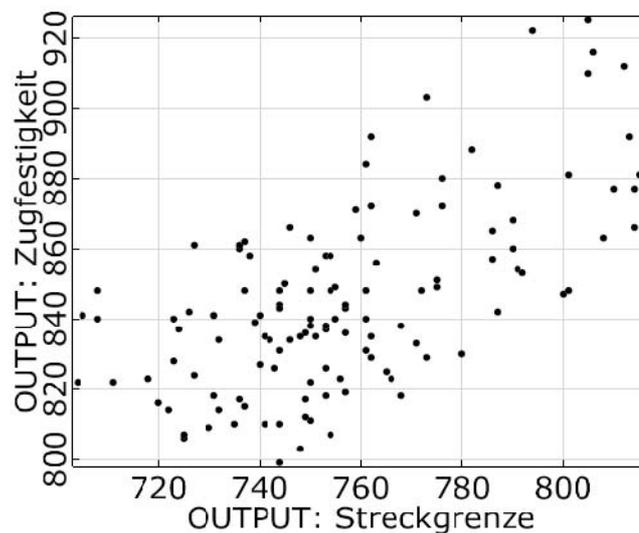


Abbildung 1: Korrelation zwischen streuender Zugfestigkeit und Streckgrenze eines Stahls

Als Beispiel wichtiger Zusammenhänge zwischen den Eingangsstreuungen sei der Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und der Streckgrenze eines Stahls zu benennen. Hier würde man den Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden

streuenden Eingangsgrößen zum Beispiel aus vorhandenen Messdaten einer Eingangskontrolle bestimmen (siehe Abbildung 1) und als Eingangsinformation stochastischer Samplingverfahren berücksichtigen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass naturgemäß die Aussagekraft stochastischer Berechnungen wesentlich von der Qualität der Eingangsdaten abhängt. Häufig werden die Verteilungsfunktionen am Beginn der Bearbeitung aus relativ groben Annahmen über mögliche Streuungen abgeschätzt. Können dann in den Robustheitsbewertungen die wichtigen Eingangsgrößen ermittelt werden, sind hierfür die Annahmen der Streuungen zu verifizieren und gegebenenfalls genauer zu ermitteln.

2.2 Robustheitsbewertungen

Robustheitsbewertungen untersuchen die Sensitivität wichtiger Performancegrößen gegenüber Streuungen physikalischer Eingangsgrößen. Unter Berücksichtigung der Eingangsinformation der Streuungen werden mittels stochastischer Samplingverfahren eine Anzahl möglicher Realisierungen erstellt, berechnet und mittels statistischer Maße werden die Korrelation (Zusammenhänge zwischen Variablen) und die Variation (Streuung) der Performancegrößen analysiert und bewertet. Um die Anzahl der notwendigen Durchrechnungen zum Erreichen eines akzeptablen Fehlers der Schätzung der statistischen Maße klein zu halten, wird das Latin Hypercube Sampling verwendet. Für typische Robustheitsbewertungen von Rückhaltesystemen sind dann bei der Verwendung von Latin Hypercube Sampling und eines akzeptierten Fehlers der Schätzung linearer Korrelationskoeffizienten von 0.5 ± 0.1 ca. 100 Stützstellen ausreichend.

Wichtige statistische Maße zur Bewertung der Robustheit sind:

- Korrelationskoeffizienten linearer und quadratischer Korrelationshypothese zwischen Eingangsstreuung und Auswertegrößen zeigen paarweise Abhängigkeiten an. Je höher der Betrag des Korrelationskoeffizienten ist, umso größer ist der lineare bzw. quadratische Zusammenhang zwischen zwei Variablen.
- Principal Component Analysis (PCA). Die Eigenvektoren der Korrelationsmatrix zeigen Abhängigkeiten mehrerer Eingangsvariablen zu mehreren Ergebnisgrößen an. Damit können Mechanismen der Korrelationsstruktur identifiziert werden.
- Bestimmtheitsmaße (Coefficients of Determination) der Korrelationshypothesen. Bestimmtheitsmaße von Ergebnisgrößen ermitteln wie viel Prozent der Variation einer Ergebnisgröße über die Korrelationen zu allen Eingangsgrößen erklärt werden können. Ist das Bestimmtheitsmaß einer Ergebnisgröße hoch (maximale 100%), sind die wesentlichen Zusammenhänge über die zugrunde liegende Korrelationshypothese ermittelt. Je kleiner die Bestimmtheitsmaße werden, je größer wird der Anteil an der Variation der Ergebnisgrößen, der mittels der Korrelationshypothesen (z.B. linear und quadratisch) noch nicht erklärt werden kann. Typischerweise existieren dann nichtlinearere Zusammenhänge, Clusterungen

„Ausreißer“ oder ein hohes Maß an „numerischem Rauschen“. Damit gibt das Bestimmtheitsmaß auch Auskunft über den möglichen Anteil numerischen Rauschens und kann als wichtiges Qualitätsmerkmal der Modellierung herangezogen werden.

