

Rechnerische Robustheitsbewertungen von Strukturcrashlastfällen bei der Daimler AG

Johannes Will*, Thomas Frank**

*Dynardo GmbH, Weimar

**Daimler AG, Sindelfingen

1. Einleitung

In der virtuellen Produktentwicklung sind Crashberechnungen ein wichtiger Bestandteil zur Auslegung der Karosserie. Gewichtsminimierung und teilweise konkurrierende Anforderungen aus den zahlreichen Crashlastfällen müssen möglichst optimal aufeinander abgestimmt werden. In der Konsequenz können gegenüber den Anforderungen keine großen Sicherheitsabstände eingehalten werden und die Absicherung der Robustheit der optimierten Designs gegenüber unvermeidlichen Streuungen von Crashtestrandbedingungen, Fertigungsstreuungen und Materialstreuungen zu möglichst frühen Phasen der Produktentwicklung gewinnen immer größere Bedeutung. Seit einiger Zeit werden zur rechnerischen Robustheitsbewertung in der virtuellen Produktentwicklung stochastische Analyseverfahren vorgeschlagen [1,2,3] und bei Fragestellungen des Fahrkomforts [4], der passiven Sicherheit [5] oder der Umformsimulation [6] erfolgreich eingesetzt. Auf Grund der Komplexität der Modellierung, der langen Rechenzeiten, der hohen Nichtlinearität und der immer wieder beobachteten Beeinflussung der Ergebnisse durch numerisches Rauschen [7] stellen Robustheitsbewertungen von Strukturcrashlastfällen hohe Anforderungen an Methodik der stochastischen Analyse, der statistischen Maße für Bestimmtheit und Korrelation und der Leistungsfähigkeit der Post Prozessoren. In den letzten Jahren konnte DYNARDO die Leistungsfähigkeit von optiSLang [8] und dem Post Prozessor Statistics_on_Structure [9] soweit komplettieren, das seit 2007 erfolgreich rechnerische Robustheitsbewertungen von Strukturcrashlastfällen mit LS-DYNA bei der Daimler AG durchgeführt werden.

Am Beispiel von Reparaturcrashlastfällen soll die Vorgehensweise der Robustheitsbewertung vorgestellt werden. Nachdem die Prognosefähigkeit der Robustheitsbewertung an einem realen Phänomen, welches bis dato nur unzureichend im virtuellen Produkt nachempfunden werden konnte, nachgewiesen werden konnte, werden Robustheitsbewertungen zur rechnerischen Absicherung der Fahrzeugstände gegenüber Streuungen von Material, Blechstärken und Testrandbedingungen eingesetzt.

2. Rechnerische Robustheitsbewertungen von Strukturcrashlastfällen

Die Hürden für einen erfolgreichen Einsatz rechnerischer Robustheitsbewertungen für Strukturcrashberechnungen sind hoch. Im Folgenden werden Einige der Gründe diskutiert.

2.1 Notwendige Anzahl stochastischer Berechnungen

Strukturcrashberechnungen sind mit nennenswerten Berechnungszeiten verbunden, der enorme Aufwand stochastischer Berechnungen durch ein vielfaches Berechnen von Designvarianten muss auf ein Mindestmaß begrenzt werden. Das Mindestmaß an stochastischen Berechnungen muss dabei eine ausreichende Vertrauenswürdigkeit der wichtigen statistischen Maße der Variation und Korrelation sichern. Bezüglich der Ergebnisgrößen der Variation können hierfür vor Beginn der Berechnung sinnvolle Prognosen, die sich hauptsächlich nach der Wahrscheinlichkeit der abzusichernden Phänomene richten, abgegeben werden. Weil davon ausgegangen werden kann, dass die Eingangsstreuungen konservativ sind und wir Phänomene im einstelligen Prozentbereich der Auftretenswahrscheinlichkeiten absichern wollen, reichen hierfür 50 bis 100 Berechnungen. Wesentlich schwieriger wird dies für die notwendige Anzahl von Designberechnungen zur Identifikation der für die Ergebnisstreuung verantwortlichen Eingangsstreuungen. Bisher versuchte man über die Begrenzung der Konfidenzintervalle der Abschätzungen aller linearer Korrelationen Größenordnungen der Anzahl notwendiger Designberechnungen abzuschätzen [9]. Letztendlich hängt jedoch die notwendige Anzahl von Designberechnungen nicht von der Anzahl der streuenden Eingangsvariablen ab, sondern von der Anzahl der wichtigen Eingangsstreuungen und der Nichtlinearität der Zusammenhänge zwischen Eingangsstreuung und jeder einzelnen Ergebnisgröße ab. Deshalb wurde in optiSLang v3.0 [6] eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht nach jedem erfolgreich zurückkommenden Run zu überprüfen, ob die wichtigen Eingangsstreuungen mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden können. Optimierte Latin Hypercube Sampling Strategien, Filtertechnologien, Bestimmtheitsmaße und Konvergenz der Konfidenzintervalle sind dabei die wesentlichen Schlüssel zur Minimierung des Berechnungsaufwandes.

