

Robustheitsbewertungen bei der virtuellen Auslegung passiver Sicherheitssysteme und beim Strukturcrash

Johannes Will^{1*}, Hans Baldauf², Christian Bucher¹

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. In Realität können bei den Crashtests erhebliche Streuungen wichtiger Fahrzeugbewertungsgrößen festgestellt werden. Ursache hierfür sind Streuungen von Eingangsgrößen, sowohl Größen der Auslegung passiver Sicherheitssysteme sowie der Fahrzeugstruktur oder der Testbedingungen. Eine rechnerische Robustheitsbewertung wichtiger Ergebnisgrößen gegenüber diesen Eingangsstreuungen kann nur durch eine Integration stochastischer Simulationsmethoden in die virtuelle Produktentwicklung erreicht werden [1-2]. 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. In der Veröffentlichung werden kurz die Grundlagen rechnerischer Robustheitsbewertung vermittelt und Erfahrungen bei der systematischen Einführung rechnerischer Robustheitsbewertungen bei der BMW AG [3] diskutiert. Auf Grund der Komplexität Finiter Elemente-Modelle ist deren numerischer Robustheit besondere Aufmerksamkeit zu schenken. An Hand einer Robustheitsbewertung eines Frontalcrashlastfalles der ULSAB-Studie wird eine Vorgehensweise der Identifikation und der Quantifizierung numerischen Rauschens vorgestellt.

Keywords: Robustheitsbewertungen, Bestimmtheitsmaße, optiSLang

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

1 Einführung

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.

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
- 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.

Weil bei der Bewertung der Robustheit bezüglich der Fahrzeugsicherheit nicht die Absicherung kleiner Überschreitenswahrscheinlichkeiten im Vordergrund steht, eignen sich Robustheitsbewertungen mittels Varianzanalyse [1]. Primäres Ziel rechnerischer Robustheitsbewertungen mittels Varianzanalyse ist die Prognose des Variationsbereiches wichtiger Antwortgrößen und deren Bewertung nach den Anforderungen „robuster“ Rückhaltesysteme. In der passiven Sicherheit werden hierfür 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 Anzahl der Fahrzeuge erfüllt sein, es steht aber derzeit nicht im Vordergrund, seltene Überschreitenswahrscheinlichkeiten nachzuweisen. Sollen kleine Wahrscheinlichkeiten (zum Beispiel kleiner als 1 aus 1000) abgesichert werden, sollten Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse zum Einsatz kommen [4-7]. 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.

Sekundäres Ziel der Robustheitsbewertung ist die Identifikation der Zusammenhänge (Korrelationen) zwischen Eingangs- und Ergebnisstreuung und eine Quantifizierung der damit erklärbaren Variationsbestandteile der Ergebnisgrößen sowie eine Quantifizierung des Einflusses des „numerischen“ Rauschens auf die Ergebnisstreuung.

2 Rechnerische Robustheitsbewertung mittels Varianzanalyse

Zur Bewertung der Robustheit werden alle potentiellen Eingangsstreuungen bzw. Unsicherheiten der Modellbildung mittels streuender Eingangsgrößen in die numerischen Modelle der virtuellen Produktentwicklung eingeführt. Mittels geeigneter Samplingverfahren wird ein Stichprobenset von n-möglichen Fahrzeugen und n-möglichen Randbedingungen der Crashtests erzeugt und diese Konfigurationen durchgerechnet. 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.

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 [8] wird in der Folge abgeschätzt, welcher Anteil 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 (>90%), sind die wesentlichen Zusammenhänge über die zugrunde liegende Korrelationshypo-

these erklärbar. Je kleiner die Bestimmtheitsmaße werden, je größer wird der Anteil an der Variation der Ergebnisgrößen, der mittels der Korrelationshypothese (z.B. linear und quadratisch) nicht mehr 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 klein und damit 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 typischen Rückhaltesystemen ca. 100 bis 200 Durchrechnungen pro zu bewertendem Lastfall [8]. 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.

2.1 Statistische Beschreibung der Eingangsstreuungen

Wichtige streuende Eingangsgrößen der virtuellen Auslegung von Rückhaltesystemen sind z.B. Streuungen der Airbagkenngrößen, Streuungen im Gurtsystem und der Sitzpositionen des Crashtestdummy oder Streuungen der Strukturbauteile.

Die Belastbarkeit der Prognose der Ausgangsstreuungen hängt explizit mit der Realitätsnähe der Definition der Eingangsstreuungen zusammen. In praktischen Anwendungen ist häufig nicht davon auszugehen, dass alle wesentlichen Eingangsstreuungen am Beginn stochastischer Berechnungen realitätsnah erfasst werden können. Deshalb wird man realistischere mit relativ groben Annahmen über Eingangsstreuungen beziehungsweise Eingangsunsicherheiten starten und dann schrittweise das Wissen über wichtige Eingangsstreuungen verbessern.

Die Eingangsstreuungen werden in der stochastischen Analyse 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, $r = 0.660$

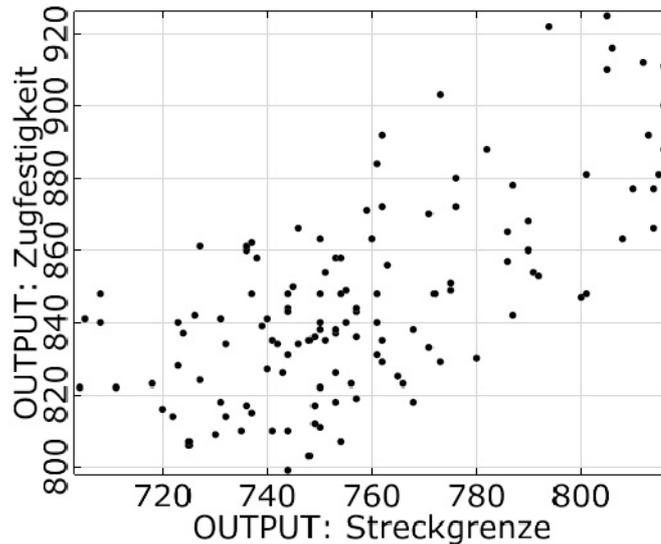


Abbildung 1: Korrelation zwischen streuender Zugfestigkeit und streuender Streckgrenze eines Stahls

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 Abbildung 1 mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.66) und als wichtige Eingangsinformation stochastischer Samplingverfahren berücksichtigen.

3 Anforderungen an eine erfolgreiche Integration von Robustheitsbewertungen in virtuelle Entwicklungsprozesse

Zur systematischen Einführung stochastischer Berechnungsmethoden sind folgende wesentliche Randbedingungen zu erfüllen:

- Numerisches Modell und Simulationsmethode müssen grundsätzlich prognosefähig und damit in der Lage sein, alle wichtigen physikalischen Phänomene abzubilden und mit einzelnen Versuchswerten abgeglichen werden können. Der Berechnungsprozess ist in Bezug auf die Eingangsstreuungen zu parametrisieren und muss automatisiert abgearbeitet werden können.
- 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.

- Es muss eine stochastische Methodik zur Robustheitsbewertung verwendet werden, welche sichert, dass die Fehler in der Schätzung der statistischen Kennwerte klein genug sind und die Ergebnisse als belastbare Grundlage einer Robustheitsbewertung herangezogen werden können.
- Es müssen aussagekräftige, zuverlässige statistische Kennwerte zur Bewertung der Robustheit abgeleitet werden. Der Bewertungsprozess ist zu automatisieren und zu standardisieren.

