

# Integration rechnerischer Robustheitsbewertungen in die virtuelle Auslegung passiver Fahrzeugsicherheit bei der BMW AG

Dr.-Ing. Johannes Will, DYNARDO GmbH, Weimar  
Dipl.-Ing. Hans Baldauf, BMW AG, München

## Kurzfassung

Eine der wichtigsten Aufgabenstellungen der Fahrzeugentwicklung ist die stetige Verbesserung der passiven Sicherheitssysteme. In der Vergangenheit wurden bei der virtuellen Auslegung passiver Sicherheitssysteme deterministische Modelle verwendet. In Realität können bei den Crashtests jedoch erhebliche Streuungen festgestellt werden. Ursache der Streuungen wichtiger Fahrzeugbewertungsgrößen sind Streuungen von Eingangsgrößen, sowohl Größen der Auslegung passiver Sicherheitssysteme sowie der Fahrzeugstruktur als auch der Crashtestdummies, der Lasten und der Testbedingungen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit aus den Vorausberechnungen nicht nur Einzelwerte sondern auch möglichst prognosesichere Aussagen über die Streuung wichtiger Bewertungsgrößen zu extrahieren. Eine Berücksichtigung von Eingangsstreuungen, als Grundlage einer wirtschaftlichen Auslegung der Rückhaltesysteme gegenüber streuender Performancegrößen, kann nur durch eine Integration stochastischer Betrachtungs- und Simulationsmethoden in die virtuelle Produktentwicklung erreicht werden [1-2]. Seit Anfang 2005 werden bei der BMW AG systematisch rechnerische Robustheitsbewertungen mittels stochastischer Analyse bei der Auslegung der Rückhaltesysteme eingesetzt. Nach einem Jahr methodischer Absicherung der Vorgehensweise [3] werden ab 2006 rechnerische Robustheitsbewertungen serienmäßig zu festgelegten Meilensteinen der Entwicklung passiver Sicherheitssysteme durchgeführt. Primäres Ergebnis der Robustheitsbewertung ist die Prognose über den Streubereich der Bewertungsgrößen und damit verbundene Wahrscheinlichkeiten der Einhaltung von Sicherheitszielen. Sekundäres Ergebnis ist eine Sicherung der numerischen Stabilität der Modelle und die Identifikation der Eingangsstreuungen, die maßgeblich die Ausgangsstreuungen verursachen. Damit geben die Robustheitsbewertungen wichtige Hinweise auf notwendige Verbesserungen der MKS/FE Modelle sowie für die Notwendigkeit zur Reduzierung von Eingangsstreuungen oder Hinweise auf notwendige Modifikationen der Rückhaltesysteme.

## **1. Einleitung**

In der Vergangenheit wurden bei der virtuellen Auslegung passiver Sicherheitssysteme mittels Mehrkörper- oder Finite Elemente Programmen deterministische Modelle verwendet. In Realität können bei den Crashtests jedoch erhebliche Streuungen festgestellt werden. Ursache der Streuungen wichtiger Fahrzeugbewertungsgrößen sind Streuungen von Eingangsgrößen, sowohl Größen der Auslegung passiver Sicherheitssysteme sowie der Fahrzeugstruktur als auch der Crashtestdummies, der Lasten und der Testbedingungen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit aus den Vorausberechnungen nicht nur Einzelwerte sondern auch möglichst prognosesichere Aussagen über die Streuung wichtiger Bewertungsgrößen bezüglich der zu erwartenden Testergebnisse zu extrahieren. Seit Anfang 2005 werden zur Prognose der Streuungen wichtiger Bewertungsgrößen bei der BMW AG systematisch rechnerische Robustheitsbewertungen mittels stochastischer Analyse bei der Auslegung der Rückhaltesysteme eingesetzt.

Die Notwendigkeit der Integration stochastischer Simulationsmethoden ergibt sich darüber hinaus durch weitere Trends der virtuellen Produktentwicklung.

- 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 möglicherweise 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.

## **2. Rechnerische Robustheitsbewertungen mittels Variationsanalyse**

Rechnerische Robustheitsbewertungen untersuchen die Sensitivität wichtiger Bewertungsgrößen gegenüber Streuungen physikalischer Eingangsgrößen [4]. Primäres Ziel rechnerischer Robustheitsbewertungen passiver Rückhaltesysteme ist die Prognose des Variationsbereiches wichtiger Antwortgrößen und deren Bewertung nach Anforderungen „robuster“ Rückhaltesysteme. In der passiven Sicherheit werden vom Gesetzgeber Grenzwerte vorgegeben und die Fahrzeughersteller definieren eigene Zielwerte mit einem Sicherheitsabstand zum Grenzwert. Weiterhin sollen Fahrzeuge bei den Tests im

Verbraucherschutz (z.B. EURONCAP) möglichst gute Wertungen bekommen. Diese Vorgaben sollen von der überwiegenden Mehrzahl der Fahrzeuge erfüllt sein, es steht aber derzeit nicht im Vordergrund, seltene Überschreitenswahrscheinlichkeiten (1 aus einer Million) nachzuweisen. Deshalb eignen sich Verfahren der Varianzanalyse zur Robustheitsbewertung passiver Sicherheitssysteme. Hierbei werden alle potentiellen Eingangsstreuungen oder Unsicherheiten der Modellbildung mittels streuender Eingangsgrößen der numerischen Modelle in die virtuelle Produktentwicklung eingeführt. Mittels geeigneter Samplingverfahren wird ein Stichprobenset von n-möglichen Fahrzeugen und n-möglichen Randbedingungen der Crashtests erzeugt und die Crashberechnungen n-mal durchgeführt. Das Stichprobenset wird nach der Durchrechnung mittels statistischer Verfahren der Varianzschätzung und Korrelationsanalyse untersucht. Zur Schätzung der Streuungen der Ergebnisgrößen werden aus der Stichprobe in der Regel Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und der Variationsbereich (min/max-Wert) jeder Antwortgröße ermittelt. Rücken die ermittelten Variationsbereiche an Grenzwerte heran oder überschreiten Sie die Grenzwerte, stellt sich die Frage mit welcher Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) diese Werte überschritten werden. Treten im berechneten Stützstellenset Überschreitungen auf, kann die Häufigkeit ausgezählt werden. In der Statistik würde man davon sprechen, die empirischen Wahrscheinlichkeiten direkt aus dem Histogramm zu bestimmen. Alternativ dazu können Verteilungsfunktionen der Ergebnisgrößen angenommen werden und dann Wahrscheinlichkeiten aus Kennwerten der Verteilungsfunktionen ermittelt werden. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass verifiziert werden muss, ob die gewählte Verteilungsfunktion (zum Beispiel Normalverteilung) eine ausreichend gute Approximation der tatsächlichen Verteilung ist. Weil dafür in der Regel nur das Histogramm der 100-200 Durchrechnungen zur Verfügung steht, wird für Wahrscheinlichkeiten im Prozentbereich das Ermitteln der Überschreitenswahrscheinlichkeiten direkt aus den zur Verfügung stehenden Rohdaten (dem Histogramm) empfohlen. Für eine zuverlässige Abschätzung wesentlich kleinerer Überschreitenswahrscheinlichkeiten aus Verteilungshypothesen fehlt in der Regel eine Verifikationsgrundlage. Sollen kleine Wahrscheinlichkeiten (zum Beispiel kleiner als 1 aus 1000) abgesichert werden, sollten Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse zum Einsatz kommen [5-8]. Weil die Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse nur in relativ kleinen Parameterräumen bezahlbar sind, sind die Robustheitsbewertungen mittels Varianzanalyse in der Regel eine notwendige Vorstufe zur Reduktion der Parameterräume.

Für Ergebnisgrößen mit signifikanten Streuungen oder Überschreitungen von Grenzwerten werden mittels Korrelationsanalyse die dafür verantwortlichen Eingangsstreuungen ermittelt. Hierfür werden lineare und quadratische Korrelationskoeffizienten zwischen Ergebnis- und Eingangsstreuung berechnet. Die Korrelationskoeffizienten können Werte zwischen 0 und 1(-1) annehmen und zeigen einen paarweisen Zusammenhang zwischen einer Eingangsstreuung und einer Ausgangsstreuung an. Für die Identifikation von Mechanismen mehrerer Eingangsstreuungen auf Ausgangsstreuungen können die Principal Components (die Eigenvektoren der Korrelationsmatrizen) ausgewertet werden.