- Histogramm mit Mittelwert, Variationskoeffizient, Standardabweichung, minimale und maximale Werte der Auswertegrößen. Üblicherweise werden bei Robustheitsbewertungen Streuungen um ihre Mittelwerte untersucht. Bei der Bewertung minimaler und maximaler Werte sei darauf hingewiesen, dass es sich hier um Schätzungen aus einer „zufällig“ gewählten Stichprobe handelt. Es sei weiterhin darauf hingewiesen, dass zur Absicherung sehr seltener Ereignisse, die Bestimmung der dazugehörigen Auftretenswahrscheinlichkeiten notwendig wird. Weil häufig nur eine kleine Stichprobenanzahl (100-200) berechnet werden, können aus den Histogrammen nur Wahrscheinlichkeiten im Prozentbereich abgeschätzt werden.

2.3 Integration von Robustheitsbewertungen in die virtuelle Auslegung und Absicherung der Rückhaltesysteme

Man sollte davon ausgehen, dass eine konsequente Einführung stochastischer Berechnungsmethoden mindestens in zwei Phasen eingeteilt werden kann.

Phase 1: Streuungen und Unsicherheiten der Eingangsgrößen werden aus wenigen Messungen und Erfahrungswerten abgeschätzt

- Übertragen des vorhandenen Wissens über Eingangsstreuungen und Unsicherheiten der Testbedingungen in Verteilungsfunktionen als geeigneter Input stochastischer Methoden
- Überprüfen der Modellrobustheit/Modellstabilität gegenüber der Variation „numerischer“ Parameter
- Robustheitsbewertung der Crashlastfälle gegenüber den „physikalischen“ Eingangsstreuungen
- Extraktion der wichtigen streuenden Eingangsgrößen und Bestimmung des Übertragungsverhaltens der Eingangsstreuungen auf wichtige Performancegrößen sowie der Abgleich dieser Mechanismen mit Erwartungen und Erfahrungen aus dem Versuch
- Überprüfen ob infolge der Variation der Performancegrößen Grenzwerte überschritten werden

Innerhalb beziehungsweise als Ergebnis einer Phase 1 wird diskutiert und festgelegt

- zu welchem Zeitpunkt (an welchen Meilensteinen) Robustheitsbewertungen von Komponenten, Baugruppen oder Gesamtfahrzeugen durchgeführt werden
- für welche wichtigen Eingangsstreuungen die Annahmen zu den Streuungen noch einmal überprüft und gegebenenfalls verifiziert werden müssen

- welche wichtigen Eingangsstreuungen verringert werden können
- wie kritische Streuungen von Performancegrößen verringert oder verschoben werden können
- welche Überschreitenswahrscheinlichkeiten für die Performancegrößen tolerierbar sind

Phase 2: sensible streuende Eingangsgrößen sind bekannt, die Annahmen dieser Streuungen sind verifiziert

- mit gesichertem Wissen über die Eingangsstreuungen werden Robustheitsbewertungen an definierten Meilensteinen des virtuellen Produktentwicklungsprozesses durchgeführt
- geht man davon aus, dass alle wichtigen Eingangsstreuungen realitätsnah berücksichtigt werden und die numerischen Modelle ausreichend prognosesicher sind, sind die Schätzungen der Streuung wichtiger Ergebnisgrößen vertrauenswürdig
- zur Absicherung kleiner Übertretenswahrscheinlichkeiten können nachdem die wichtigen streuenden Parameter bekannt sind, in kleinen Parameterräumen numerischen Zuverlässigkeitsanalysen durchgeführt werden.

Seit Anfang 2005 werden bei der BMW AG systematisch Robustheitsbewertungen bei der Auslegung der Rückhaltesysteme eingesetzt. Nach einem Jahr der serienmäßigen Anwendung stochastischer Analysen in der Insassensimulation bei BMW befinden wir uns am Ende der Phase 1. Folgende Mehrwerte konnten bisher bei der Absicherung und Erhöhung der Robustheit der Rückhaltesysteme erzielt werden:

- Erarbeitung eines besseren Verständnisses der Übertragungsmechanismen von Eingangsstreuungen auf wichtige Performancegrößen
- Identifikation der wichtigen streuenden Eingangsparameter
- Identifikation von Modellschwächen und damit Erhöhung der Modellrobustheit/Modellstabilität gegenüber der Variation numerischer Parameter und damit auch eine Verbesserung der Prognosesicherheit der Crashtestberechnungen
- Erkennen von Robustheitsproblemen der Rückhaltesysteme in Fällen mit häufigem Überschreiten angestrebter Grenzwerte mit der Konsequenz der Neuauslegung/Überarbeitung von Komponenten

3 Praktische Anwendungen

3.1 Beispiel zur numerischen Robustheit

Um den Lastfall USNCAP (Frontcrash 56 km/h gegen starre Wand) optimal auslegen zu können, wurde das Simulationsmodell für den Fahrer zunächst auf numerische Robustheit untersucht. Das Modell wurde in MADYMO erstellt und berechnet. Die Robustheitsbewertung wurde mit optiSLang durchgeführt. Es werden wichtige Teile des Rückhaltesystems und der Dummy als MKS-Formulierung sowie eine FE-Formulierung für den Airbag verwendet.