Weiterhin sollte man 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. Die numerische Robustheit der Berechnungsmodelle ist nicht gesichert:

- 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:

- 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
- welche numerischen Modellierungen verbessert werden müssen

Phase 2: sensible streuende Eingangsgrößen sind bekannt, die Annahmen dieser Streuungen sind verifiziert und die numerische Robustheit der Modelle ist gesichert:

- mit gesichertem Wissen über die Eingangsstreuungen werden Robustheitsbewertungen aller kritischer Lastfälle des virtuellen Produktentwicklungsprozesses durchgeführt

Folgende Mehrwerte konnten bisher bei der Absicherung und Erhöhung der Robustheit der Rückhaltesysteme bei der BMW AG 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

3.1 Zur numerischen Robustheit von Crashtestberechnungen

Die Untersuchung der numerischen Robustheit der numerischen Modelle von Crashtestberechnungen resultiert aus den Erfahrungen, dass schon das Variieren numerischer Parameter der Approximationsverfahren oder das Variieren nachweislich unwichtiger physikalischer Parameter zu großen Streuungen der Ergebnisgrößen führen kann, beziehungsweise manchmal offensichtlich unbrauchbare Ergebnisse erzielt werden können. Sollen n-Designs berechnet und deren Variation statistisch bewertet werden, stellt sich natürlich die Frage, welcher Anteil der Ergebnisvariation auf Probleme der Approximationsverfahren beziehungsweise der numerischen Modellierungen zurückzuführen ist.

Der quantitative Einfluss des numerischen Rauschens auf die Ergebnisgrößen kann über die Bestimmtheit der Robustheitsbewertungen gegenüber in Natura auftretenden Streuungen abgeschätzt werden. Ist das Bestimmtheitsmaß der Robustheitsbewertung hoch, verbleibt nur ein kleiner Anteil bisher nicht erklärbarer Variation, 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 Anforderungen an das Samplingverfahren, an die Anzahl der Durchrechnungen und an die statistischen Algorithmen zur Schätzung der Bestimmtheitsmaße. Nach sehr positiven Erfahrungen der Abschätzung des Einflusses numerischen Rauschens über die Bestimmtheitsmaße von Robustheitsbewertungen, wird die Vorgehensweise ab 2006 für den Serieneinsatz im Hause BMW verwendet [3]. 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 deutlich unter 80 % war das bisher immer ein sicheres Indiz, dass diese Ergebnisgröße ein 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, etc.) Zusammenhängen, weiteren Nichtlinearitäten (Verzweigungspunkte) oder eben aus numerischem Rauschen herrühren. 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. Können keine ausreichenden Bestimmtheitsmaße zu den Verzweigungen gefunden werden. Bei robusten Designs sollten die Zusammenhänge zwischen Eingangsvariation und Ausgangsvariation grundsätzlich mit hoher Bestimmtheit 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 Maßnahmen verändert.

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.

4 Praktische Anwendungen

4.1 Robustheitsbewertung Lastfall Frontcrash nach FMVSS 208

Seit Anfang 2006 werden bei der BMW AG rechnerische Robustheitsbewertungen mit optiSLang [9] serienmäßig zu festgelegten Meilensteinen für alle relevanten Lastfälle zur Auslegung passiver Sicherheitssysteme durchgeführt [3]. Exemplarisch wird die Vorgehensweise an einem Lastfall vorgestellt. In einem frühen Stadium der Fahrzeugentwicklung wurde für den Lastfall FMVSS 208 (Frontcrash 40 km/h ungesichert gegen starre Wand) die Robustheit bezüglich wichtiger Bewertungsgrößen des Fahrers sowie des Beifahrers untersucht.



Abbildung 2: 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 mittels Latin Hypercube Sampling in optiSLang 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 (Abb. 3). Obwohl keine Grenzwerte überschritten werden, ist die Streuung einzelner Bewertungsgrößen hoch.

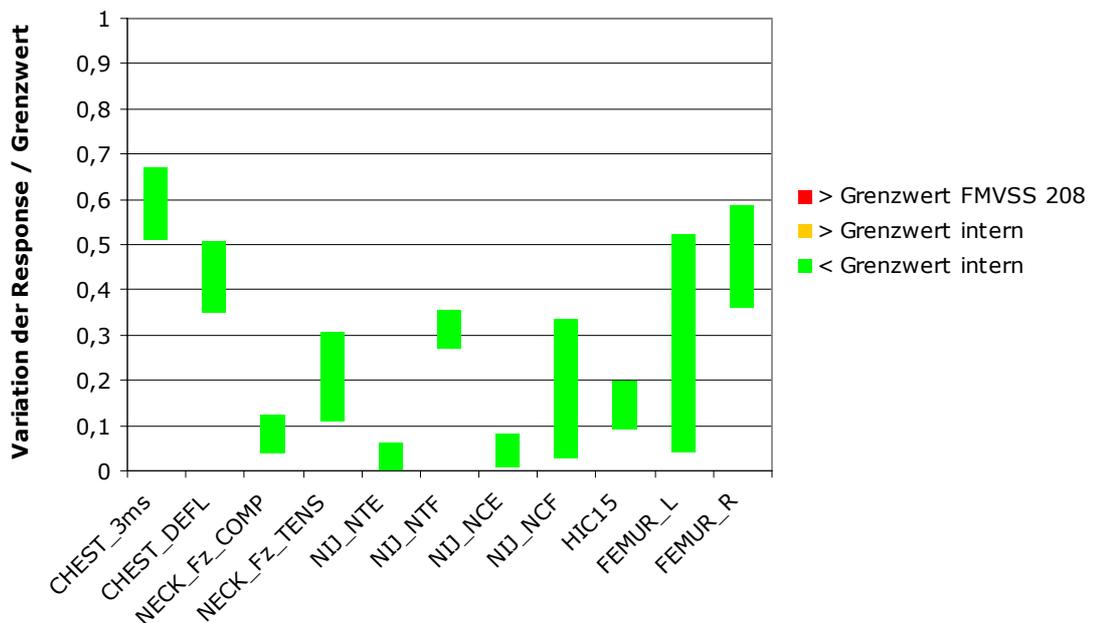


Abbildung 3: Visualisierung der Variationsbereiche

Von den 29 Eingangsstreuungen besitzen nur 9 Eingangsgrößen nennenswerte Korrelationen zu den Ergebnisgrößen. In der Matrix der linearen Korrelationen (Abb. 4) konnten nicht für alle wichtigen Bewertungsgrößen nennenswerte lineare Abhängigkeiten (Korrelationskoeffizienten > 0.50) zu Eingangsstreuungen ermittelt werden. Das kann 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 (Abb. 5) mit einer sehr hohen Bestimmtheit erklärt werden, die Variation des HIC-Wertes aber nur zu weniger als 50% (Abb. 6).