2.2 Balance der stochastischen Analyse

Erfahrungen bei der Einführung stochastischer Analyse in verschiedenen Disziplinen der virtuellen Produktentwicklung [3] zeigen sehr deutlich die Notwendigkeit einer Balance zwischen der Definition der Eingangsstreuungen, stochastischer Analysemethode und statistischer Auswertung der Robustheitsbewertung. Mittels dieser Balance muss gesichert werden dass die stochastischen Berechnungen belastbare Ergebnisse erzielen können, die nachweislich Mehrwerte in der virtuellen Produktenwicklung generieren. Ist diese Balance in nur einer der drei Säulen wesentlich gestört, werden in aller Regel unbrauchbare Ergebnisse produziert.

Die **Definition der Streuungen** ist der essentielle Input von Robustheitsbewertungen. Werden wesentliche Eingangsstreuungen nicht berücksichtigt, kann kein Nachweis der Robustheit erbracht werden. Deshalb ist es empfehlenswert, im Zweifelsfall alle bekannten

Streuungen mit konservativen Annahmen zu den Verteilungen der Streuungen zu berücksichtigen. Im Laufe der Integration der Robustheitsbewertung in die virtuelle Produktentwicklung sind für alle auffälligen Eingangsstreuungen diese Annahmen zu verifizieren und abzusichern. In den praktischen Anwendungen wird häufig mit groben Annahmen gestartet und diese Annahmen werden in den folgenden Robustheitsbewertungen über die wichtigen Eingangsstreuungen verifiziert und verbessert. Dabei wird es notwendig, sowohl die Verteilungstypen als auch Informationen über Korrelationen einzelner streuender Variablen sowie räumlich korrelierter Zufallsvariablen (Zufallsfelder) in angemessener Art und Weise zu berücksichtigen und in die Modelle einzuführen.

Die **stochastische Analysemethode** muss auf das Wahrscheinlichkeitsniveau sowie auf die Zuverlässigkeit der statistischen Maße einer Robustheitsbewertung ausgerichtet sein. Hierzu werden für Aufgabenstellungen der Automobilindustrie, wo Phänomene im einstelligen Prozentbereiche abzusichern sind, Latin Hypercube Samplings empfohlen, welche die Fehler der Korrelationsmatrix der Eingangskorrelationen minimieren [6].

Die **statistische Auswertung** der Robustheitsbewertung muss den Berechnungsingenieur in die Lage versetzen, wesentliche Maße der Variation, Korrelation und Wichtigkeit von Variablen sicher bestimmen zu können. Dabei muss gesichert werden, dass die Fehler der Schätzung der statistischen Maße akzeptabel sind und diese Maße als valide Bewertungsgrundlage der Robustheit der virtuellen Produktentwicklung herangezogen werden können. Das mag banal klingen, wenn man sich allerdings vergegenwärtigt, dass heute bei Anwendungen der Automobilindustrie bis zu 600 streuende Eingangsvariablen berücksichtigt werden müssen und die Anzahl der zu bewertenden streuenden Ergebnisgrößen im Extremfall der Anzahl der finiten Elemente wichtiger Bauteile mal der Anzahl der zu bewertenden Ergebnisgrößen entspricht, ergeben sich schnell unzählige statistische Größen. Hinzu kommt bei Strukturcrashberechnungen die Notwendigkeit der quantitativen Abschätzung des Einfluss numerischen Rauschens auf die Berechnungsergebnisse und die statistischen Maße. Um diese Aufgabenstellungen erfolgreich bearbeiten zu können, hat DYNARDO interaktive Post Prozessoren für Einzelwerte (innerhalb optiSLang) und für statistische Maße auf FE-Strukturen entwickelt (Statistics_on_Structure).

Für Robustheitsbewertungen von Strukturcrashberechnungen wurde bei Daimler folgende Vorgehensweise implementiert:

- Prüfen der Variation wichtiger Ergebnisgrößen sowohl einzelner Ergebnisgrößen wie maximale relative Verschiebung mit optiSLang als auch Prüfen der Variation wichtiger Ergebnisgrößen auf der FE-Struktur, wie die Variation der plastischen Dehnung mit Statistics_on_Structure.
- Prüfen, ob die für die Variation der Ergebnisgrößen verantwortlichen Eingangsstreuungen identifiziert werden können. Mittels Bestimmtheitsmaßen [9] von Einzelgrößen oder auf der FE-Struktur wird das Maß der Korrelation zu den Eingangsstreuungen ermittelt. Können nach Prüfen linearer, quadratischer, monoton nichtlinearer (Spearman Transformation), nach Identifikation und

Ausschluss unzulässiger Berechnungsergebnisse oder von Clusterungen infolge von Verzweigungsvorgängen die Ergebnisvariation nicht ausreichend gut erklärt werden, ist davon auszugehen, dass numerische Probleme der Berechnungsprogramme oder der Extraktion die Ergebnisse stark beeinflussen. Nach unseren Erfahrungen sollten alle identifizierbaren physikalischen Zusammenhänge zwischen Eingangsvariation und Ergebnisvariation die Ergebnisvariation zu 80% oder mehr erklären.