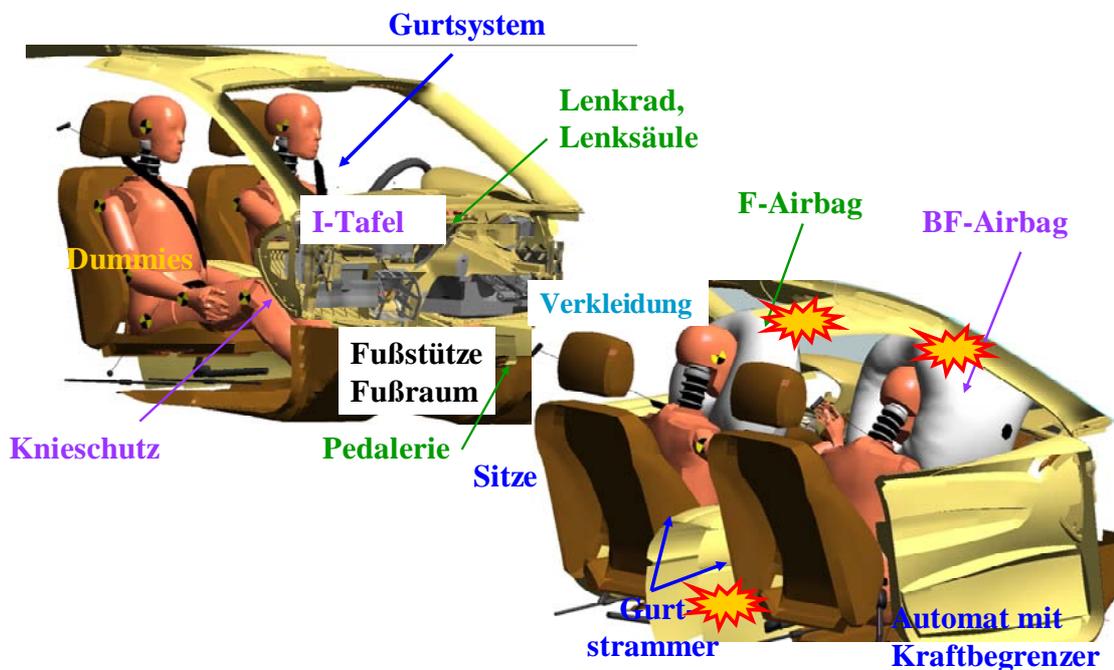


Abbildung 2: Simulation Frontaufprall mit MADYMO

Das Simulationsmodell des Airbags wurde vom Zulieferer an Komponentenversuchen validiert und bei BMW in das Gesamtfahrzeug integriert. Es wurden insgesamt 17 numerische Parameter der MKS/FE-Modellierung variiert und 22 Dummyergebnisgrößen in der Robustheitsbewertung untersucht. Obwohl für den Lastfall USNCAP nur zwei Antwortgrößen (Thorax acceleration 3ms, HIC36) bewertet werden, wurden folgende Responses betrachtet:

- Head resultant acceleration 3 ms
- Thorax resultant acceleration 3 ms
- Pelvis resultant acceleration 3 ms

- HIC15 head injury criterion 15 ms
- HIC36 head injury criterion 36 ms
- Viscous criterion
- Shoulder belt force
- Chest deflection maximum
- Head x- / z-displacement
- Femur compression left / right
- Tibia index (4 responses)
- Neck injury (4 responses)
- Neck compression / tension
- Neck tension

Entscheidendes Kriterium der numerischen Robustheit ist das Maß der Streuung wichtiger Ergebnisgrößen. Wie ein Plot im Sternbereich zeigt, konnten sehr große Variationen beobachtet werden, die ungefähr in der Größenordnung der Variation infolge physikalischer Eingangsstreuungen für diesen Lastfall liegen. Weil diese Größenordnung numerischen Rauschens nicht akzeptabel ist, wurden die dafür verantwortlichen Eingangsgrößen identifiziert.