Mittels Bestimmtheitsmaßen [9] wird in der Folge abgeschätzt, wie viel der Ergebnisvariation über die gefundenen (linearen und quadratischen) Zusammenhänge erklärt werden kann. Die Bestimmtheit einer Ergebnisgröße bezüglich der Variation aller Eingangsstreuungen drückt dann aus, wie viel Prozent der Ergebnisvariation durch alle gefundene Korrelationen zu den Eingangsgrößen erklärt werden kann. Ist das Bestimmtheitsmaß einer Ergebnisgröße hoch (maximal 100%), sind die wesentlichen Zusammenhänge über die zugrunde liegende Korrelationshypothese erklärbar. 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 sollte als wichtiges Qualitätsmerkmal der Modellierung herangezogen werden. In den bisherigen Robustheitsbewertungen konnte festgestellt werden, dass bei Bestimmtheitsmaßen >80%, der Einfluss numerischen Rauschens auf die Bewertungsgrößen akzeptabel war.

Wahl und Aufwand der Samplingverfahren müssen an wichtigen zu schätzenden statistischen Maßen justiert werden. In der Regel wird der Aufwand der Samplingverfahren an einer zuverlässigen Bestimmung linearer Korrelationskoeffizienten ausgerichtet. Damit ergeben sich für Robustheitsbewertungen von Rückhaltesystemen ca. 100 bis 200 Durchrechnungen pro zu bewertendem Lastfall [9]. Auch die Art des Samplingverfahrens wird auf eine möglichst vertrauenswürdige Bestimmung von Korrelationen optimiert. Hierfür eignen sich Latin Hypercube Verfahren, welche mit einer vorgegebenen Anzahl von Stichproben sowohl die Eingangsverteilungsfunktionen erfüllen als auch die Abweichungen der definierten Eingangskorrelation zwischen den Eingangsstreuungen minimieren.

### **3. Anforderungen an eine systematische Integration von rechnerischen Robustheitsbewertungen**

Zur systematischen Einführung stochastischer Berechnungsmethoden 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 zu überführen 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 (explizite FEM, Mehrkörperprogramme) nicht ihrerseits zuviel Streuung (numerisches Rauschen) der Performancegrößen verursachen.

Die Belastbarkeit der Prognose der Ausgangsstreuungen hängt explizit mit der Realitätsnähe der Definition der Eingangsstreuungen zusammen. Erst wenn gesichert ist, dass alle für die zu bewertenden Performancegrößen wesentlichen Eingangsstreuungen erfasst sind und die numerischen Modelle und die CAE-Prozesse 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 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 Simulationsmodelle prognosefähig sind. Deshalb wird man realistischerweise mit relativ groben Annahmen über Eingangsstreuungen beziehungsweise Eingangsunsicherheiten starten und dann schrittweise das Wissen über wichtige Eingangsstreuungen und die Prognosefähigkeit der Modelle verbessern. Wichtige streuende Eingangsgrößen der virtuellen Auslegung von Rückhaltesystemen sind z.B. Streuungen der Airbagkenngrößen, Streuungen im Gurtsystem und der Sitzpositionen des Crashtestdummy. Als problematisch erwies sich bisher die Berücksichtigung der Streuung der Crashtestdummies. Numerische Dummymodelle stehen heute als validierte FE- oder MKS-Formulierungen zur Verfügung. Neben deterministischen Dummymodellen werden auch so genannte „stochastische“ Dummies angeboten. Hier werden Eingangsstreuungen von Dummykenngrößen aus einer gegebenen Anzahl von Validierungsversuchen identifiziert. Unter Berücksichtigung dieser Eingangsstreuungen soll der „stochastische“ Dummy eine vergleichbare Streuung in wichtigen Dummygrößen erzeugen, wie in den Validierungsversuchen beobachtet werden kann. Hier sei anzumerken, dass uns bekannte „stochastische“ Dummies bisher „nur“ auf den Korridor der Versuchsergebnisse abgestimmt

sind. Informationen über die Verteilung innerhalb des Korridors wurden bei der Validierung nicht berücksichtigt. Diese stochastischen Dummies sind deshalb nur zur Prognose eines Variationsbereiches, nicht aber zur Prognose von Überschreitenswahrscheinlichkeiten geeignet. Weil bei den Robustheitsbewertungen passiver Sicherheitssysteme auch Aussagen von Überschreitenswahrscheinlichkeiten bezüglich gesetzlicher Grenzwerte und Verbraucherschutzkriterien erzielt werden sollen, wurden deshalb „stochastische“ Dummymodelle bisher nicht verwendet. Bei der Validierung neuer „stochastischer“ Dummies sollten Histogramme der Eingangsstreuungen aus der Identifikation der n-Validierungsversuche identifiziert und als Grundlage der statistischen Eingangsinformation verwendet werden. Dann sind auch die Verteilungsinformationen enthalten und es können Wahrscheinlichkeiten von Überschreitungen infolge der Dummystreuungen ermittelt werden.

### 3.1 Statistische Beschreibung der Eingangsgrößen

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

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

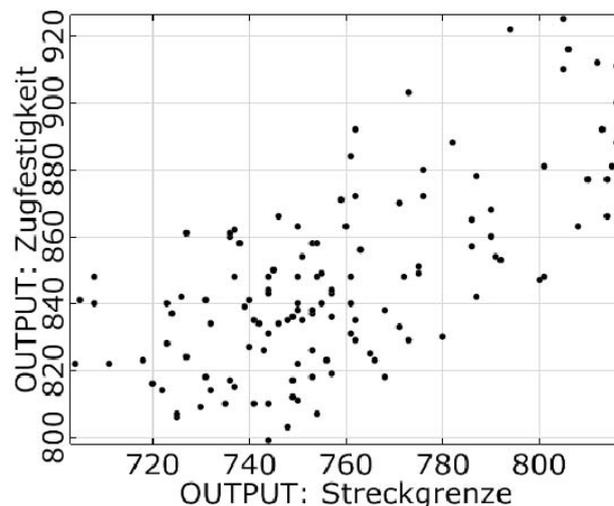


Bild 1: Korrelation zwischen streuender Zugfestigkeit und Streckgrenze eines Stahls

Als Beispiel wichtiger Zusammenhänge zwischen den Eingangsstreuungen sei der Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und der Streckgrenze eines Stahls zu benennen.

Hier würde man einen linearen Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden streuenden Eingangsgrößen zum Beispiel aus vorhandenen Messdaten einer Eingangskontrolle bestimmen (siehe Bild 1 mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.66) und als wichtige Eingangsinformation stochastischer Samplingverfahren berücksichtigen.

### **3.2 Anforderungen an die Automatisierung der CAE Prozesse**

Neben der grundsätzlichen Anforderung eines automatisierten Ablaufes der Realisierung und Durchrechnung eines variierten Design sowie der Extraktion von Bewertungsgrößen können sich aus Robustheitsberechnungen weitere Anforderungen an die Automatisierung der CAE-Prozesse ergeben.

Einen signifikanten Einfluss auf die Streuung wichtiger Antwortgrößen bei den passiven Sicherheitslastfällen zeigen häufig die Streuungen in der Positionierung der Dummies. Bisher wurde bei der automatisierten Variation von h und z-Punkt des Dummy allerdings auf eine Nachjustierung der Positionierung von Füßen und Armen verzichtet. Damit standen die Schuhe nicht mehr exakt im Fußraum. Weil aber die stochastische Variation der Dummypositionierung ein entscheidender Einflussfaktor vieler Robustheitsbewertungen war, ergab sich hier Automatisierungsbedarf bei der Positionierung. In 2006 wurde für MADYMO Dummymodelle eine Aktualisierung der Dummyposition bei Variation des H-Punktes in den automatisierten Ablauf der Robustheitsbewertungen eingeführt.