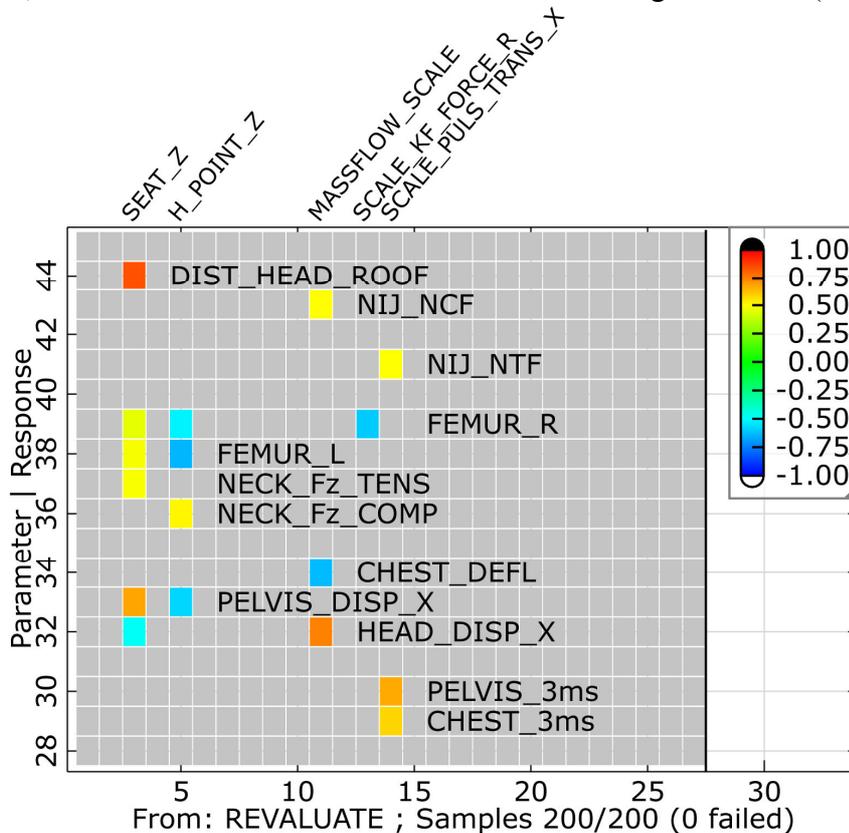


Abbildung 4: Matrix der linearen Korrelationen

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.

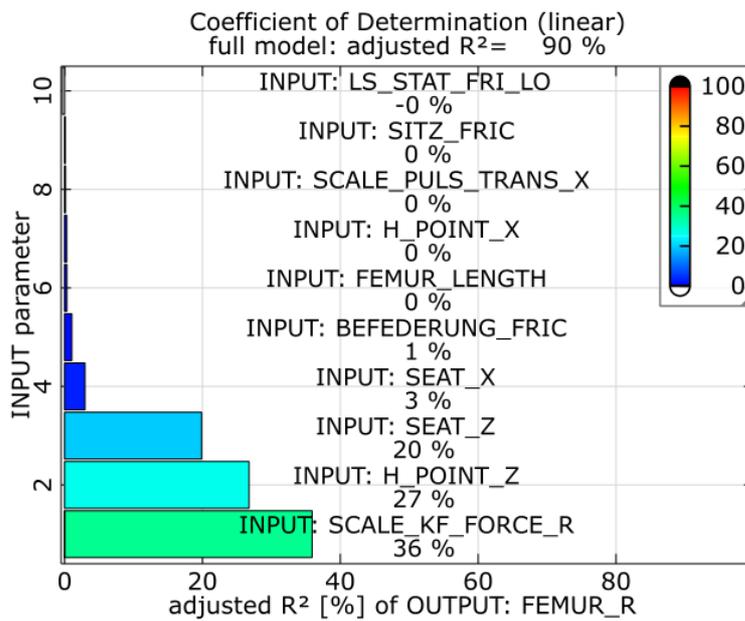


Abbildung 5: Bestimmtheitsmaß Oberschenkelkraft rechts

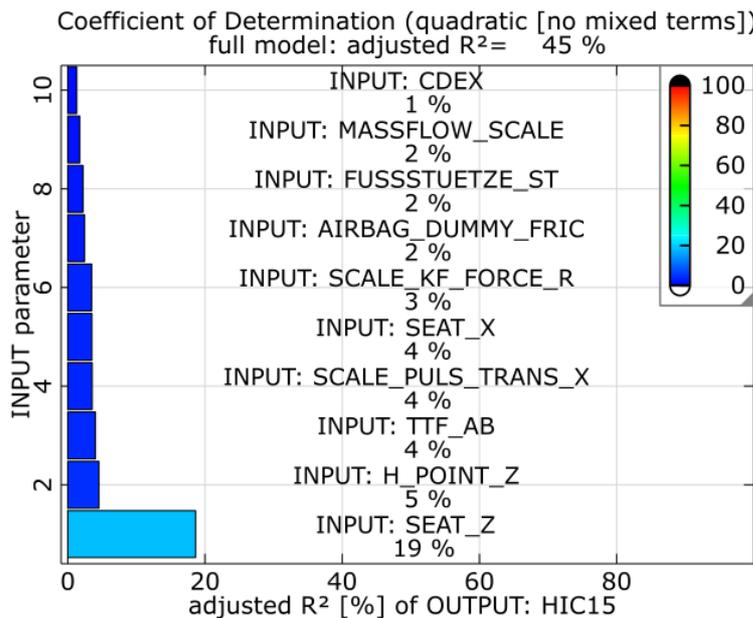


Abbildung 6: Bestimmtheitsmaß HIC15

Die resultierenden Streuungen der Bewertungsgrößen wurden mit den Streuungen aus der physikalischen Robustheitsbewertung verglichen (Abb. 7). 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 physi-

kalischen Robustheitsbewertung Bestimmtheitsmaße von ca. 80 % aufweisen, ist deren Streuung infolge der Variation numerischer Parameter noch deutlich größer als die der HIC15-Werte. Wie an diesem Beispiel zu sehen ist, 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 allerdings davon ausgegangen werden, dass tendenziell die Streuungsprognose der physikalischen Robustheitsbewertung zu groß ist. Es konnten 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.

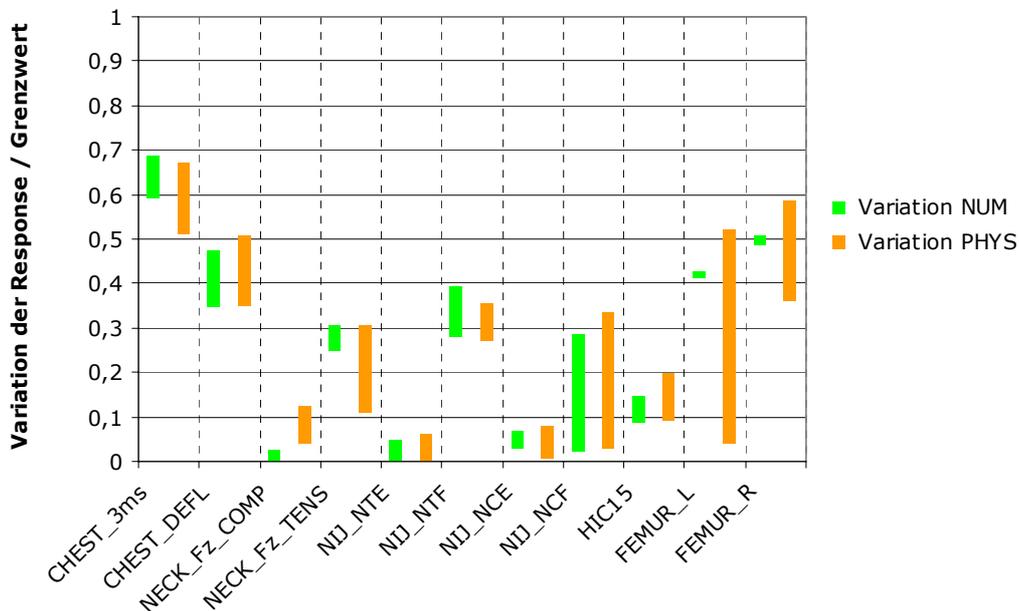


Abbildung 7: Vergleich der Variationsintervalle von physikalischer und numerischer Robustheitsbewertung

Die Robustheitsbewertung in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung zeigte allerdings, 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 numerischem 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 mit der Zielstellung überarbeitet das numerische Rauschen zu verringern.