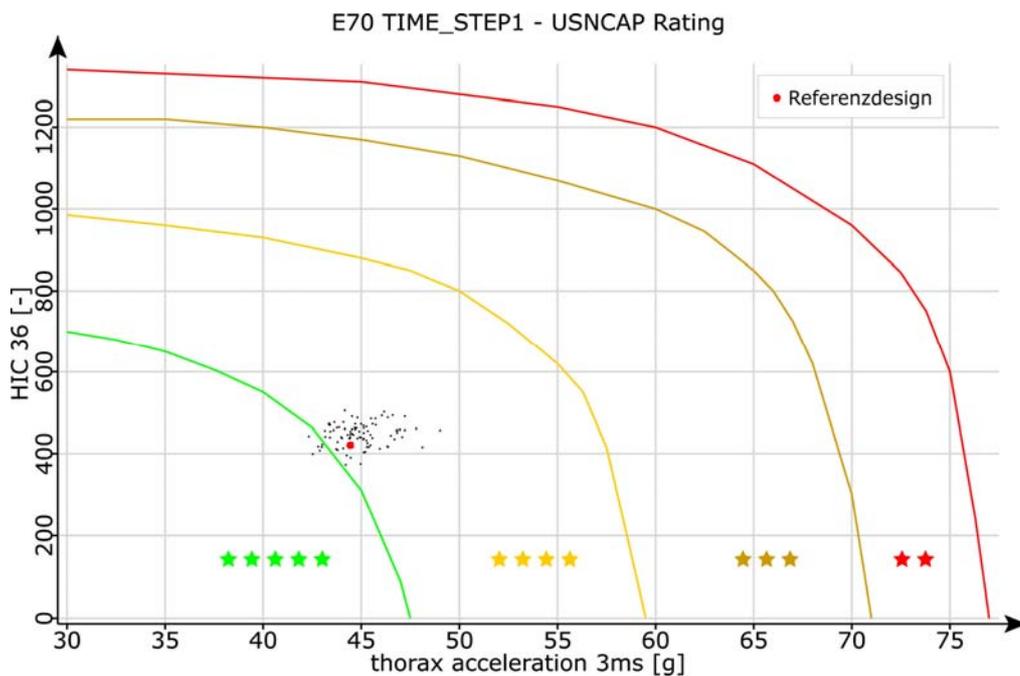


Abbildung 3: Visualisierung des numerischen Rauschens im Sterne Diagramm

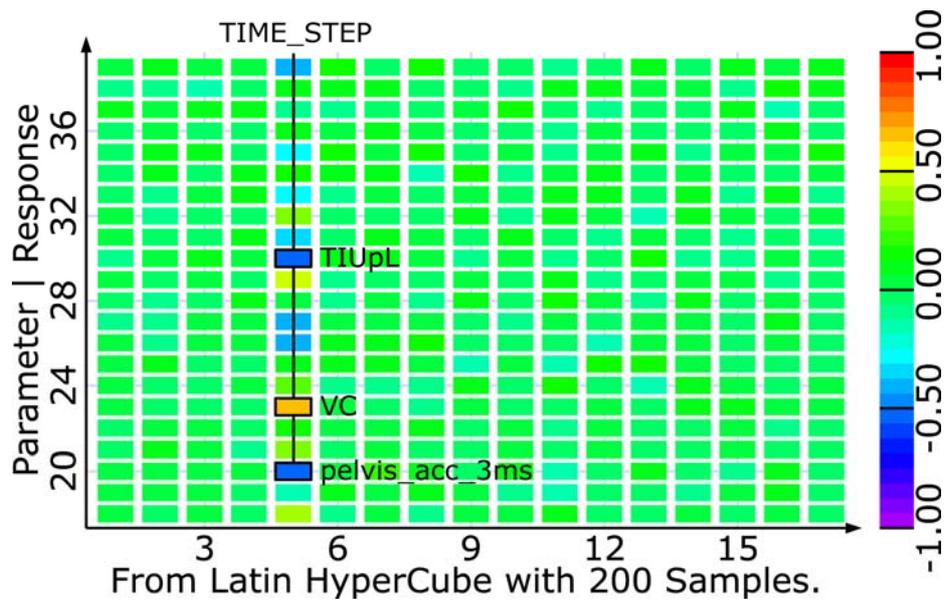


Abbildung 4: Lineare Korrelationsmatrix

In der Matrix der linearen Korrelationen ist deutlich zu erkennen, dass nur zum Mehrkörper-Zeitschritt nennenswerte Korrelationen existieren, die bei einigen Ergebnisgrößen Korrelationskoeffizienten von 0.7 erreichen.