### **3.3 Numerische Robustheit der CAE Prozesse**

Am Beginn der systematischen Einführung rechnerischer Robustheitsbewertungen wurden für alle Lastfälle parallel Robustheitsbewertungen gegenüber in Natura streuenden Eingangsgrößen und „numerische“ Robustheitsbewertungen gegenüber der Variation numerischer Parameter, durchgeführt. Die Untersuchung der numerischen Robustheit der Modellierungen resultiert aus den Erfahrungen, dass schon das Variieren numerischer Parameter der Approximationsverfahren zu großen Streuungen der Ergebnisgrößen führen kann, beziehungsweise manchmal offensichtlich unbrauchbare Ergebnisse erzielt werden können. Sollen n-Designs berechnet werden und deren Variation statistisch bewertet werden, stellt sich natürlich die Frage, wie viel der Ergebnisvariation infolge von Problemen der Approximationsverfahren herrührt. Bewertungskriterium, ob ein Modell als numerisch robust galt, war das Verhältnis der sich ergebenden Ergebnisstreuung. Waren die Streuungen aus dem Einfluss der Variation numerischer Parameter, wie Zeitschrittkrement, Hourglassmechanismen oder Kontakteinstellungen zum Beispiel um eine Zehnerordnung kleiner als die Streuungen infolge der physikalischen Eingangsstreuungen, ging man davon

aus, dass die Modelle im Verhältnis zur erwarteten realen Streuung der Ergebnisgrößen numerisch stabile Prognosen lieferten. Es stellte sich in den numerischen Robustheitsbewertungen allerdings schnell die Frage, um wie viel die numerischen Parameter variiert werden sollten. Beziehungsweise wie sinnvoll eine Variation numerischer Parameter, welche häufig zuvor an Komponentenverifikationen „eingestellt“ worden sind, überhaupt ist. Zusammenfassend musste festgestellt werden, dass zwar mittels der numerischen Robustheitsbewertungen numerische Probleme der Modelle aufgedeckt werden konnten (wenn resultierende Streuungen eindeutig zu hoch waren oder sich offensichtlich falsche Ergebnisse einstellten), aber eine belastbare quantitative Bewertung ob Modelle numerisch ausreichend „robust“ sind, nicht möglich war. Nicht verschwiegen werden sollte auch der Umstand, dass die numerischen Robustheitsbewertungen für jeden Punkt im „physikalischen“ Raum der Robustheitsbewertungen unterschiedlich sein kann. Als Beispiel seien Kontaktalgorithmen benannt, welche im Referenzdesign unter Variation der numerischen Parameter einwandfrei funktionierten können, aber unter Berücksichtigung der Streuung geometrischer Parameter irgendwann nicht mehr.

### **3.4 Verwendung von Bestimmtheitsmaßen zur Absicherung der Modellrobustheit**

Der Einfluss des numerischen Rauschens auf die Ergebnisse sollte besser über die Bestimmtheit der Robustheitsbewertungen gegenüber in Natura auftretenden Streuungen abgeschätzt werden. Ist das Bestimmtheitsmaß der Robustheitsbewertung hoch, verbleibt nur ein kleiner Anteil für bisher nicht erklärbare Variationsanteile, wovon eine Ursache numerisches Rauschen sein kann. Um die Bestimmtheit von Ergebnisgrößen als quantitatives Maß für die numerische Modellrobustheit zu nehmen, müssen die Bestimmtheitsanteile der gefundenen Zusammenhänge natürlich mit ausreichender statistischer Sicherheit geschätzt werden. Das formuliert dann weitere Anforderungen an das Samplingverfahren, die Anzahl der Durchrechnungen und die statistischen Algorithmen zur Schätzung der Bestimmtheitsmaße [9]. Daraus ergaben sich wichtige Anforderungen an die Weiterentwicklung der stochastischen Verfahren, welche innerhalb der ersten Projektphase schrittweise in optiSLang [19] umgesetzt worden sind. Nach sehr positiven Erfahrungen der Abschätzung des Einflusses numerischen Rauschens über die Bestimmtheitsmaße von Robustheitsbewertungen, wurde die Arbeitsweise für den Serieneinsatz umgestellt. Jetzt werden für alle wichtigen Lastfälle Robustheitsbewertungen gegenüber in Natura auftretenden Streuungen durchgeführt und nur in Fällen geringer Bestimmtheitsmaße numerische Robustheitsbewertungen zur Diagnose der numerischen Probleme eingesetzt. Dabei konnten in der Regel bei „numerisch“ robusten Modellen Bestimmtheiten unter

Berücksichtigung von linearen und quadratischen Zusammenhängen und nach Eliminierung von Ausreißern und Clusterungen von über 80% ermittelt werden. Sanken die Bestimmtheitsmaße unter 60 % war das bisher immer ein sicheres Indiz, dass diese Ergebnisgröße ein unakzeptabel hohes Maß an numerischem Rauschen aufwies. Ursachen hierfür waren Unzulänglichkeiten der Ergebnisextraktion, aber vor allem Unzulänglichkeiten der numerischen Modelle in Interaktion mit den numerischen Approximationsverfahren. Nach Reparatur der numerischen Modellierungen stiegen die Bestimmtheitsmaße in der Regel wieder auf über 80%.

Es sei darauf hingewiesen, dass es theoretisch nicht möglich ist, den Anteil numerischen Rauschens zweifelsfrei zu bestimmen. Der Umweg über das Ausschlussverfahren von linearen und quadratischen Zusammenhängen sowie des Einflusses von Ausreißern oder Clusterungen auf die Bestimmtheitsmaße ermittelt aber einen Rest „unerklärter“ Streuung der Ergebnisgrößen, die potentiell aus höherdimensionalen (kubisch, sinusförmig) Zusammenhängen, weiteren Nichtlinearitäten (Verzweigungspunkte) oder eben aus numerischem Rauschen herrühren. Von dieser Diagnose ausgenommen sind natürlich systematische Fehler oder das Unvermögen wichtige physikalische Effekte von Eingangsvariationen auf Ausgangsvariationen überhaupt abzubilden. Die grundsätzliche Prognosefähigkeit der numerischen Modelle muss mittels Verifikationen zu Versuchsdaten erfolgen. Das Thema Verzweigungspunkte ist hier sicherlich gesondert zu diskutieren. Systeme mit Verzweigungspunkten, die im Streubereich von Eingangsgrößen unterschiedlich durchlaufen werden können und dann zu signifikant anderen Systemantworten führen, würde man im Sinne robuster Designs wohl weitgehend verhindern wollen. Grundsätzlich müssen sich aber auch zu diesen Ereignissen Korrelationen zu Eingangsstreuungen finden lassen, sonst würde es bedeuten, dass diese Verzweigungen zufällig auftreten und wir es mit sehr sensiblen dynamischen Systemen zu tun haben.

Bei robusten Designs sollten die Zusammenhänge zwischen Eingangsvariation und Ausgangsvariation identifizierbar sein. Diese Zusammenhänge zeigen dann auch die Möglichkeiten auf, die Ergebnisstreuungen zu beeinflussen. So können zur Reduktion von Überschreitenswahrscheinlichkeiten z.B. bei linearen Zusammenhängen Mittelwerte verschoben werden, bei quadratischen Zusammenhängen Eingangsstreuungen reduziert werden oder das Übertragungsverhalten zwischen Eingangsstreuung und Ausgangsstreuung wird durch konstruktive Änderungen verändert.

#### **4. 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
- Robustheitsbewertung wichtiger Crashlastfälle, Schätzung der Variation wichtiger Fahrzeugbewertungsgrößen, überprüfen ob infolge der Variation der Performancegrößen Grenzwerte überschritten werden
- Überprüfen der Modellrobustheit/Modellstabilität mittels Bestimmtheitsmaßen
- 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

Innerhalb beziehungsweise als Ergebnis einer Phase 1 wird diskutiert und festgelegt:

- zu welchem Zeitpunkt 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
- wie Streuungen von kritischen 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

Im zweiten Jahr der serienmäßigen Anwendung stochastischer Analysen in der Insassensimulation bei BMW befinden wir uns in Phase 2. 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 und Absicherung des Wissens um deren Streuungen

- Identifikation von Modellschwächen und Reduktion numerischen Rauschens bei den wichtigen Fahrzeugbewertungsgrößen. Damit Erhöhung der Modellrobustheit/Modellstabilität und der Prognosesicherheit der Crashtestberechnungen
- Erkennen von Robustheitsproblemen der Rückhaltesysteme in Fällen mit häufigem Überschreiten angestrebter Grenzwerte mit der Konsequenz der Neuauslegung/Überarbeitung von Komponenten
- Weiterentwicklung der numerischen Methode der Robustheitsbewertungen (quadratische Korrelationen, Bestimmtheitsmaße, vertrauenswürdige Schätzung von Überschreitenswahrscheinlichkeiten aus Histogrammen)
- Weiterentwicklung des Automatisierungsgrades der Robustheitsbewertungen durch eine automatische Nachjustierung der Dummypositionierung für MADYMO Modelle

## 5. Praktische Anwendungen

### 5.1 Robustheitsbewertung USNCAP

Für den Lastfall USNCAP (Frontcrash 56 km/h gegen starre Wand) wurde die Robustheit bezüglich wichtiger Bewertungsgrößen des Fahrer untersucht. Das Modell wurde in MADYMO erstellt und berechnet. Die Robustheitsbewertung wurde mit optiSlang durchgeführt [10]. Es werden wichtige Teile des Rückhaltesystems und der Dummy als MKS-Formulierung sowie eine FE-Formulierung für den Airbag verwendet.