4.2 Robustheitsbewertung eines Frontalcrashlastfalles der ULSAB Karosse

Auf Anfrage des FAT Arbeitskreises 27 der deutschen Automobilindustrie wurde ein Frontalcrashlastfall einer Rohkarosserie mit 14 km/h gegen eine starre Wand der Projektstudie ULSAB auf Robustheit untersucht. Zielstellung der Untersuchung war zu zeigen, welche Möglichkeiten rechnerische Robustheitsbewertungen im Strukturcrash zur Prognose der Robustheit bieten. Als FEM Berechnungsprogramm wurde LSDYNA verwendet. Bewertungsgrößen der Robustheitsbewertungen waren Energien, Kräfte und Deformationen der Längsträger sowie Relativverschiebungen der Stirnwand. Eingangsstreuungen waren Blechdicke und Fließgrenze von insgesamt 36 Blechteilen im Vorderwagen, die Reibbeiwerte sowie die Testrandbedingungen Aufprallgeschwindigkeit und der Aufprallwinkel.

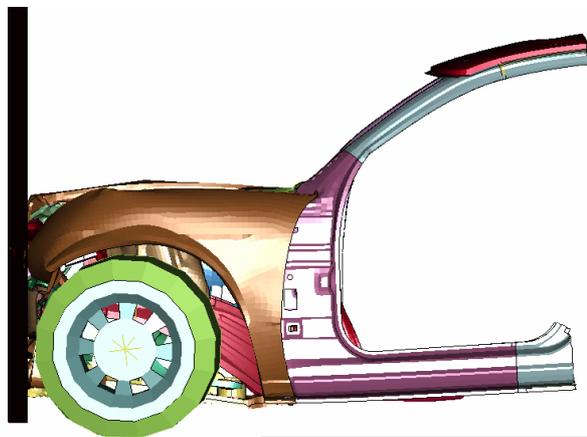


Abbildung 8: Frontalcrash ULSAB Karosse, Seitenansicht

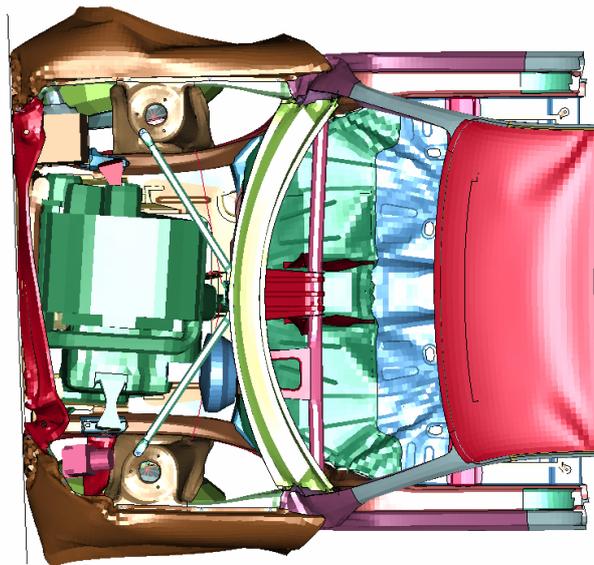


Abbildung 9: Frontalcrash ULSAB Karosse, Blick von oben

Ausgehend von Messergebnissen bei der Eingangskontrolle im Umformwerk wurden für die streuenden Blechdicken Normalverteilungen und für die streuenden Festigkeiten Lognormalverteilungen angenommen. Für die Streuung der Testrandbedingungen wurden abgeschnittene Normalverteilungen und für die Streuungen der Reibbeiwerte Gleichverteilungen angenommen. Zur Robustheitsbewertung gegenüber den insgesamt 84 Eingangsstreuungen wurden 169 Varianten mittels Latin Hypercube Sampling in optiSLang generiert und berechnet. Bei der Bewertung der Variationsintervalle konnten vor allem bei den Stirnwandintrusionen (Abb. 10/11) wesentlich zu große Streuungen festgestellt werden.

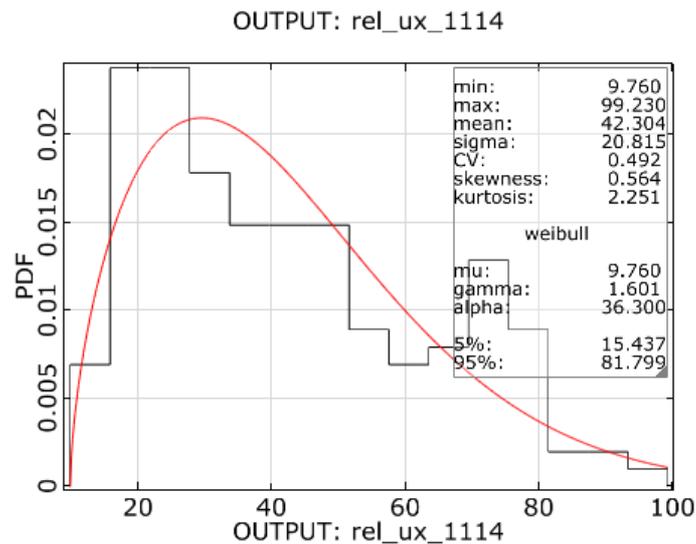


Abbildung 10: Histogramm der Relativverschiebung der Stirnwand node 1114

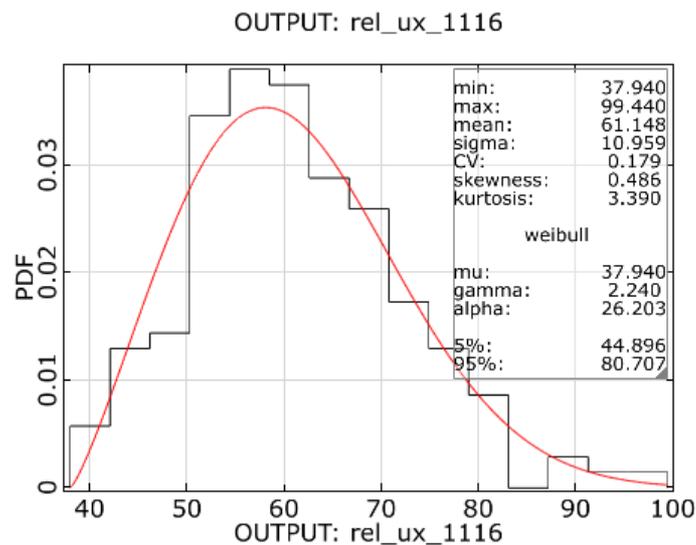


Abbildung 11: Histogramm der Relativverschiebung der Stirnwand node 1116

Mittels Korrelationsanalyse und Auswertung der Bestimmtheitsmaße wurden die Ursachen der Streuungen der Ergebnisgrößen identifiziert. Während für einige

Bewertungsgrößen, wie die Maximalkräfte im Längsträger (Abb. 12) hohe Bestimmtheitsmaße von $> 90\%$ ermittelt werden konnten, waren die Bestimmtheitsmaße der Stirnwandintrusionen unter Berücksichtigung linearer und quadratischer Korrelationen mit 50% bis 60% (Abb. 13) sehr klein. Es stellte sich die Frage, ob der große bisher nicht erklärbare Anteil an der Gesamtvariation aus der Nichtlinearität des Strukturcrash erklärt werden kann oder auf numerisches Rauschen zurückzuführen ist.