- Identifizieren der wichtigen Eingangsstreuungen mittels Bestimmtheitsmaß (optiSLang Coefficient of Determination & optiSLang Coefficient of Importance)
- Visualisierung der Zusammenhänge in Anthill Pots und auf der Struktur

2.3 Reife der Strukturmodelle

Es muss davon auszugehen sein, dass die Strukturmodelle einen ausreichenden Reifegrad erreicht haben, der Detaillierungsgrad von Geometrie, Materialmodellen und Streuungen muss im Verhältnis stehen. Die den abzusichernden physikalischen Phänomenen zu Grunde liegenden Mechanismen müssen im virtuellen Modell enthalten sein. Die numerischen Streuungen der FE-Solver dürfen die Variation wichtiger Ergebnisgrößen nicht dominieren.

3. Anwendungsbeispiel AZT Reparaturcrash

Im Versuch zu einem frühen Fahrzeugstand wurde ein plastisches Phänomen am Längsträger beobachtet, welches bis dato in den deterministischen Berechnungen der virtuellen Produktentwicklung nicht zu beobachten war.

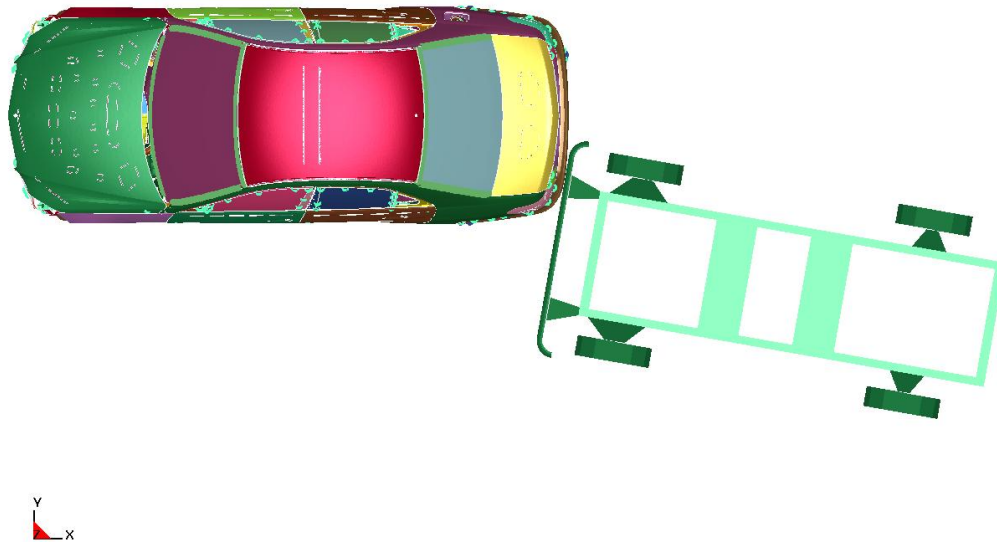


Abbildung 1 Lastfall Reparaturcrash, Draufsicht

Mittels einer Robustheitsbewertung sollte untersucht werden, ob Streuungen der Versuchsdurchführung, Blechdickenstreuungen sowie Fließgrenzen wichtiger Bleche im Lastpfad für das im Versuch aufgetretene Phänomen verantwortlich sind. Die Crashberechnungen werden mit LS-DYNA, die Robustheitsbewertungen mit optiSLang und Statistics_on_Structure durchgeführt.

3.1 Robustheitsbewertung zum Auffinden des Phänomens

Definition der Streuungen

Bezüglich der Testrandbedingungen wurden Streuungen der Geschwindigkeit und der Barrierenposition berücksichtigt. Es wurde die Streuung der Reibung im Fahrzeug sowie die Reibung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn berücksichtigt.

Für insgesamt 21 Bleche im Lastpfad wurden Streuungen der Blechdicke (Streuung von Steifigkeit) und der Fließgrenzen (Streuung von Festigkeit und Energiedissipation) berücksichtigt. Dabei sollten sowohl Streuungen vom Stahlband, hier können in Messungen normalverteilte Streuungen mit Variationskoeffizienten bis 0.02 beobachtet werden, als auch Streuungen des Umformprozess berücksichtigt werden. Bei Robustheitsbewertungen von Umformsimulationen können in Bereichen hoher plastischer Umformgrade ohne weiteres das Zwei- und Dreifache der initialen Streuungen vom Band beobachtet werden. Deshalb wurde für die Streuung der Blechdicke ein resultierender Variationskoeffizient von 0.05 einer Normalverteilung angenommen. Für die Streuung der Fließgrenzen wurden die zulässigen Streuungen der Einkaufsbedingungen der Daimler AG

berücksichtigt und eine Gleichverteilung zwischen unterer und oberer Grenze angenommen. Ausgehend von der Streuung der Fließgrenze werden alle Spannungsdehnungskurven der plastischen Materialmodelle (LS-DYNA mat24) skaliert.