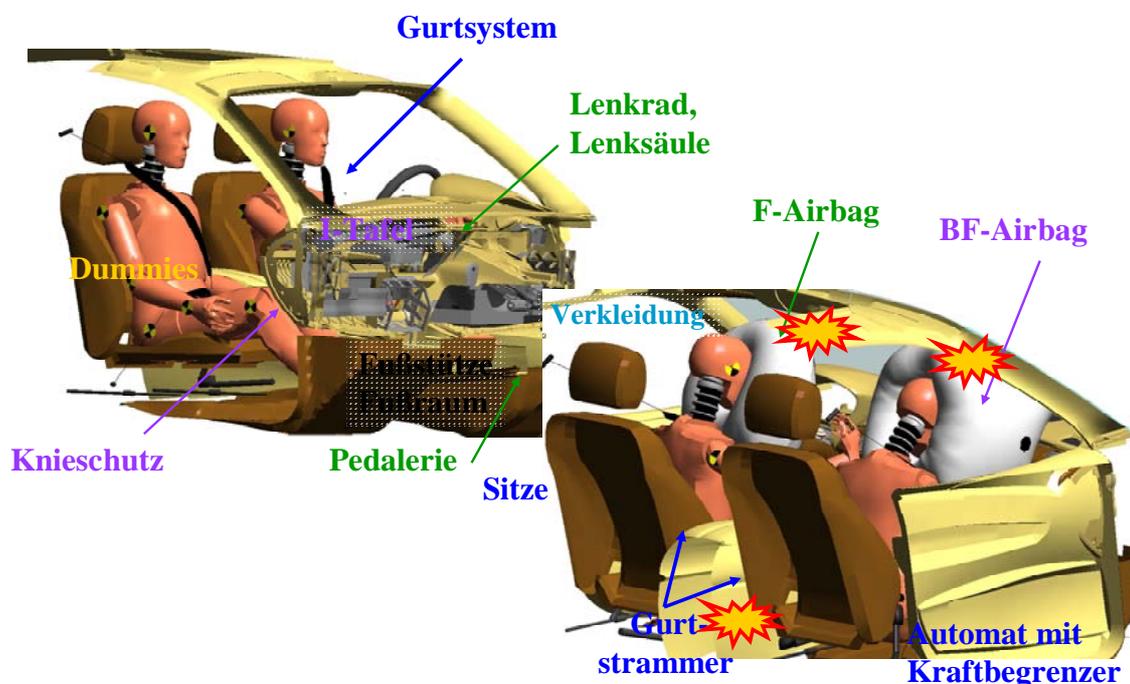


Bild 2: Simulation Frontaufprall Lastfall USNCAP

Zur Robustheitsbewertung wurden 200 Varianten mit einem Latin Hypercube Sampling erstellt und berechnet. Das Simulationsmodell des Airbags wurde vom Zulieferer an Komponentenversuchen validiert und bei BMW in das Insassenmodell integriert. Es wurden insgesamt 9 physikalische Parameter der MKS/FE-Modellierung variiert und 12 Dummyergebnisgrößen in der Robustheitsbewertung untersucht. Zur Definition der Streuungen wurden Normalverteilungen bzw. abgeschnittene Normalverteilungen verwendet. Folgende streuende Eingangsgroßen wurden in der Robustheitsbewertung berücksichtigt:

- Streuung der Zündzeitpunkte von Airbag und Kraftbegrenzer
- Streuung Sitzposition des Dummy
- Streuung Massenstrom, Permeabilität des Airbag
- Streuung Kraftbegrenzer
- Streuung Reibung zwischen Dummy und Airbag sowie zwischen Dummy und Gurt

Die Streuung folgender Ergebnisgrößen wurde in der Robustheitsbewertung analysiert.

- Head resultant acceleration 3 ms
- Chest 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

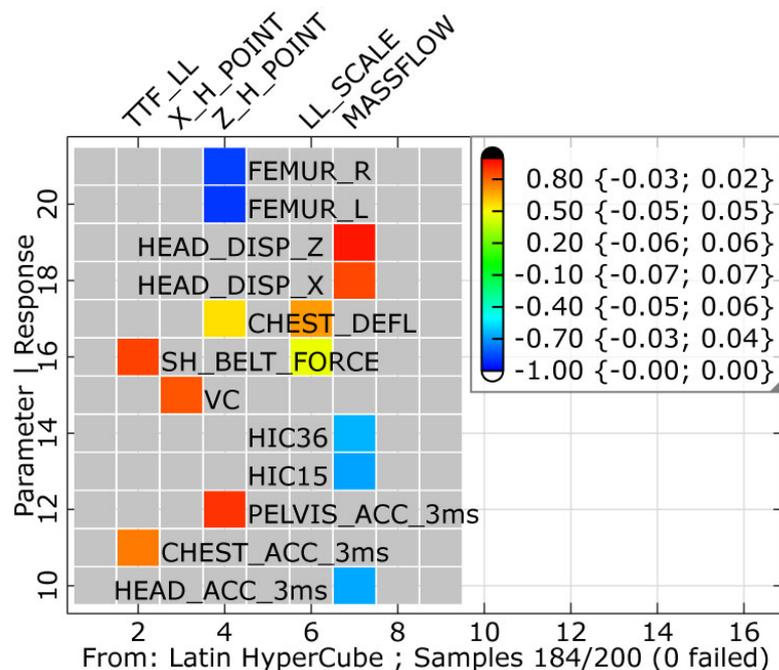


Bild 3: Lineare Korrelationsstruktur

Von den 9 Eingangsstreuungen besitzen nur 5 Eingangsgrößen nennenswerte Korrelationen zu den Ergebnisgrößen. In der Matrix der linearen Korrelationen (Bild 3) konnten für alle wichtigen Bewertungsgrößen nennenswerte lineare Abhängigkeiten (Korrelationskoeffizienten > 0.50) zu Eingangsstreuungen ermittelt werden. Für die meisten Ergebnisgrößen konnten hohe Bestimmtheitsmaße (>80%) linearer bzw. quadratischer Korrelation (siehe Bild 4 mit 97 % Bestimmtheit für das Maximum der Oberschenkelkräfte) ermittelt werden. Die wichtige Ergebnisgröße HIC36 zeigte allerdings nur ein Bestimmtheitsmaß von 66 % (Bild 5).

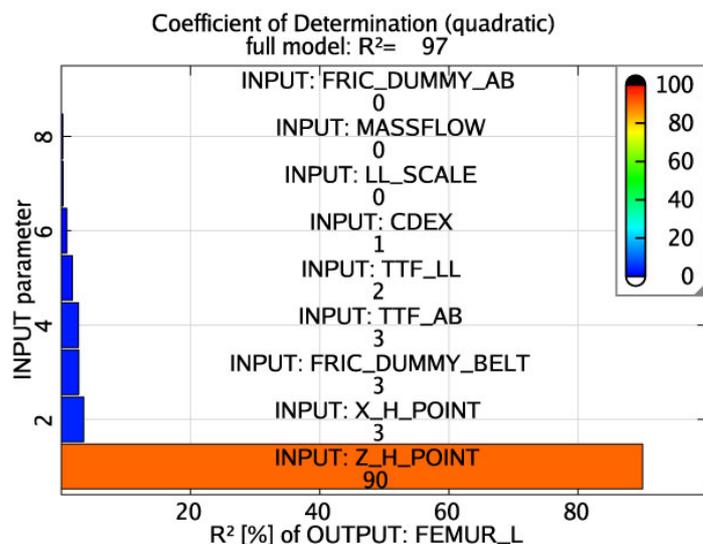


Bild 4: Bestimmtheitsmaße Oberschenkel Kraft links

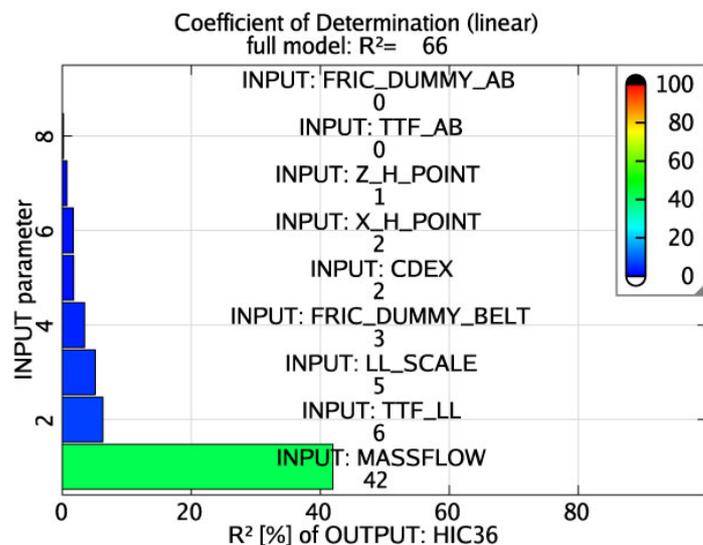


Bild 5: Bestimmtheitsmaß HIC36

Auch Tests auf quadratische Korrelationen, Ausreißer oder Clusterungen konnten keine weiteren Zusammenhänge aufzeigen. Weil bezüglich der Streuung des HIC36-Wertes ein