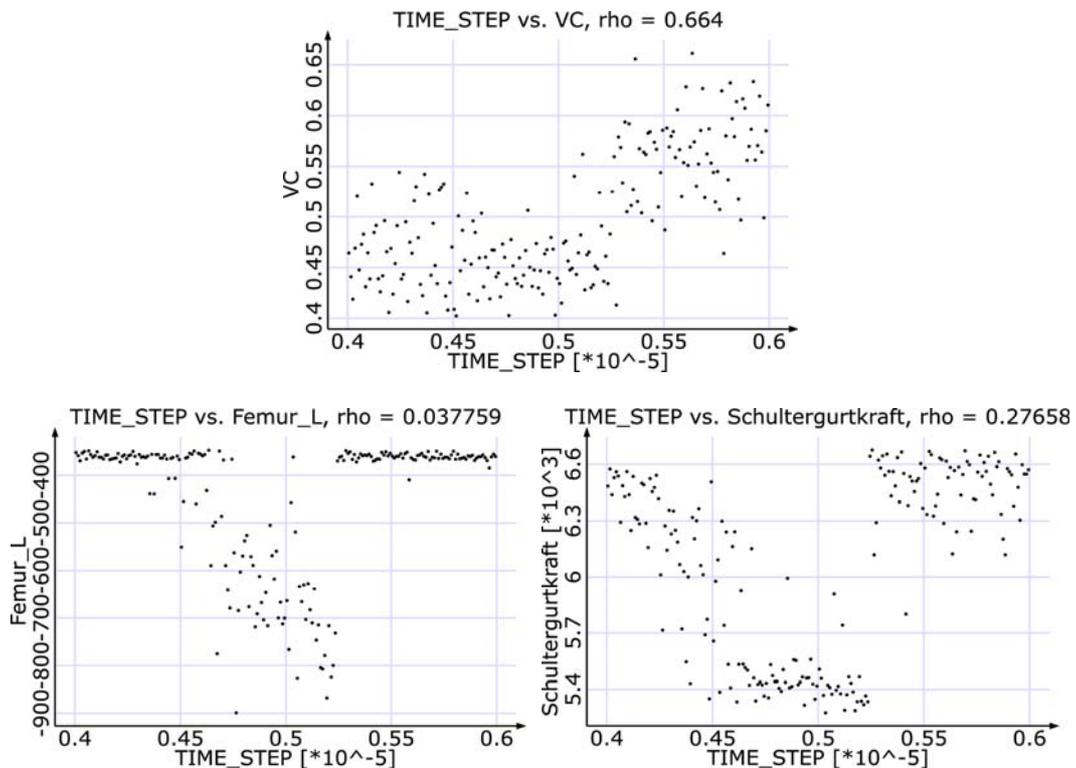


Abbildung 5: Visualisierung von Zusammenhängen zwischen der Variation des Mehrkörper-Zeitschritts und Dummy Ergebnisgrößen im Anthill-Plot

Darüber hinaus konnten auch bei Antwortgrößen mit kleinen Bestimmtheitsmaßen (kleiner 50%) aus linearer und quadratischer Korrelation nur auffällige nichtlineare Zusammenhänge und Clusterungen identifiziert werden, die maßgebend mit der Wahl des Mehrkörper-Zeitschrittes zusammenhängen.

Durch die Analyse verdächtiger Ergebnissätze konnten Unzulänglichkeiten der Modellierung im Zusammenwirken von Airbag und Dummy erkannt und in der Folge eliminiert werden. Eine abschließende numerische Robustheitsbewertung ergab wesentlich geringere Streuungen infolge Variation numerischer Parameter, die gegenüber den Streuungen aus physikalischen Eingangsgrößen vernachlässigbar sind. Damit konnte die numerische Robustheit der verbesserten Modellierung nachgewiesen und die Voraussetzung für eine Optimierung der Rückhaltesysteme geschaffen werden.

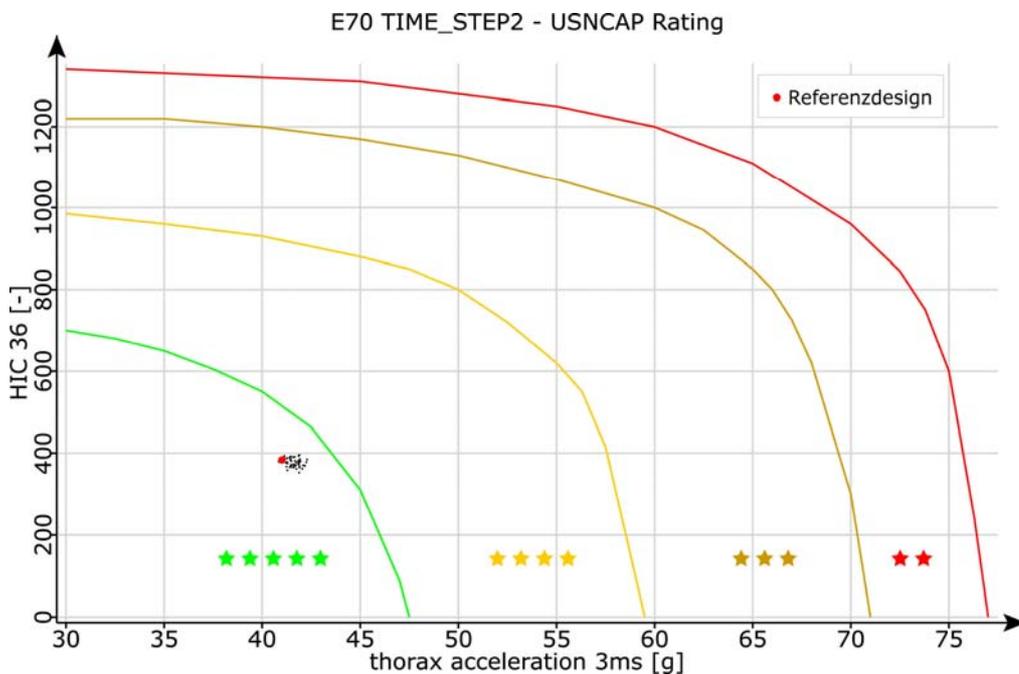


Abbildung 6: Visualisierung des numerischen Rauschens im Sterne Diagramm

Typisch für robuste numerische Modelle ist dann, dass neben kleinen Streuungen auch keine nennenswerten Korrelation mehr zu beobachten sind.