Für zehn wichtige Bleche im Lastpfad wurden Umformsimulationen durchgeführt und die Verteilungen der Blechdicken (Abb. 2) und der plastischen Verfestigung (Abb. 3) in der Crashberechnung berücksichtigt. Die Streuung der Blechdicke erfolgt dann um den Wert der Umformsimulation und es wird von einer linearen Korrelation zwischen Ausdünnung und plastischer Verfestigung ausgegangen. Es sei anzumerken, dass bei Robustheitsbewertungen von Reparaturcrashberechnungen schon Erfahrungswerte vorhanden sind, dass wichtige Ergebniswerte auf lokale Streuungen von Blechteilen sensibel reagieren können. Aus diesem Grund wurde die Diskretisierung der Streuung von Blechdicke und Verfestigung so detailliert berücksichtigt.

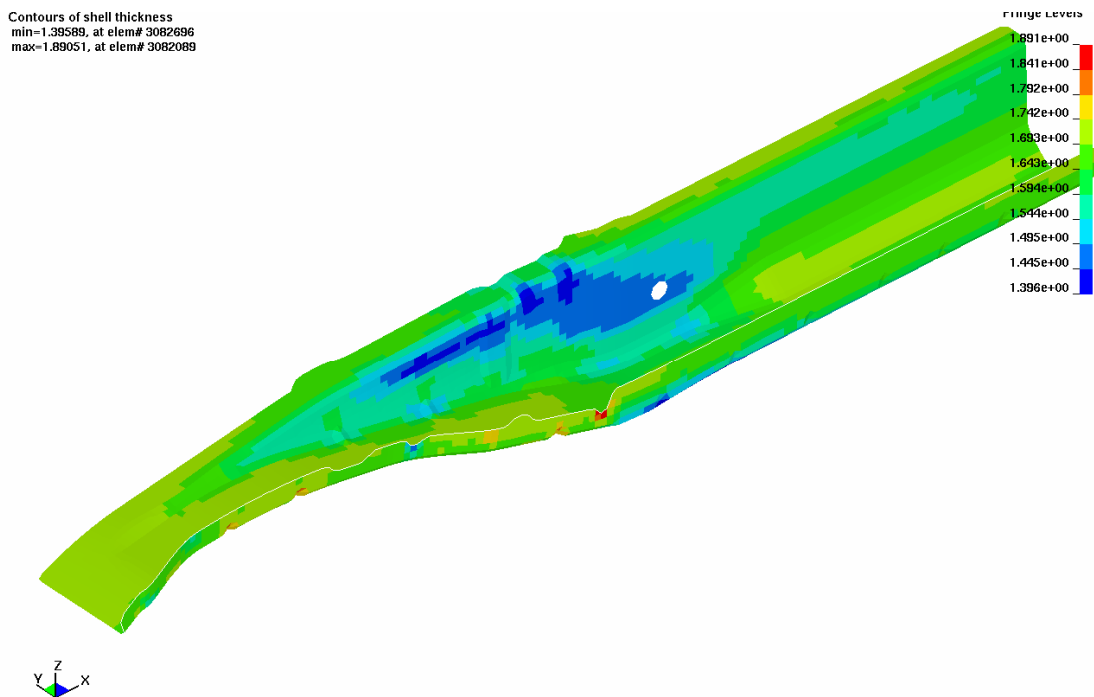


Abbildung 2 Blechdickenverteilung der Umformsimulation des Längsträger

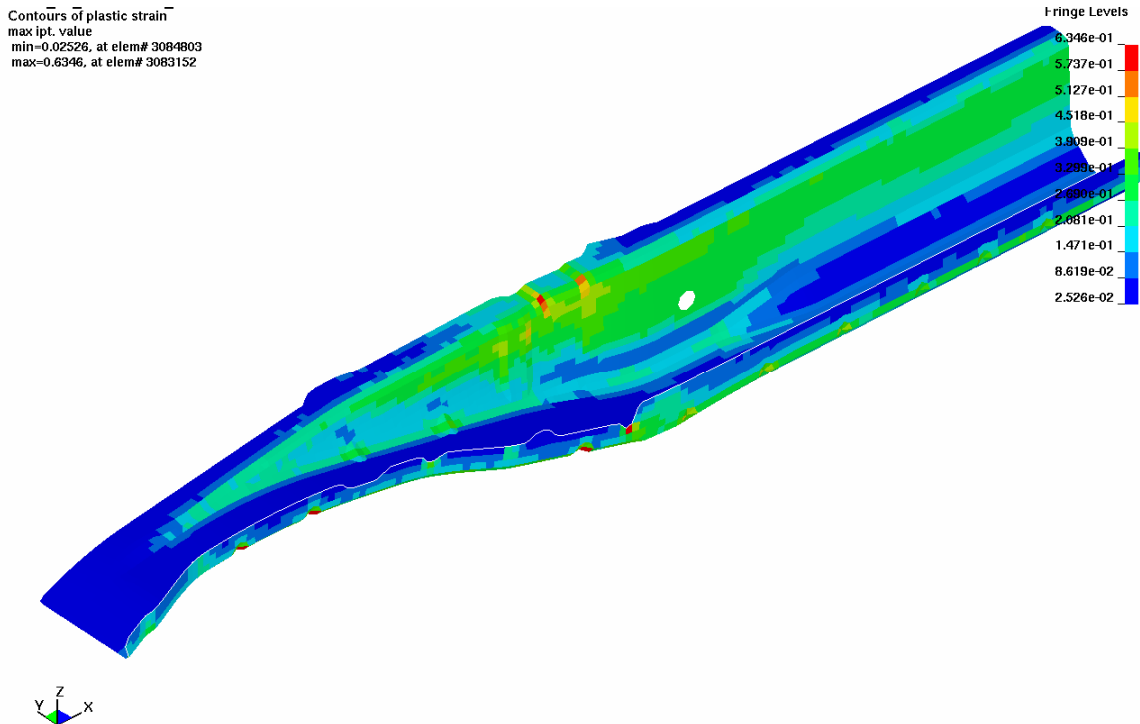


Abbildung 3 Plastische Dehnungen (herangezogen zur Verfestigung) der Umformsimulation des Längsträgers

Insgesamt wurden 55 unabhängig voneinander streuende Eingangsvariablen definiert und es wird davon ausgegangen, dass die Annahmen zu den Streuungen tendenziell eher zu groß als zu klein und damit konservativ sind.

Durchführung der Robustheitsbewertung