großer Anteil der Streuung der Ergebnisgrößen nicht über aufgefundene Zusammenhänge zu streuenden Eingangsgrößen erklärt werden kann, wird hier ein signifikantes Maß an numerischem Rauschen vermutet. Es wurde deshalb das Referenzdesign für den Fahrer auf numerische Robustheit untersucht. Es wurden insgesamt 17 numerische Parameter, wie zum Beispiel Skalierungsfaktoren der Zeitschritte, der Kontakte oder „numerischer“ Dämpfungsfaktoren der MKS/FE-Modellierung variiert und 22 Dummyergebnisgrößen in der Robustheitsbewertung untersucht. Für die USNCAP Bewertung wurden aus dem Set der beobachteten Antwortgrößen die zwei Antwortgrößen (Thorax Beschleunigung 3ms, HIC36) bewertet. Entscheidendes Kriterium der numerischen Robustheit ist das Maß der Variation wichtiger Ergebnisgrößen gegenüber den zu erwartenden Streuungen einer physikalischen Robustheitsbewertung. Wie ein Plot im Sternbereich zeigt (Bild 6), konnten sehr große Variationen beobachtet werden, die ungefähr in der Größenordnung der Streuung infolge physikalischer Eingangsstreuungen für diesen Lastfall liegen. Weil diese Größenordnung numerischen Rauschens nicht akzeptabel ist, wurden die dafür verantwortlichen Eingangsgrößen identifiziert.

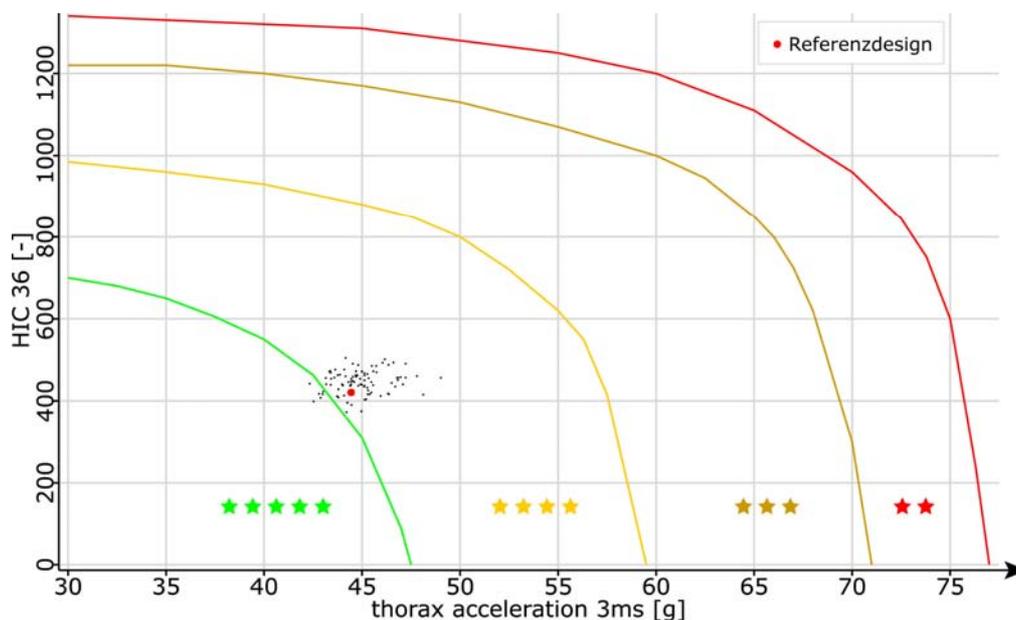


Bild 6: Visualisierung des numerischen Rauschens im Sterne Diagramm, USNCAP Rating

In der Matrix der linearen Korrelationen (Bild 7) ist deutlich zu erkennen, dass nur zur Variation des Mehrkörper-Zeitschritt nennenswerte Korrelationen existieren, die bei einigen Ergebnisgrößen Korrelationskoeffizienten von 0.7 erreichen. Weiterhin konnten in den Anthill Plots Clusterungen identifiziert werden (Bild 8). 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 (Bild 9), 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. (Hinweis: Zu diesem Zeitpunkt hatte sich auch der Performancewert des Referenzdesigns durch konstruktive Maßnahmen in den 5-Sterne Zielbereich verschoben). Zusammenfassend für diesen Lastfall konnten Modellierungsfehler identifiziert und eliminiert werden und die abschließenden Robustheitsbewertungen zeigten ein akzeptables Maß an Streuung wichtiger Bewertungsgrößen.

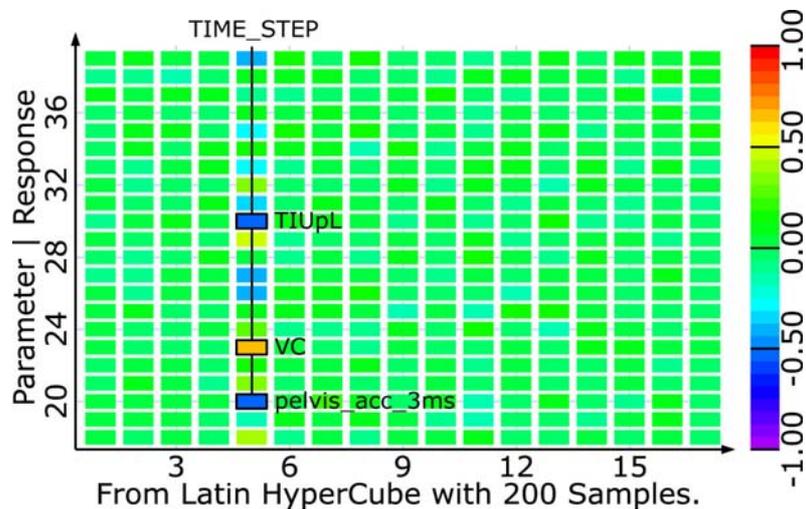


Bild 7: Lineare Korrelationsmatrix

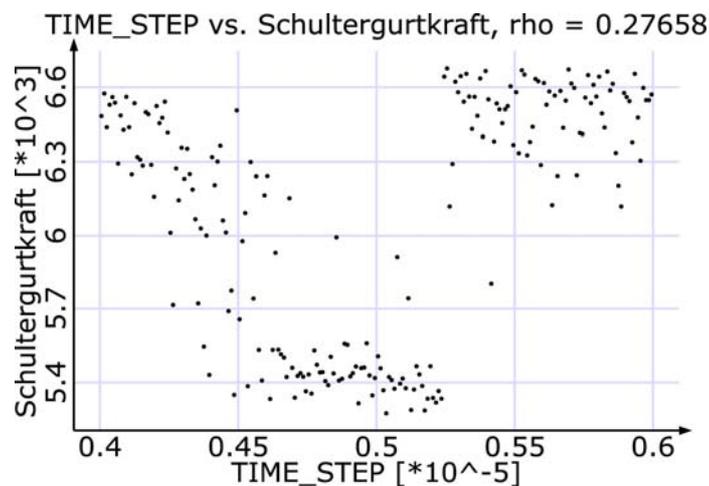


Bild 8: Visualisierung von Zusammenhängen zwischen der Variation des Mehrkörper-Zeitschritts und der Schultergurtkraft im Anthill-Plot