Von großer Bedeutung ist dabei, dass parallel in physikalischen Robustheitsbewertungen die sensiblen physikalischen Eingangsgrößen identifiziert werden können und durch eine Optimierung dieser Parameter eine deutliche Verschiebung des Mittelwertes wichtiger Ergebnisgrößen erreicht werden kann. Damit kann der Mittelwert der Bewertung aus dem 4 Sterne in den 5 Sterne Bereich verschoben und eine Zielerreichung weitgehend sichergestellt werden. In der Praxis bedeutet eine derartige Optimierung in der Regel die Integration komplexer, Lastfall erkennender, adaptiver Rückhaltesysteme, die mit höheren Kosten verbunden sind.

3.2 Beispiel zur physikalischen Robustheitsbewertung

Für den Lastfall Seitencrash nach IIHS wurde bereits im Entwurfsstadium die Robustheit des Rückhaltesystems gegenüber erwarteten Streuungen wichtiger Eingangsgrößen untersucht. Der Lastfall wurde als FE-Modellierung im Gesamtfahrzeug mit PAMCRASH modelliert und berechnet. Die Robustheitsbewertung wurde mit optiSLang durchgeführt.

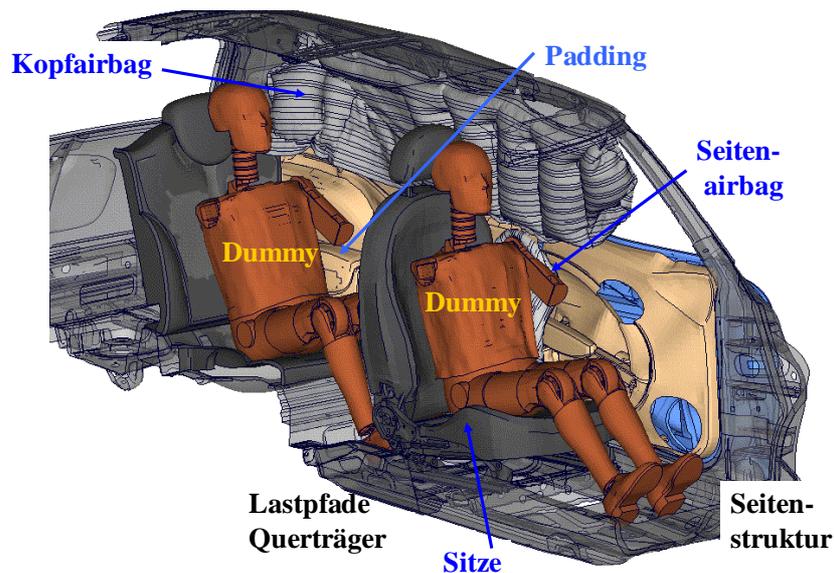


Abbildung 7: Simulation Seitenaufprall mit PAMCRASH

Es wurden insgesamt 13 physikalische Eingangsstreuungen, hauptsächlich streuende Eingangsgrößen des Airbagsystems, der Reibbeiwerte und der Sitzposition des Dummys berücksichtigt (Tab.1) und 20 Dummyergebnisgrößen in der Robustheitsbewertung untersucht:

- Rib deflection thorax/abdomen (5 responses)
- Deflection rate thorax/abdomen (5 responses)
- Acetabulum force
- Femur force/moment
- Head acceleration
- Iliac force
- Neck compression/tension/moment
- Shoulder deflection
- HIC (head injury criterion)