Der LS-DYNA Referenzlauf wurde so modifiziert, dass alle zu variierenden Bleche über eigene *mat, *section und *load_curve Karten verfügen und damit eine unabhängige Variation der 21 Bleche definiert werden kann. Mittels des grafischen Pre Prozessor wurde die Integration der Crashberechnung in optiSLang durchgeführt. Es wurden die streuenden Variablen optiSLang bekannt gemacht und die Variation sowie alle abhängigen Variablen wurden definiert. Zur Robustheitsbewertung wurden mittels optimiertem Latin Hypercube Sampling 150 Fahrzeugvarianten generiert und automatisch mit LS-DYNA berechnet. Die Extraktion und Auswertung der Ergebnisse erfolgt mittels der Post Prozessoren LS-PREPOST und Statistics_on_Structure (SoS) sowie in optiSLang. Zur Auswertung der Robustheitsbewertung werden hauptsächlich relative Verschiebungen und plastische Dehnungen am Längsträger ausgewertet.

Auswertung

Die primäre Ergebnisgröße der Robustheitsbewertung ist die Variation. Innerhalb des Variationsraumes konnten hohe plastische Dehnungen sowie das Ausbeulen des Längsträgers, verbunden mit großen relativen Y-Verschiebungen des Längsträgers mit einer

Wahrscheinlichkeit von 7 % wiedergefunden werden. Dabei ist das Phänomen Ausbeulen mit großen lokalen plastischen Dehnungen (Abb. 4) und großen relativen Y-Verschiebungen (Abb. 6) verbunden. Ort und Größe der plastischen Deformation passen sehr gut zum Versuch.

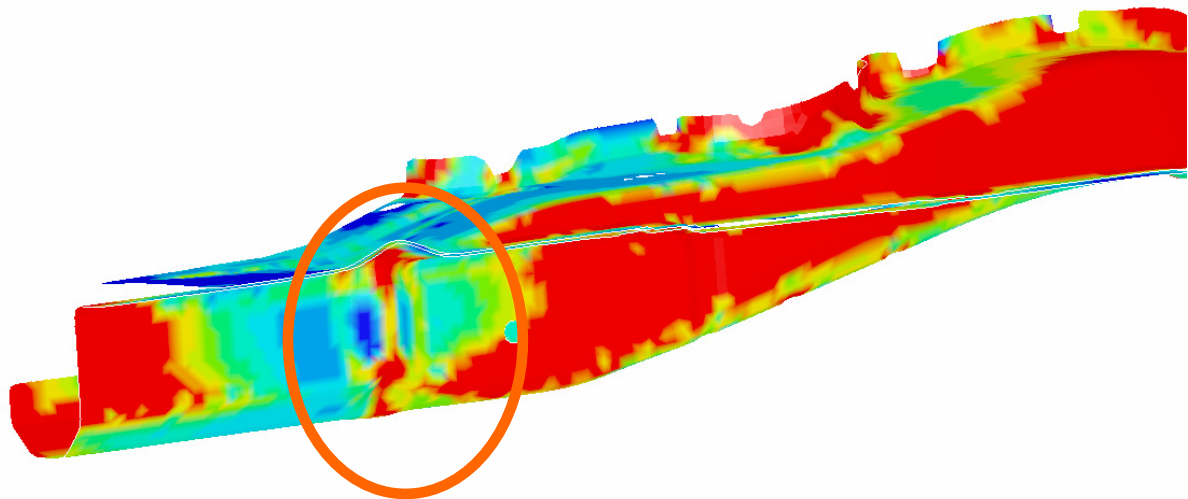


Abbildung 4 Ausbeulen des Längsträger im Design 25 (LS-PREPOST)