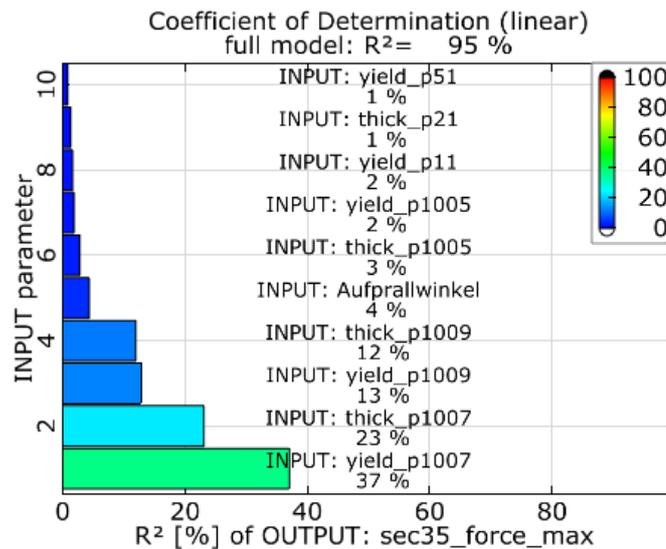


Abbildung 12: Bestimmtheitsmaße der maximalen Kräfte im Längsträger

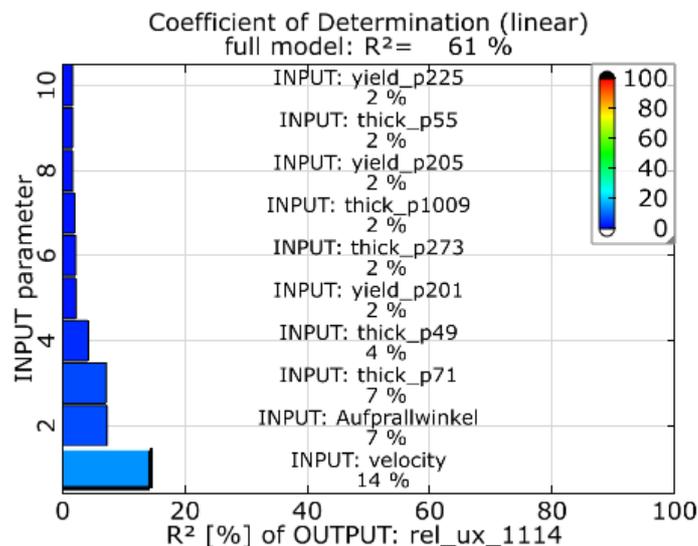


Abbildung 13: Bestimmtheitsmaße der Relativverschiebung der Stirnwand node 1114

Zur Untersuchung der Aussagekraft der statistischen Maße wurde in einer zweiten Robustheitsbewertung der Parameterraum auf diejenigen 15 Variablen reduziert, die im 84-dimensionalen Antwortraum signifikante lineare oder quadratische

Korrelation gezeigt hatten. Im Wesentlichen waren das Blechdicken und Festigkeiten der Längsträger, weiterer Blechteile im Lastabtragungspfad sowie die Streuungen der Testrandbedingungen. Im 15-dimensionalen Raum wurden 100 Varianten mittels Latin Hypercube Sampling erzeugt und bewertet.

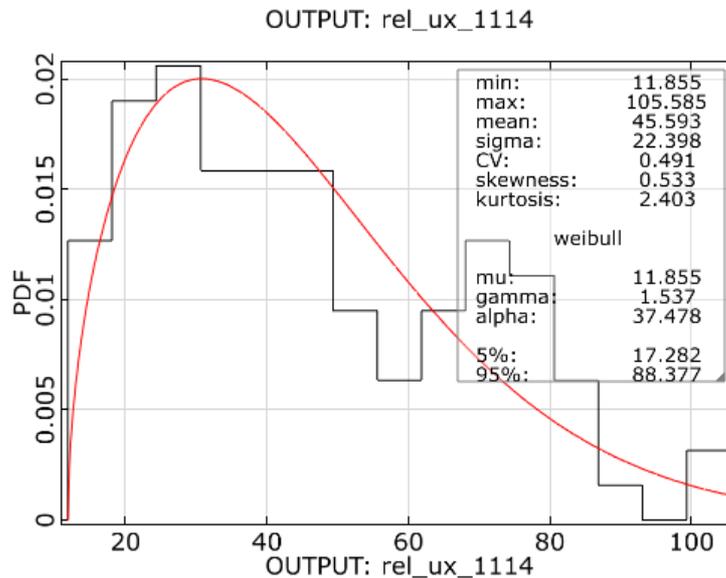


Abbildung 14: Histogramm der Relativverschiebung der Stirnwand node1114

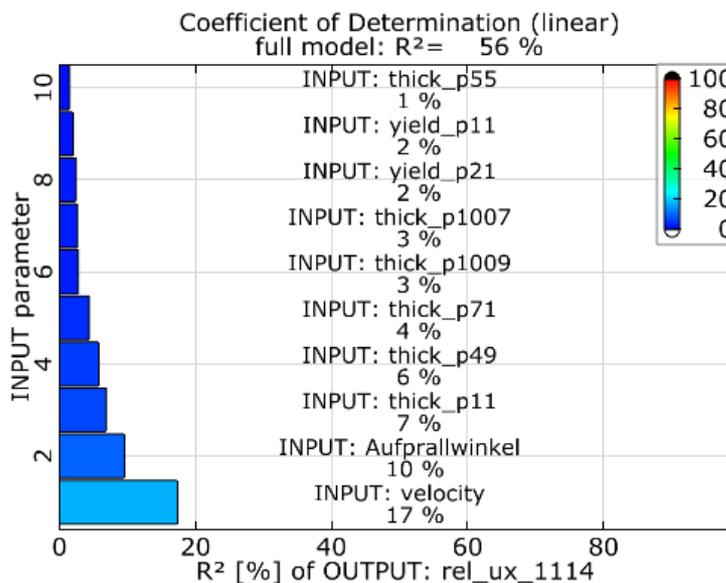


Abbildung 15: Bestimmtheitsmaße der Relativverschiebung der Stirnwand node 1114

Erfreulicherweise zeigten sich sowohl die Variationsprognose (Abb. 14) als auch das Bestimmtheitsmaß (Abb. 15) sehr stabil. Damit konnte gezeigt werden, dass die zuvor als unwichtig selektierten Variablen in der Tat keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisstreuungen haben und die ermittelten statistischen Maße

sehr vertrauenswürdig sind. Nach wie vor waren allerdings nur ca. 50 % der Ausgangsvariation über lineare und quadratische Korrelationen erklärbar. Um die Ursachen der bis dahin unerklärten Variationsbestandteile der Relativverschiebungen der Stirnwand weiter zu untersuchen, wurden die statistischen Maße der 100 Durchrechnungen auf der FE-Struktur der Stirnwand mit Hilfe des Postprozessors Statistics_on_Structure (SoS) [10] untersucht.