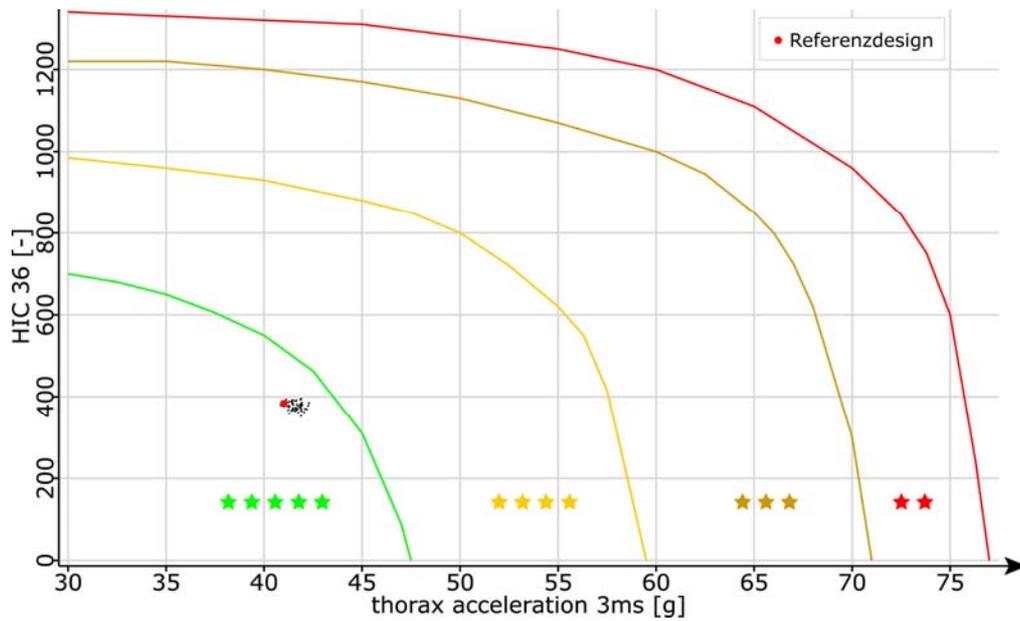


Bild 9: Visualisierung des numerischen Rauschens im Sterne Diagramm, USNCAP Rating

## 5.2 Robustheitsbewertung FMVSS 208

In einem frühen Stadium der Fahrzeugentwicklung wurde für den Lastfall FMVSS 208 (Frontcrash 40 km/h ungegurtet gegen starre Wand) die Robustheit bezüglich wichtiger Bewertungsgrößen des Fahrers sowie des Beifahrers untersucht.

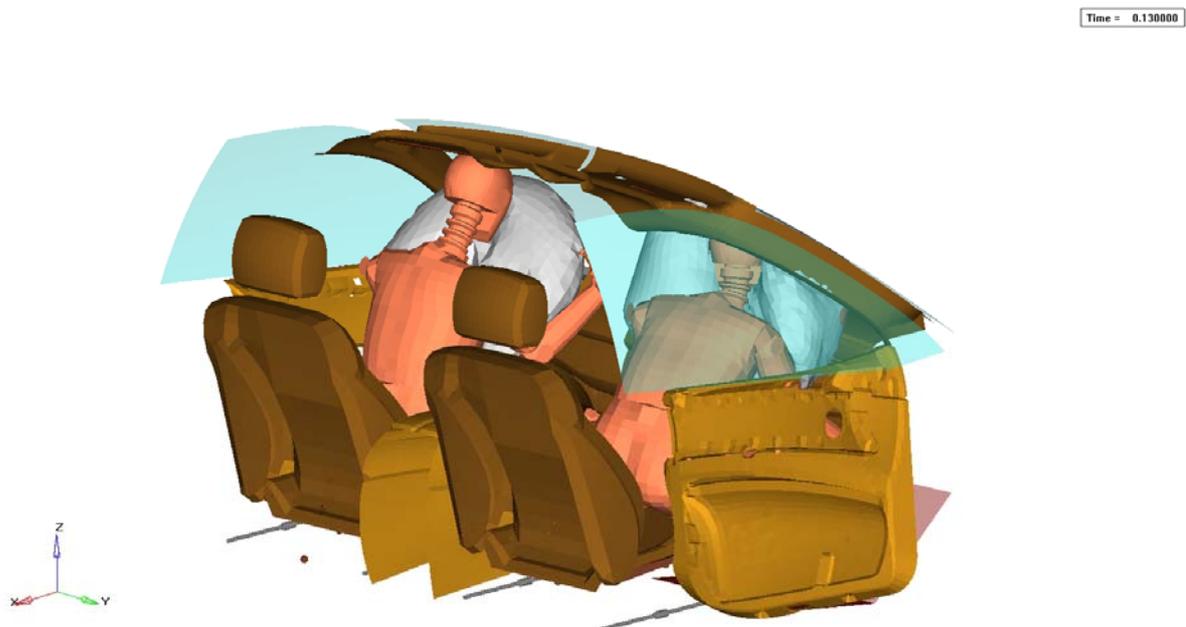


Bild 10: Simulation Insassenschutz Lastfall FMVSS 208

Das Modell wurde in MADYMO erstellt und berechnet. Es werden wichtige Teile des Rückhaltesystems und der Dummy als MKS-Formulierung sowie eine FE-Formulierung für den Airbag verwendet. Zur Robustheitsbewertung wurden 200 Varianten mit einem Latin Hypercube Sampling erstellt und berechnet. Es wurden insgesamt 27 physikalische Parameter der MKS/FE-Modellierung variiert und 18 Dummyergebnisgrößen in der Robustheitsbewertung untersucht. Zur Definition der Streuungen wurden Normalverteilungen bzw. abgeschnittene Normalverteilungen verwendet. Folgende streuende Eingangsgrößen wurden in der Robustheitsbewertung berücksichtigt:

- Streuung der Zündzeitpunkte von Airbag und Kraftbegrenzer
- Streuung Sitzposition
- Streuung Dummyposition
- Streuung Massenstrom, Permeabilität des Airbag
- Streuung Puls
- Streuung Kraftbegrenzer
- Streuung Fußraum, Fußstütze, Pedal, Befederung
- Streuung Reibung zwischen Dummy und Airbag, Airbag und Lenkrad sowie zwischen Dummy und Sitz

Folgende Ergebnisgrößen wurden in der Robustheitsbewertung untersucht :

- Head resultant acceleration 3 ms exceedence
- Chest resultant acceleration 3 ms exceedence
- Pelvis resultant acceleration 3 ms exceedence
- HIC15 head injury criterion 15 ms
- Head displacement x
- Pelvis displacement x
- Chest deflection
- Steering column displacement
- Neck compression
- Neck tension
- Neck injury: tension-extension
- Neck injury: tension-flexion
- Neck injury: compression-extension
- Neck injury: compression-flexion
- Distance head – roof (virtual penetration)

Wichtigstes Ergebnis der Robustheitsbewertung sind die prognostizierten Variationsintervalle der Streuungen der Bewertungsgrößen (Bild 11). Obwohl keine Grenzwerte überschritten werden, ist die Streuung einzelner Bewertungsgrößen hoch.