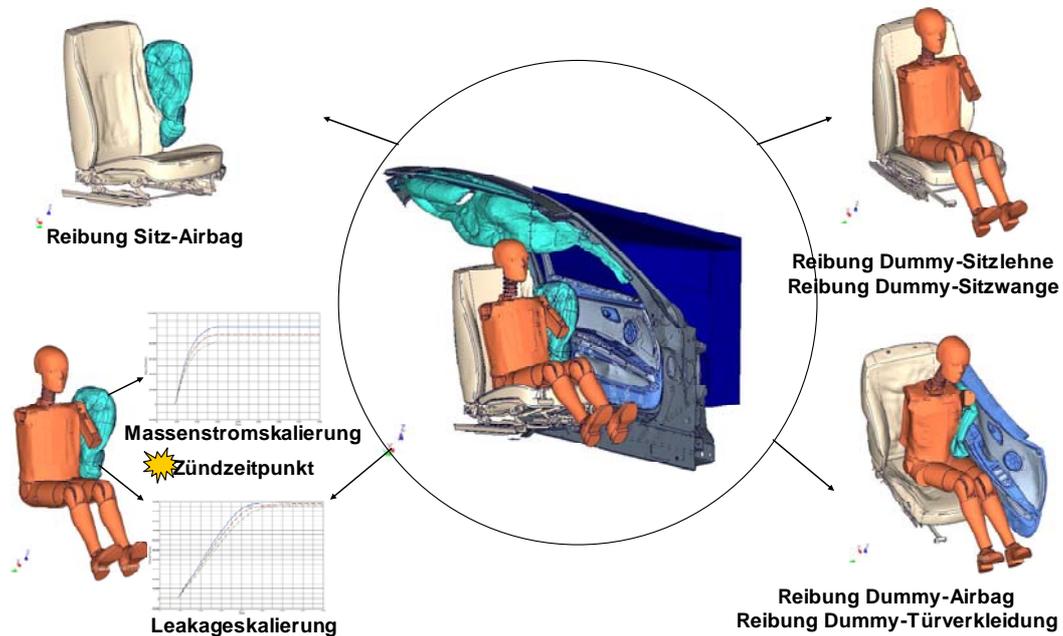


Abbildung 8: wichtige Eingangsstreuungen der Robustheitsbewertung Seitenaufprall

Wichtiges Kriterium der Robustheitsbewertung ist hier das sichere Erreichen einer „Good“ Bewertung dieser Antwortgrößen. Erfreulicherweise konnten innerhalb der 94 Stützstellen der Robustheitsbewertung keine Überschreitungen festgestellt werden.

	Inputparameter	Verteilungstyp
Kontaktreibung	Dummy-Lehne	uniform
	Dummy-Türverkleidung	uniform
	Dummy-Airbag	uniform
	Airbag-Sitz	uniform
	Dummy-Airbag	uniform
	Türverkleidung-Airbag	uniform
Seitenairbag	Leakage	truncated normal
	Massenstromskalierung	truncated normal
	Zündzeitpunkt	truncated normal
	Nahtkraft	uniform
Türverkleidung	Materialstärke	truncated normal
	Materialkurve	truncated normal
Sitzposition	horizontal/vertikal	uniform

Tabelle 1: Streuende Eingangsgrößen sowie zugehöriger Verteilungstyp bei der Untersuchung der physikalischen Robustheit eines Seitencrash-Modells

In der linearen Korrelationsmatrix ist zu sehen, dass nur zu drei Eingangsstreuungen (Reibbeiwert Airbag/Dummy, Zündzeitpunkt Airbag und Sitzposition) nennenswerte lineare Zusammenhänge bestehen.

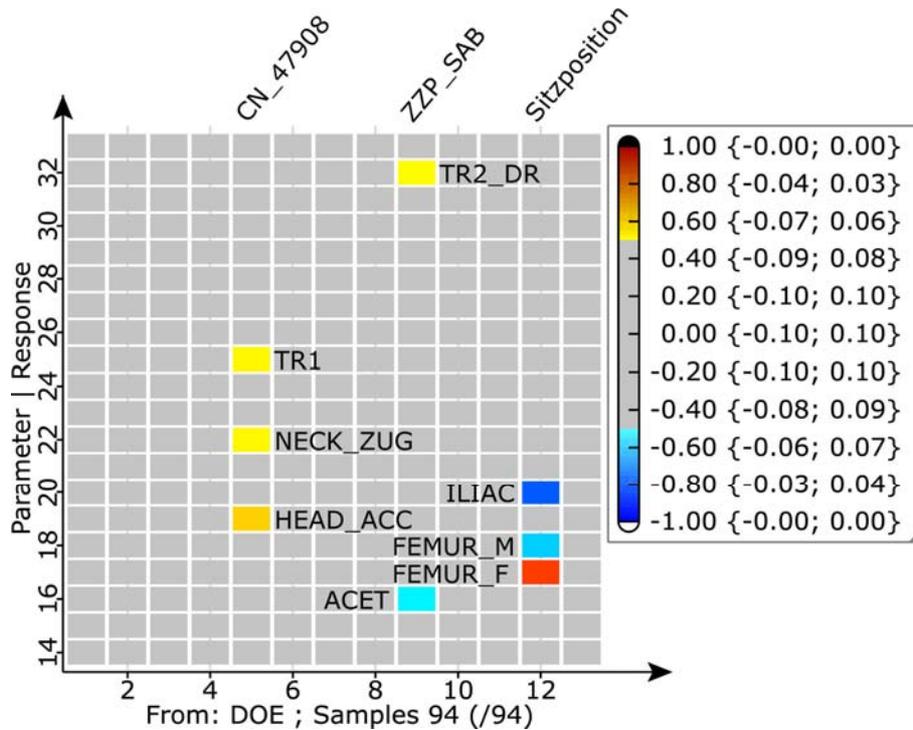


Abbildung 9: Lineare Korrelationsmatrix mit Filter für die Korrelationskoeffizienten und Vertrauensintervall

Bei der Ergebnisgröße ILIAC-Kraft wurde der Grenzwert von 4400 N fast erreicht, das heißt es kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese Dummygröße in Versuchen mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit überschritten wird. Am Bestimmtheitsmaß ist deutlich zu erkennen, dass die Streuung in der Sitzposition dieses Ereignis dominiert und andere Streuungen keinen signifikanten Einfluss besitzen.