Nachdem das Phänomen im Variationsraum gefunden werden kann, wird geprüft, ob die dafür verantwortlichen Eingangsstreuungen identifiziert werden können. Dazu werden zuerst die Bestimmtheitsmaße gegenüber linearer Korrelation überprüft. Abbildung 5 zeigt, dass im Bereich des Ausbeulens bis zu 60 % der Variation der damit einhergehenden plastischen Dehnungen mittels linearer Korrelation erklärt werden kann. Die Auswertung der relativen Verschiebungen in Richtung des Ausbeulens (Abb. 6) bestätigt diese Quantifizierung und liefert ein Ranking der wichtigsten Eingangsstreuungen, die für die Streuung der Relativverschiebung im Längsträger verantwortlich sind. Es sind die Streuung der Ausdünnung aus dem Umformprozess und der Fließgrenze im Längsträger, die Streuung der Fließgrenze der Crashbox und die Streuung des Anprallwinkels sowie die Streuung der Reibung der Straße.

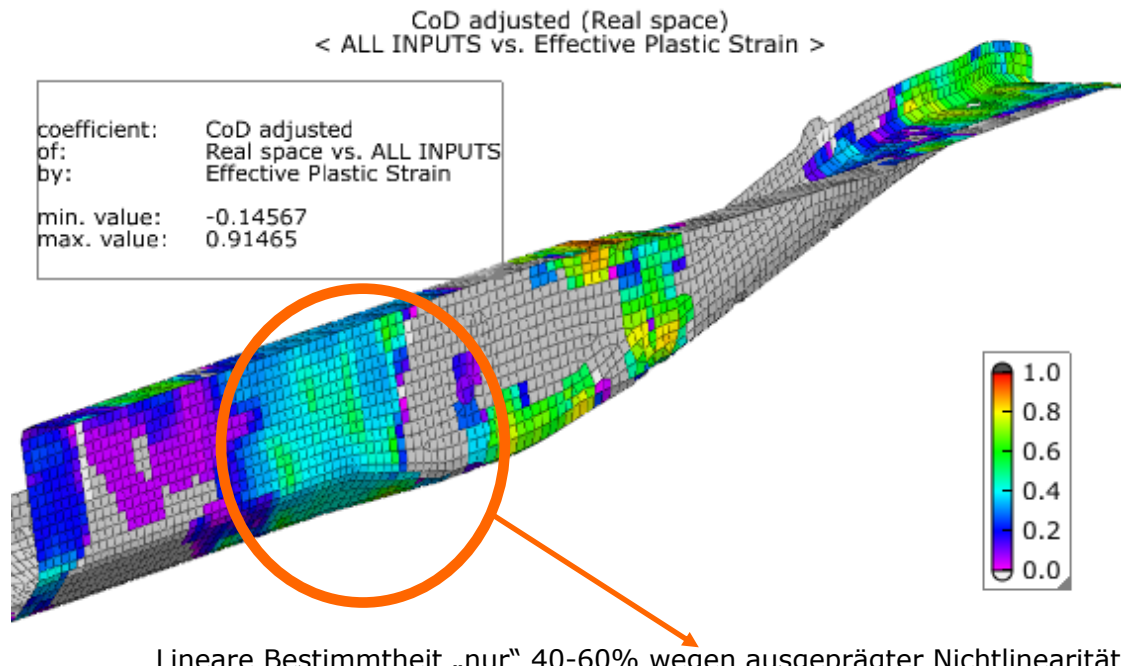


Abbildung 5 Bestimmtheitsmaß linearer Korrelation der Streuung der effektiven plastischen Dehnungen (Statistics_on_Structure)

Die Auswertung der Streuung der relativen Verschiebung einzelner Knoten bestätigt, dass mittels linearer Korrelationen ca. 60% der Variation erklärt werden können. Ein großer Teil der verbleibenden 40% kommt aus dem nichtlinearen Effekt des Ausbeulens bei kleinen Anprallwinkeln (rote Punkte im Anthill Plot). Das heißt, wenn eine große Ausdünnung mit kleinen Fließgrenzen und einem kleinen Anprallwinkel zusammenfällt, beult der Längsträger mit einer Wahrscheinlichkeit von 7% aus.