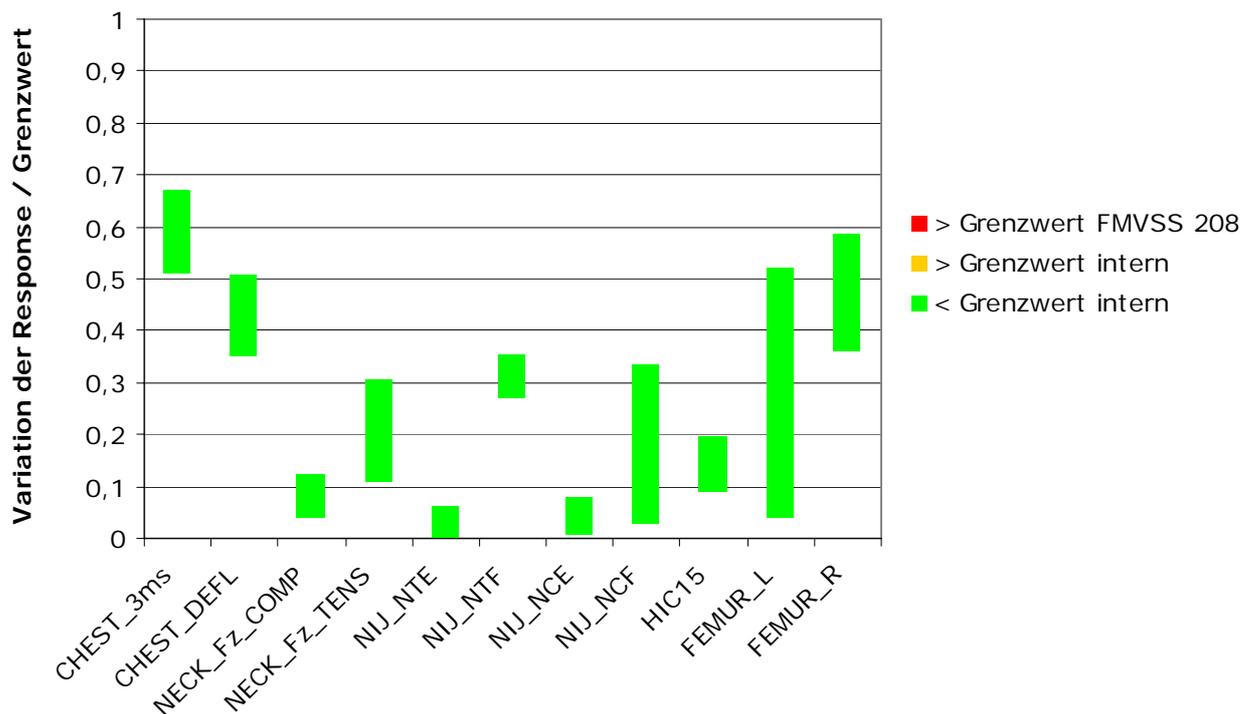


Bild 11: Visualisierung der Variationsbereiche

Von den 29 Eingangsstreuungen besitzen nur 9 Eingangsgrößen nennenswerte Korrelationen zu den Ergebnisgrößen. In der Matrix der linearen Korrelationen (Bild 12) konnten nicht für alle wichtigen Bewertungsgrößen nennenswerte lineare Abhängigkeiten (Korrelationskoeffizienten  $> 0,50$ ) zu Eingangsstreuungen ermittelt werden. Das kann das ein Indiz für einen hohen Anteil numerischen Rauschens sein. Deshalb wurde für diese Ergebnisgrößen untersucht, ob mittels quadratischer Korrelationen beziehungsweise unter Eliminierung von Nichtlinearitäten (Ausreißer oder Clusterungen) höhere Bestimmtheitsmaße erzielt werden können. Es konnten allerdings außerhalb linearer Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ergebnisstreuungen keine weiteren Zusammenhänge identifiziert werden, die nennenswert Beitrag zum Bestimmtheitsmaß liefern. Die Bestimmtheit für die einzelnen Ergebnisgrößen ist dabei häufig sehr unterschiedlich. So kann die Maximalkraft im Oberschenkel (Bild 13) mit einer sehr hohen Bestimmtheit erklärt werden, die Variation des HIC-Wertes aber nur zu weniger als 50% (Bild 14).

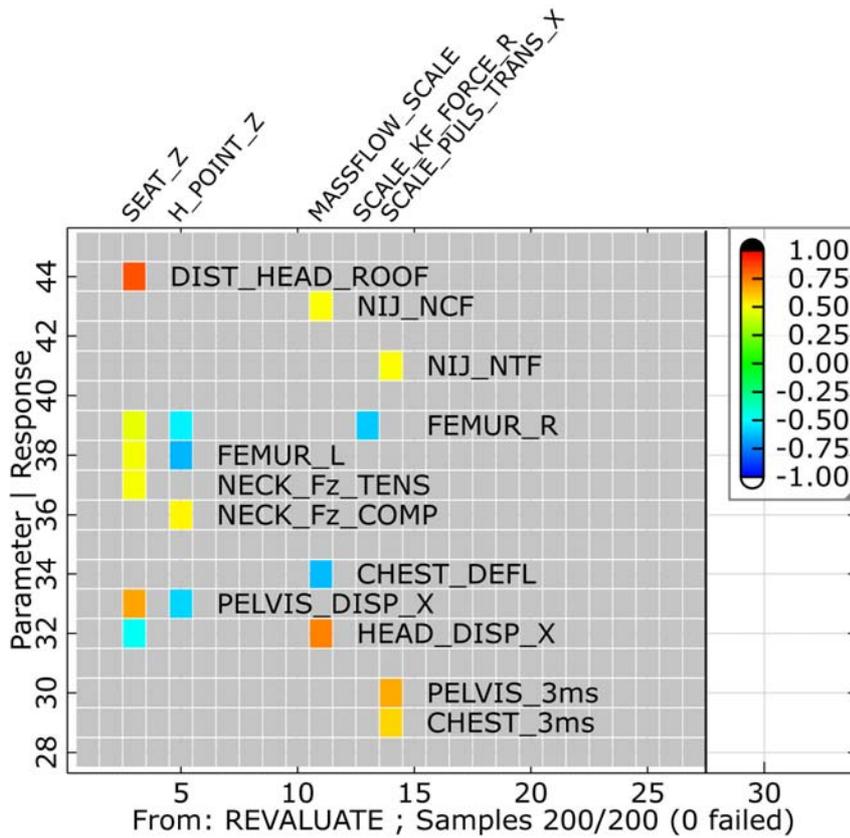


Bild 12: Matrix der linearen Korrelationen

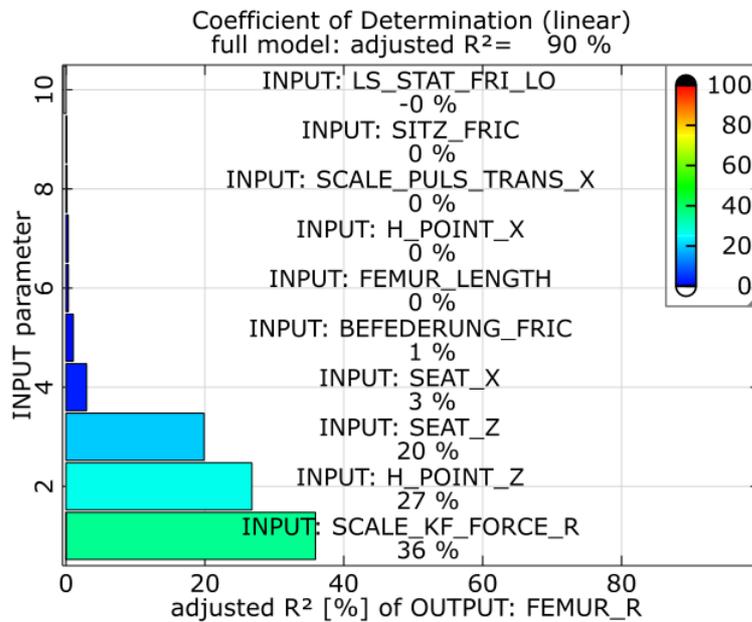


Bild 13: Bestimmtheitsmaß Oberschenkelkraft rechts

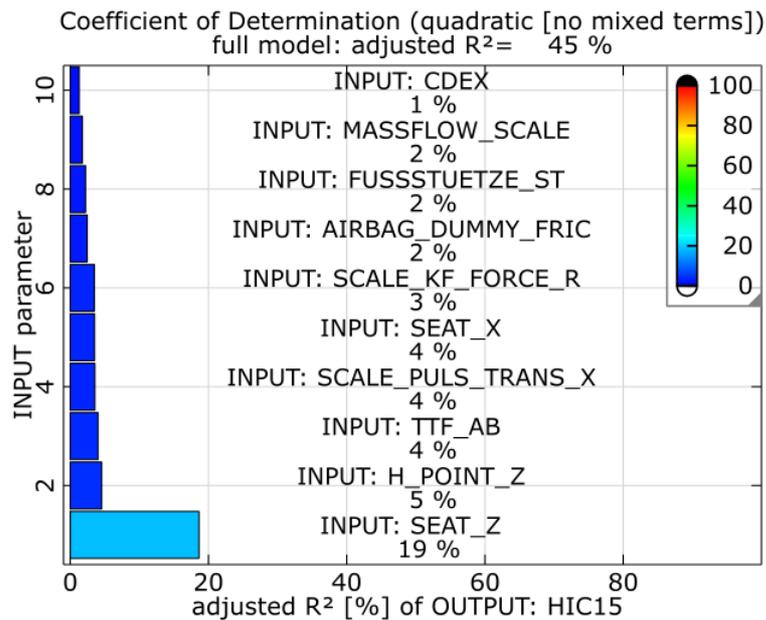


Bild 14: Bestimmtheitsmaß HIC15

Deshalb wurde zur Überprüfung der Modellrobustheit eine numerische Robustheitsbewertung am Referenzmodell durchgeführt. Es wurden 8 numerische Parameter, wie zum Beispiel Skalierungsfaktoren der Zeitschritte, der Kontakte oder „numerischer“ Dämpfungsfaktoren der MKS/FE-Modellierung variiert sowie die Streuungen der 18 Ergebnisgrößen ausgewertet. Die resultierenden Streuungen der Bewertungsgrößen wurden mit den Streuungen aus der physikalischen Robustheitsbewertung verglichen (Bild 15). Erwartungsgemäß ist das numerische Rauschen auf Größen hoher Bestimmtheit der physikalischen Robustheitsbewertung, wie den Oberschenkelkräften vernachlässigbar gering. Bei der Bewertungsgröße HIC15 treten erwartungsgemäß nennenswerte Streuungen infolge der Variation numerischer Parameter auf. Kritisch sind in diesem Modell auch die im Vergleich zur physikalischen Robustheitsbewertung großen Streuungen der Brustwerte. Obwohl diese Bewertungsgrößen in der physikalischen Robustheitsbewertung Bestimmtheitsmaße >70% zeigten, ist deren Streuung infolge der Variation numerischer Parameter noch deutlich größer als die der HIC15-Werte. Es kann also nicht davon ausgegangen werden, dass das Maß des numerischen Rauschens, bezogen auf das Variationsintervall, linear aus den Bestimmtheitsmaßen abzuleiten ist. Treten nennenswert Variationen in den numerischen Robustheitsbewertungen auf, kann wohl nur davon ausgegangen werden, dass die Streuungsprognose der physikalischen Robustheitsbewertung zu groß ist. Es konnten allerdings keinerlei auffällige Korrelationen (lineare oder quadratisch) einzelner Eingangsvariationen numerischer Kennwerte bezüglich

der beobachteten Streuung der Bewertungsgrößen beobachtet werden. Damit konnten aus der numerischen Robustheitsbewertung nicht direkt Ursachen des numerischen Rauschens identifiziert werden.