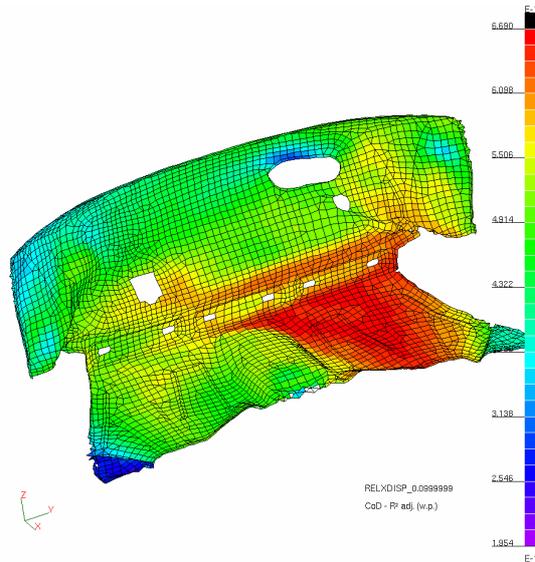


Abbildung 16: Bestimmtheitsmaß der Relativverschiebung Stirnwand

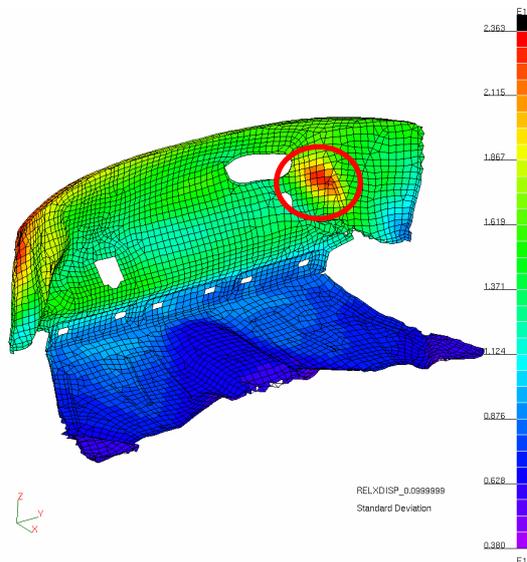


Abbildung 17 : Standardabweichung der Relativverschiebung Stirnwand

Die Auswertung der Bestimmtheitsmaße (Abb. 16), Standardabweichungen und Korrelationsbeziehungen zeigte eine Auffälligkeit in der Einleitungsstelle des Längsträgers in die Stirnwand (Abb. 17). Der Vergleich von Lastfällen mit minimalen (Abb. 18) und maximalen (Abb. 19) Relativverschiebungen an dieser Stelle

zeigte, dass der Längsträger bei großen Relativverschiebungen ausknickte und man hätte schließen können, dass die niedrige Bestimmtheit der Relativverschiebungen mit diesem Verzweigungsproblem des ausknickenden Längsträger in Verbindung gebracht werden kann.

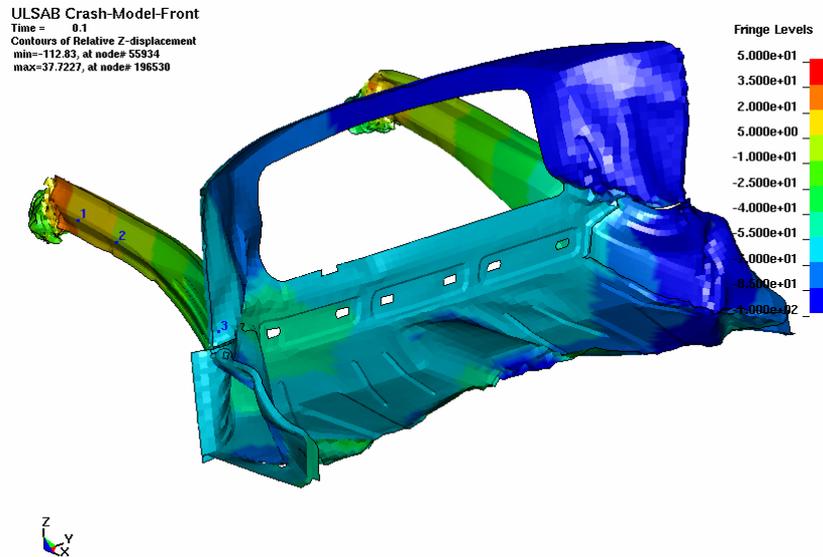


Abbildung 18: Design mit minimaler Stirnwandintrusion

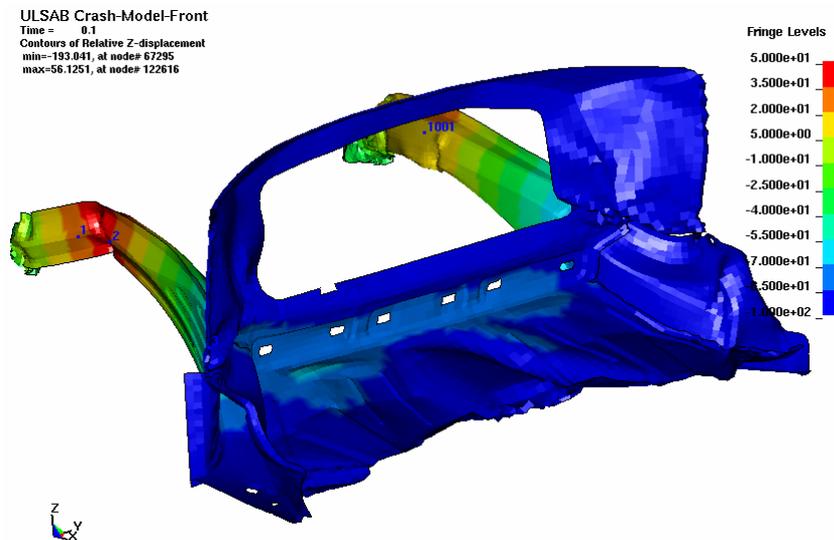


Abbildung 19: Design mit maximaler Stirnwandintrusion

Weil das Ausknicken des Längsträger auf Grund seiner Geometrie mit einer ausgeprägten vertikalen (z) Verschiebung einhergeht, wurden Korrelationen zu diesem Indikator des Ausknickens gesucht. Aber auch das Bestimmtheitsmaß der vertikalen Verschiebung beträgt nur etwa 50 % (Abb. 20). Auch mittels quadrati-

scher Korrelationsanalyse oder visueller Prüfung auf Clusterungen konnten die verbleibenden 50% der Variation nicht erklärt werden.