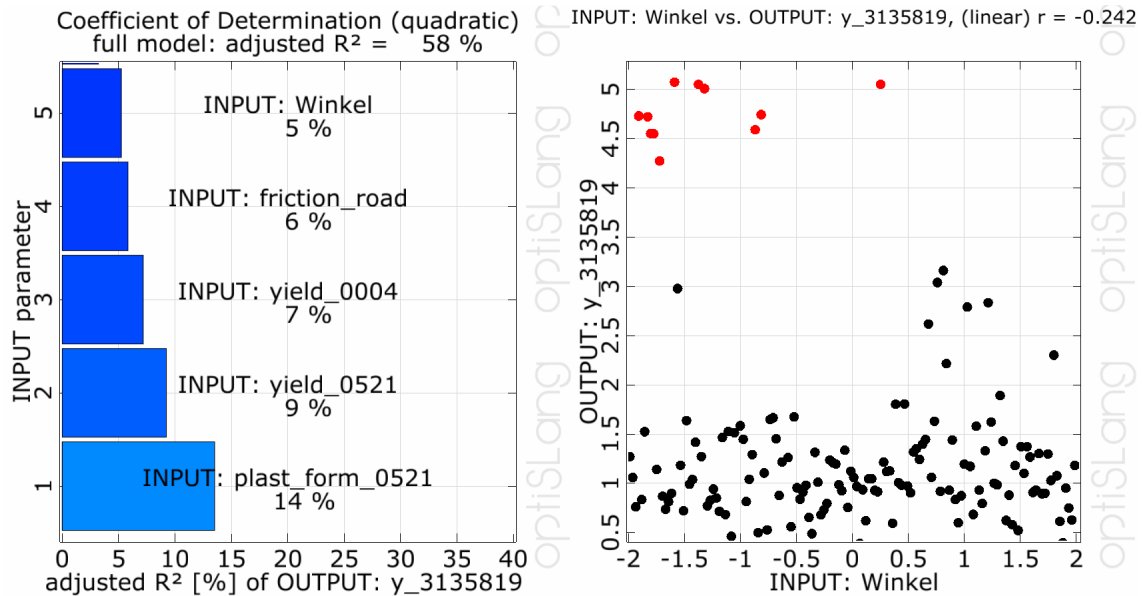


Abbildung 6 Bestimmtheitsmaß relative Y-Verschiebung im Knoten 3135819 (optiSlang) sowie Anthill Plot zwischen Variation des Winkel und der relativen Verschiebung.

Maßnahme

Um die Sensitivität des Fahrzeugstandes gegenüber den Eingangsstreuungen zu beheben, wurden Maßnahmen am Längsträger umgesetzt (Überlappen von Blechteilen und zusätzliche Verbindungstechnik).

3.2 Wiederholung der Robustheitsbewertung zur Absicherung der Maßnahme

Zum Nachweis einer Verbesserung der Maßnahme am Fahrzeug wird der neue Fahrzeugstand einer weiteren Robustheitsbewertung unterzogen.

Robustheitsbewertung des Umformprozess

Weil in der ersten Robustheitsbewertung die Ausdünnung des Längsträgers aus dem Umformprozess als eine Ursache des plastischen Phänomens identifiziert wurde, wurden die Annahmen zur Streuung der Ausdünnung verifiziert. Es wurde eine Robustheitsbewertung des Umformprozess durchgeführt. Dabei wurden Streuungen der Fließkurve, der anisotropen Verfestigungskennwerte und der Blechdicke des Grundmaterials sowie Streuungen der Platinenlage, der Reibung und der Blechhalterkräfte berücksichtigt. Die resultierende Verteilung des Variationskoeffizienten der Blechdicke ist in Abbildung 7 zu sehen. Der maximale Wert des Variationskoeffizienten beträgt ca. 0.03. Damit können in der folgenden Robustheitsbewertung kleinere Annahmen zu den Streuungen der Blechdicke für den Längsträger verwendet werden.