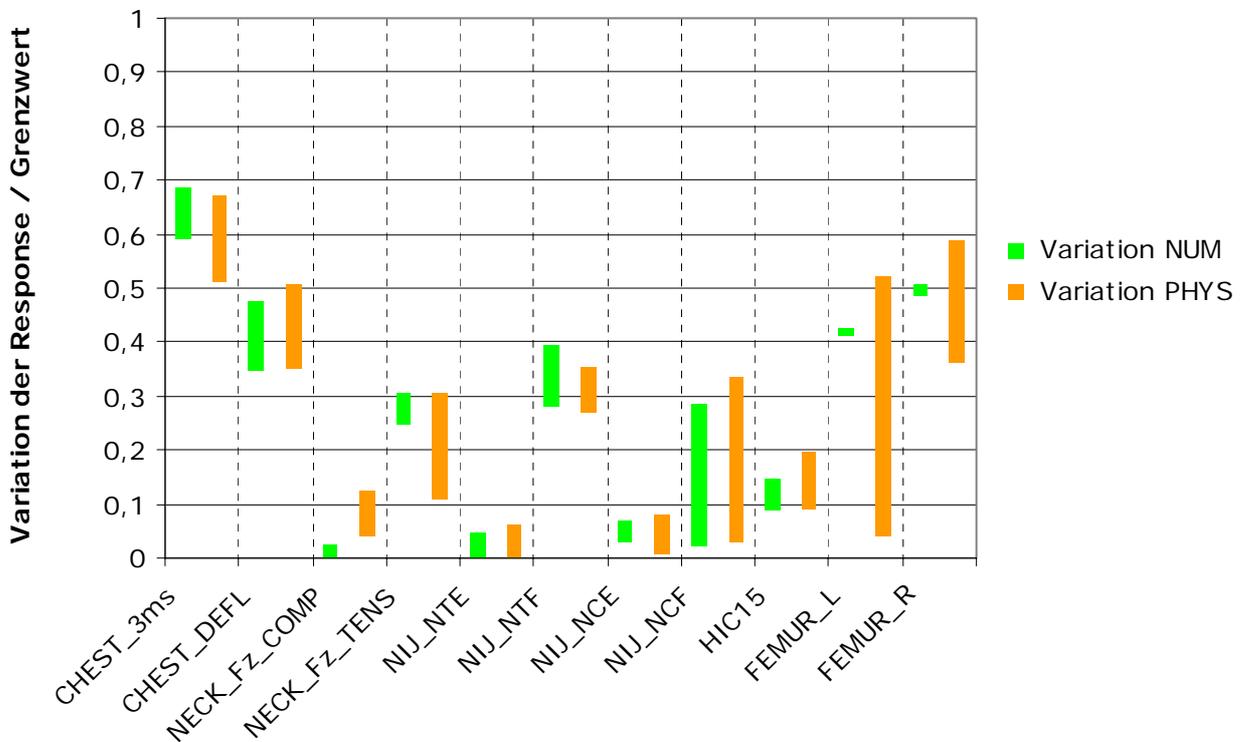


Bild 15: Vergleich der Variationsintervalle von physikalischer und numerischer Robustheitsbewertung

Die Robustheitsbewertung in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung zeigen, dass die Bewertungsgrößen inklusive der Berücksichtigung der Eingangsstreuungen unterhalb der angestrebten Grenzwerte liegen. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass der Modellierungsstand der MKS/FE-Modelle für diesen Lastfall ein hohes Maß an numerischen Rauschen mit sich bringt, das bei der Prognose deterministischer Ergebnisse (Einzelwert) oder stochastischer Ergebnisse (Variationsbereiche) zu hohen Unsicherheiten führt. Deshalb werden die Modelle bis zum nächsten Meilenstein mit der Zielstellung überarbeitet, dass numerischen Rauschen zu verkleinern.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Methodik erarbeitet und in den Regelprozess zur virtuellen Auslegung von Rückhaltesystemen integriert, die es erlaubt, den Einfluss streuender Eingangsgrößen auf wichtige Bewertungsgrößen zu untersuchen. Primäres Ergebnis der Robustheitsbewertung

ist die Prognose über den Streubereich der Bewertungsgrößen und damit verbundene Wahrscheinlichkeiten der Einhaltung von Verbraucherschutzkriterien. Sekundäres Ergebnis ist eine Sicherung der numerischen Stabilität der Modelle und die Identifikation der Eingangsstreuungen, die maßgeblich die Ausgangsstreuungen verursachen. Damit geben die Robustheitsbewertungen wichtige Hinweise auf notwendige Verbesserungen der MKS/FE Modelle sowie für die Notwendigkeit zur Reduzierung von Eingangsstreuungen oder Hinweise auf notwendige Modifikationen der Rückhaltesysteme.

Die Annahmen streuender Eingangsvariablen, die wesentlich verantwortlich für die Streuung wichtiger Ergebnisgrößen sind, werden systematisch validiert und wo möglich, mit Messwerten hinterlegt. Zentrales Bewertungsmaß zur numerischen Stabilität der Modelle sind die Bestimmtheitsmaße. Können für wichtige Ergebnisgröße nur Bestimmtheiten kleiner als 80% ermittelt werden, werden numerische Robustheitsbewertungen zur Abschätzung des Maßes des numerischen Rauschens durchgeführt. Gleichzeitig werden Korrelationen zwischen der Variation numerischer Parameter und wichtiger Ergebnisgrößen und Vergleiche zwischen stark variierenden Ergebnissätzen zur Identifikation der numerischen Probleme herangezogen.

Damit wird gesichert, dass alle für die zu bewertenden Performancegrößen wesentlichen Eingangsstreuungen realitätsnah erfasst sind und die numerischen Modellierungen wenig numerisches Rauschen verursachen und sowie die Prognosen über die Streuung der Ergebniswerte belastbar sind.

## 7. Literaturangaben

- [1] Bucher, C.: Simulation methods in stochastic structural mechanics. In E. Bielewicz and I. Lubowicz, editors, *Simulations in Urban Engineering*, pages 29–50. Gdansk, 2004.
- [2] Will, J.; Möller, J-St.; Bauer, E.: Robustheitsbewertungen des Fahrkomfortverhaltens an Gesamtfahrzeugmodellen mittels stochastischer Analyse, VDI-Berichte Nr.1846, 2004, S.505-527
- [3] Will, J., Baldauf, H.: Robustheitsbewertungen bezüglich der virtuellen Auslegung passiver Fahrzeugsicherheit; Proceedings Weimarer Optimierung- und Stochastiktag 2.0, 2005, Weimar, Germany
- [4] Will, J; Bucher, C.: Robustness Analysis in Stochastic Structural Mechanics, Proceedings NAFEMS Seminar Use of Stochastics in FEM Analyses; May 2003, Wiesbaden
- [5] Bucher, C.: Adaptive Sampling – An Iterative Fast Monte Carlo Procedure, *Structural Safety* 5, Nr. 2, 1988
- [6] Bucher, C.; Macke, M.: Response surface methodology, In E. Nikolaidis, D. M. Ghiocel, and S. Singhal, editors, *Structural Reliability Handbook*, pages 19–1 to 19–23. CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [7] Ditlevsen, O.; Bjerager, P.; Olesen, P.; Hasover, R.: Directional Simulation in Gaussian Processes, *Probabilistic Engineering Mechanics* 3, 1988, Nr. 4, S. 207-217
- [8] Rackwitz, R. Fissler, B.: Structural reliability under combined under combined random load sequences”, *Computers and Structures* 9, S. 489-494, 1988
- [9] Will, J.; Bucher, C.: Statistische Maße für rechnerische Robustheitsbewertungen CAE-gestützter Berechnungsmodelle, eingereicht bei Proceedings Weimarer Optimierung- und Stochastiktag 3.0, 23./24. November 2006, Weimar, Germany, [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)
- [10] optiSLang - the Optimizing Structural Language Version 2.1, DYNARDO, Weimar, 2006, [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)