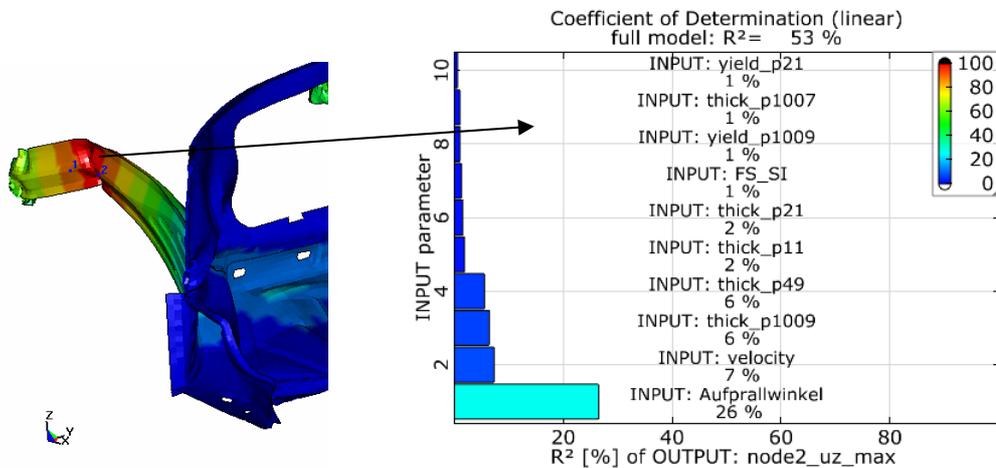


Abbildung 20: Bestimmtheitsmaß zum Indikator des Stabilitätsproblems

Das lässt vermuten, dass 50% der ausknickenden Längsträger durch „numerisches Rauschen“ initiiert wird. Zur weiteren Untersuchung der Ursachen der chaotischen Aktivierung des Ausknickens wurden die Eingangsstreuungen weiter reduziert und es wurden Robustheitsbewertungen nur noch gegenüber Eingangsstreuungen der Testrandbedingungen Geschwindigkeit und Aufprallwinkel durchgeführt (Robustheitsbewertung 3). Um zu prüfen, ob die Robustheit der Struktur vom Maß der Eingangsstreuung abhängt, wurden darüber hinaus in der vierten Robustheitsbewertung die Eingangsstreuungen von Aufprallgeschwindigkeit und Aufprallwinkel um 90% reduziert. Es wurden jeweils 36 Varianten mittels Latin Hypercube Sampling erstellt und berechnet.

Relativ X-Verschiebung Node 1114	Robustheit 1 84 streuende Parameter	Robustheit 2 15 streuende Parameter	Robustheit 3 2 streuende Parameter	Robustheit 4 2 streuende Parameter sehr geringe Streuung
Mittelwert	42.5	44.5	52	53
Variationsintervall Max-Min	89.5	93.7	63	68
Bestimmtheit der Verschiebungsgröße $R^2/\text{adjusted}R^2$	61/23	56/47	43/35	

Tabelle 1: statistische Maße der Relativverschiebung im Knoten 1114

Wie in Tabelle 1 zu sehen ist, ändern sich das Variationsintervall der Relativverschiebung durch die Reduktion der Eingangsstreuung auf zwei streuende Variablen nur um 30% und verbleibt ein großer Anteil der Ausgangsstreuung auch wenn die Eingangsstreuung der zwei Variablen schließlich auf 10% reduziert wird. Daraus lässt sich zum wiederholten Male schließen, dass entweder der damit

verbundene „physikalische“ Zusammenhang relativ unabhängig von der Ein-
gangssteuerung und damit das Strukturantwortverhalten sehr instabil ist oder nu-
merische Probleme die Streuung im Antwortverhalten verursachen.

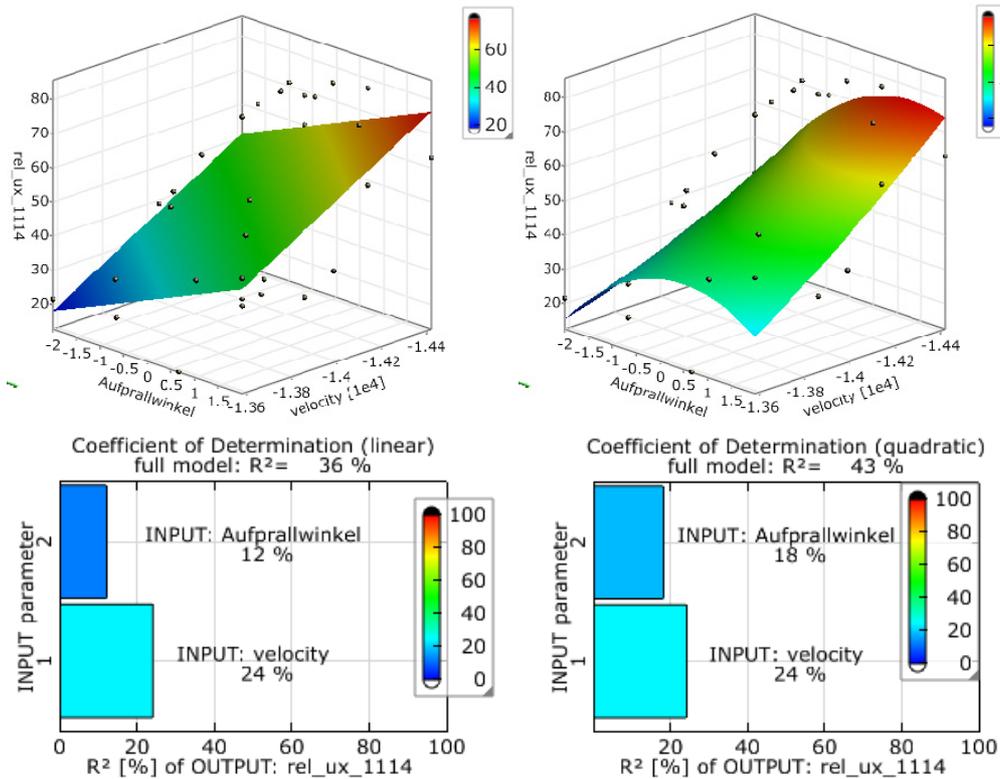


Abbildung 21: Visualisierung der Regressionsmode linearer, quadratischer
Korrelation sowie Darstellungen der dazugehörigen Bestimmtheitsmaße

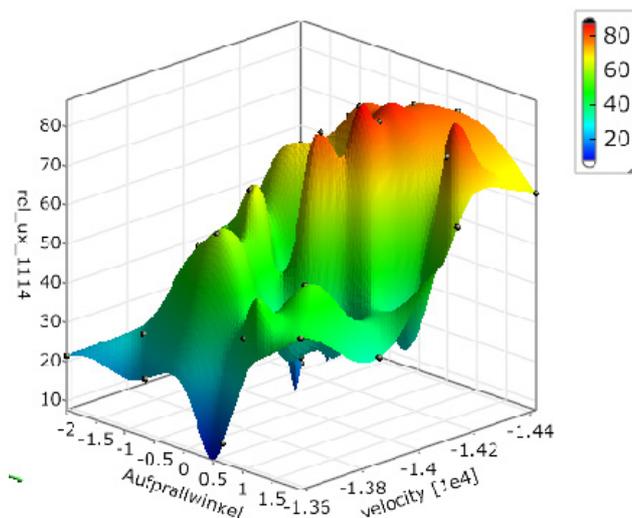


Abbildung 22: Visualisierung der Streuung mittels Moving Least Square
Regression

Auch die Visualisierung der Streuung in Abbildung 22 verdeutlicht, dass es sich hier um keinen nachvollziehbaren physikalischen Zusammenhang handelt. In der Folge wurde eine rein numerische Robustheitsbewertung nur gegenüber dem Zeitschritt der expliziten Zeitschrittintegration durchgeführt. Die 10 Durchrechnungen zeigten wiederum in etwa den Variationsraum der Robustheitsbewertungen 3 und 4.