Weil die Streuung der Sitzposition als Toleranzfeld aus der Versuchsdurchführung gegeben ist und damit nicht reduziert werden kann und die Sitzposition selber durch ergonomische Anforderungen weitgehend festgeschrieben ist, können hier nur Maßnahmen im Innenraum beziehungsweise am Rückhaltesystem das Übertragungsverhalten zwischen der Streuung der Sitzposition und der Streuung wichtiger Dummyergebnisgrößen beeinflussen bzw. die Streuung der Dummygrößen reduzieren.

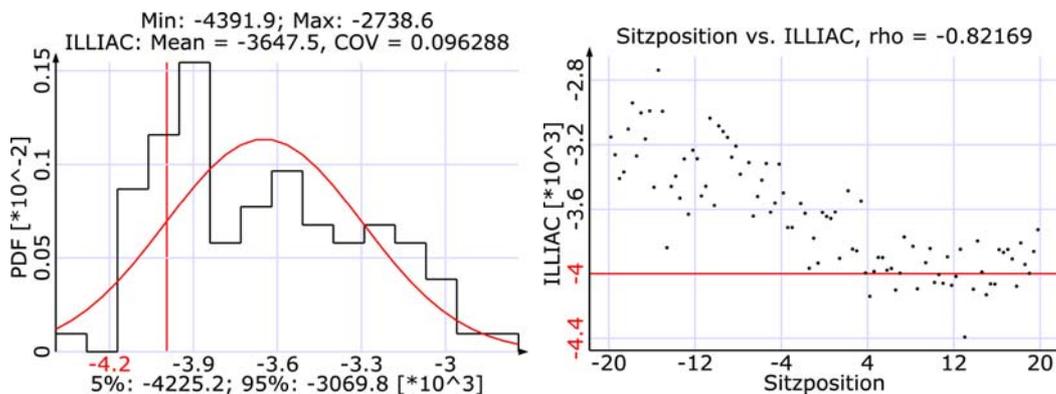


Abbildung 10 Histogramm der Ergebnisgröße ILLIAC und Anthill Plot zu dominierender Eingangsstreuung

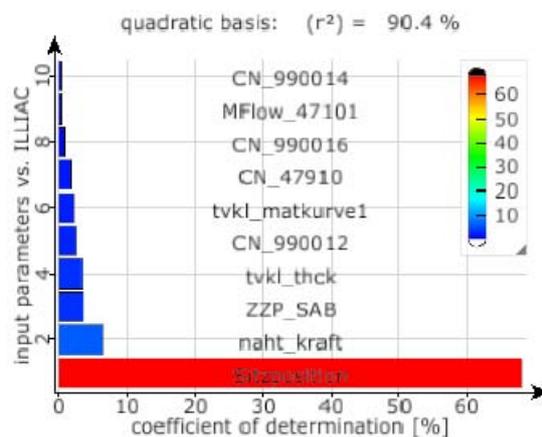


Abbildung 11: Bestimmtheitsmaß (lineare + quadratische Korrelationen) der Ergebnisgröße ILIAC

4 Ausblick

Bei zwei Fahrzeugprojekten wurden rechnerische Robustheitsbewertungen zur Berücksichtigung der Streuung wichtiger Eingangsgrößen von Rückhaltesystemen sowie von Testbedingungen erfolgreich in den serienmäßigen Produktentwicklungsprozess integriert. Neben der Identifikation der maßgebenden Eingangsstreuungen und der Abschätzung der zu erwartenden Streubreiten wichtiger Performancegrößen konnten das Verständnis des Übertragungsverhaltens der Streuungen sowie die Prognosequalität der numerischen Modelle erhöht werden. In der Folge sollen die rechnerischen Robustheitsbewertungen schon in möglichst frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung und danach an definierten Meilensteinen durchgeführt werden. Zur Absicherung der Prognosequalität der stochastischen Berechnungen müssen parallel die Annahmen über die Streuungen wichtiger Eingangsgrößen der Komponenten von Zulieferern bzw. aus dem Gesamtfahrzeug sowie der Testbedingungen verifiziert werden.

Literatur

BUCHER, C.; WILL, J.: Statistische Maße für rechnerische Robustheitsbewertungen CAE gestützter Berechnungsmodelle: Weimar 2005, www.dynardo.de

OptiSLang - the Optimizing Structural Language Version 2.1, DYNARDO, Weimar, 2005, www.dynardo.de

PAPULA, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3 *Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*, Vieweg Verlag, 2001

WILL, J.; MÖLLER, J-St.; BAUER, E.: Robustheitsbewertungen des Fahrkomfortverhaltens an Gesamtfahrzeugmodellen mittels stochastischer Analyse: VDI-Berichte Nr. 1846, 2004, S.505-525

WILL, J.; BUCHER, C.: Robustness Analysis in Stochastic Structural Mechanics, Proceedings NAFEMS Seminar Use of Stochastics in FEM Analyses; May 2003, Wiesbaden