INPUT: time_step vs. OUTPUT: rel_ux_1114, $r = -0.325$

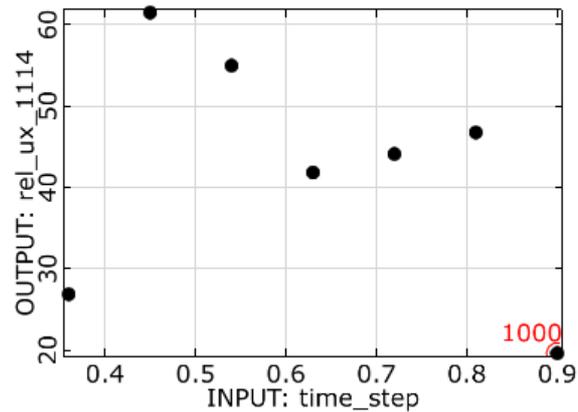


Abbildung 23: Anthill Plot der Variation des Zeitschrittes der expliziten Zeitschrittintegration gegenüber der Verschiebung im Konten 1114

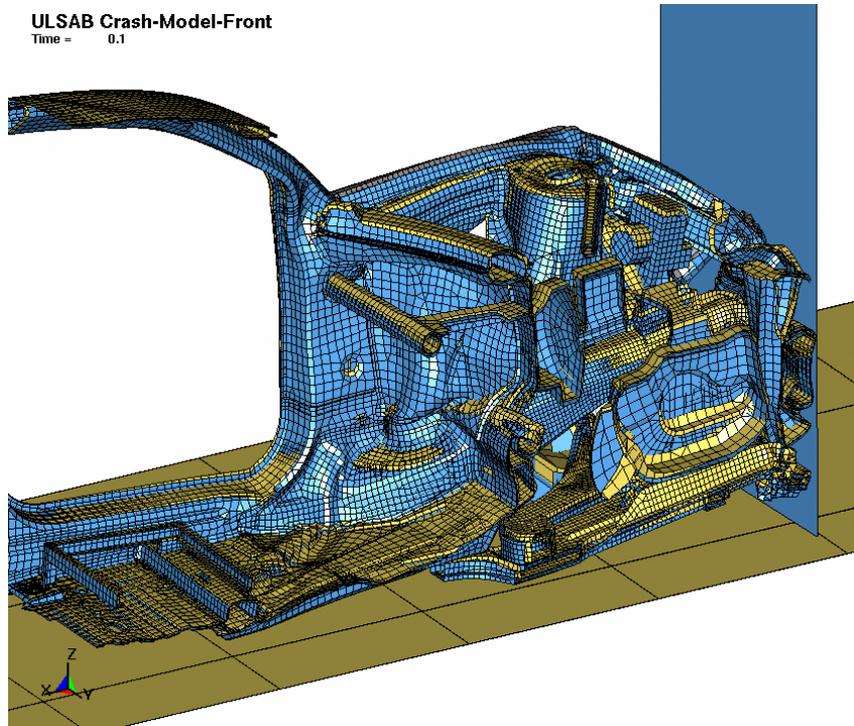


Abbildung 24: Vergleich zweier Rechnungen mit unterschiedlichem Zeitschritt

In der Folge wurden weitere Untersuchungen zur Identifikation des Problems durchgeführt und es wurde eine unzureichende Vernetzung der Unterstützungsstruktur des Längsträgers festgestellt. In deren Folge tritt in der Crashsimulation beim Auffalten dieser Unterstützungsstruktur ein „Kontaktlocking“ eines Elementhaufens auf, das mit einem in Richtung und Amplitude zufälligen Impuls verbunden ist, der in zufälliger Art und Weise zum Ausknicken des Längsträgers führt.

Damit konnte an diesem Benchmarkbeispiel in diversen Unterräumen des Robustheitsproblems exemplarisch gezeigt werden, dass Robustheitsbewertungen belastbare statistische Maße zur quantitativen Abschätzung des Einflusses von „numerischem Rauschen“ auf Ergebnisgrößen liefern können. In praktischen Anwendungen wäre es ratsam, schon nach der ersten Robustheitsbewertung mit kleinen Bestimmtheitsmaßen mittels Projektion der statistischen Maße auf die FE-Strukturen beziehungsweise mit Vergleichen einzelner Berechnungsläufe auf Ursachensuche der numerischen Probleme zu gehen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Systematik erarbeitet, die Robustheit wichtiger Bewertungsgrößen von Crashberechnungen qualitativ und quantitativ zu untersuchen. Primäres Ergebnis der Robustheitsbewertungen ist die Schätzung der Streuung der Ergebnisgrößen. Weiterhin können wichtige Eingangsgrößen und deren Korrelationen zu wichtigen Ausgangsstreuungen identifiziert werden sowie die Bestimmtheit der Ergebnisgrößen untersucht werden. Vermutungen über durch Eingangsstreuungen aktivierte nichtlineare Zusammenhänge (Cluster/Ausreißer/Verzweigungspunkte) können überprüft werden.

Mittels der Bestimmtheitsmaße kann der quantitative Einfluss numerischer Unzulänglichkeiten auf die Streuung der Ergebnisgrößen abgeschätzt werden und damit ein wichtiger Beitrag zur Prognosesicherheit und Qualitätssicherung der Crashberechnungen geliefert werden.

Der Durchbruch in den praktischen Anwendungen und der Akzeptanz stochastischer Analyse zur Robustheitsbewertung wurde durch die Bereitstellung linearerer und quadratischer Korrelation, der dazugehörigen Bestimmtheitsmaße sowie der Projektion der statistischen Maße auf die FE-Strukturen erzielt.

Die quantitative Abschätzung der Bestimmtheitsmaße und die Sicherung hoher Bestimmtheitsmaße sind nicht nur für die Robustheitsbewertung finaler Designs von Bedeutung. Sind Crashberechnungen Bestandteil multidisziplinärer Optimierungsaufgabenstellungen [11] sollten für wichtige Bewertungsgrößen auch im Designraum der Optimierung hohe Bestimmtheitsmaße gesichert werden. Hierfür können die Bestimmtheitsmaße im Designraum der Optimierung in Analogie zur Ermittlung der Bestimmtheitsmaße im Zufälligkeitsraum ermittelt und als Quali-

tätskriterium der Eignung der Bewertungsgrößen als Indikator eines verbesserten Designs herangezogen werden [12].

Literatur

- [1] Will, J.: Robustheitsbewertungen in der virtuellen Produktentwicklung; Proceedings 24. CAD-FEM Users Meeting 2006, Fellbach, Chapter 1., Germany
- [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.: Integration rechnerischer Robustheitsbewertungen in die virtuelle Auslegung passiver Fahrzeugsicherheit bei der BMW AG, VDI-Berichte Nr. 1976, Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, 2006 Seite 851-873
- [4] Bucher, C.: Adaptive sampling-an iterative fast Monte Carlo procedure. Structural Safety, 5(2):119–126, 1988.
- [5] Bayer; V.; Bucher, C.: Importance sampling for first passage problems of nonlinear structures. Probabilistic Engineering Mechanics, 14:27–32, 1999.
- [6] Macke, M.; Bucher, C.: Importance sampling for randomly excited dynamical systems. Journal of Sound and Vibration, (268):269–290, 2003.
- [7] Roos, D.; Adam, U.; Bayer, V.: Design Reliability Analysis; Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 3.0, 2006, Weimar, Germany
- [8] Will, J.; Bucher, C.: Statistische Maße für rechnerische Robustheitsbewertungen CAE-gestützter Berechnungsmodelle, Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 3.0, 2006, Weimar, Germany
- [9] optiSLang - the Optimizing Structural Language Version 2.1, DYNARDO, Weimar, 2006, www.dynardo.de
- [10] Will, J.; Bucher, C.; Ganser, M.; Grossenbacher, K.: Berechnung und Visualisierung statistischer Maße auf FE-Strukturen für Umformsimulationen; Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 2.0, 2005, Weimar, Germany
- [11] Duddeck, F.: Multidisziplinäre Optimierung im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie; Proceedings Weimarer Optimierung- und Stochastiktage 2.0, 2005, Weimar, Germany
- [12] Blum, S.; Will, J.: Combining Robustness Evaluation with Current Automotive MDO Application, Proceedings Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 3.0, 2006, Weimar, Germany