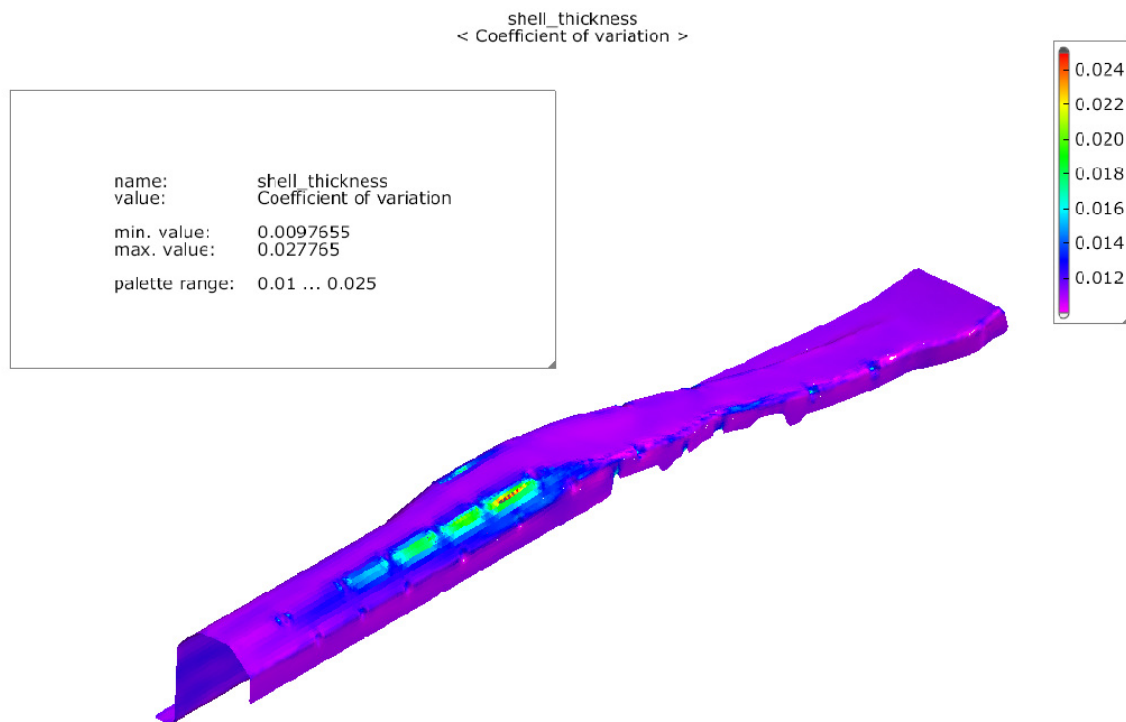


Abbildung 7 Variationskoeffizient der Blechdicke der Robustheitsbewertung der Umformung des Längsträgers (Statistics_on_Structure)

Definition der Streuungen

Die Annahmen zur Streuung der Blechdicken wurden präzisiert. Für den Längsträger wird eine räumlich korrelierte Streuung der Blechdicke mit einer Normalverteilung und einem maximalen Variationskoeffizient von 0.03 (Abb. 8) angenommen. Für alle anderen Bauteile wird eine Normalverteilung mit einem Variationskoeffizient von 0.04 angenommen. Dabei wird für die Bleche mit einer räumlichen Verteilung der Blechdicke aus der Umformsimulation eine Streuung der initialen Blechdicke ($cov=0.02$) mit einer Streuung der Ausdünnung ($cov=0.02$) überlagert. Diese Annahme sichert, dass in Bereichen geringer Ausdünnung ein Variationskoeffizient von 0.02 und nur in den Bereichen maximaler Ausdünnung ein Variationskoeffizient von 0.04 simuliert wird. Alle anderen Annahmen zu den Streuungen bleiben unverändert.

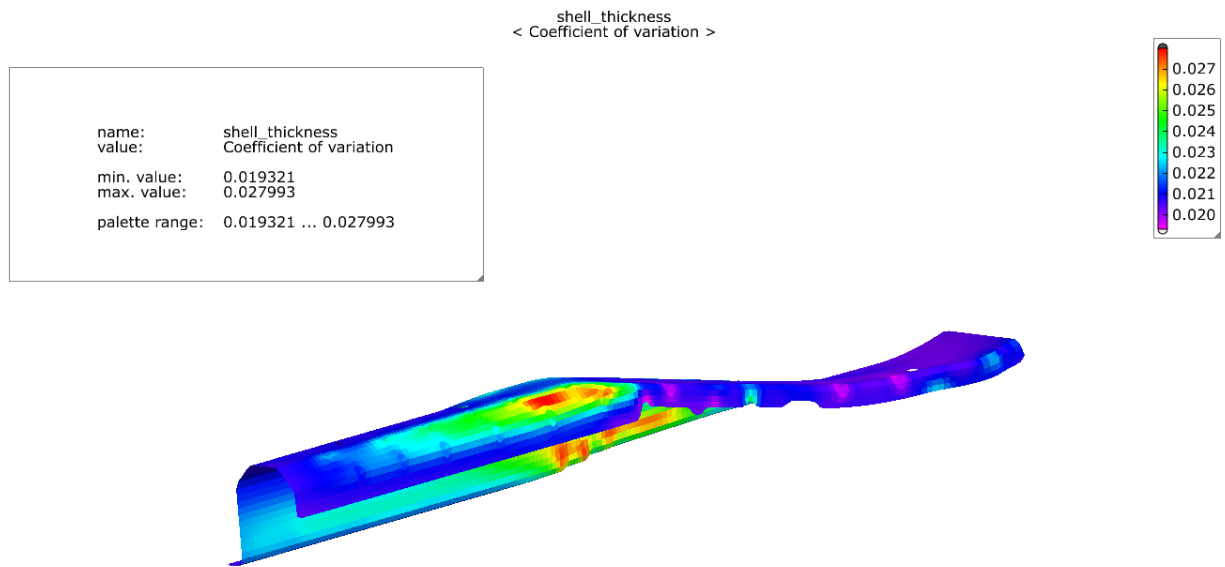


Abbildung 8 Variationskoeffizient der Blechdicke der Robustheitsbewertung der Crashberechnung infolge Superposition der Variation der Coil Blechdicke und der Ausdünnung aus der Umformung des Längsträgers (Statistics_on_Structure)

Robustheitsbewertung und Auswertung

Es werden 100 Designs mittels optimierten Latin Hypercube Sampling erzeugt und berechnet. Bei der Auswertung der Variation der 100 Designs kann kein Ausbeulen mehr beobachtet werden. Die maximalen plastischen Dehnungen aus der Crashbelastung (Abb. 9) bleiben unterhalb der tolerablen Grenze. Die wichtigsten Beitragsleister der jetzt geringen Streuung der plastischen Dehnung sind die Streuung der Fließgrenze des Längsträgers und die Streuung des Aufprallwinkels der Barriere (Abb. 10). Deutlich ist im Anthill Plot (Abb. 10) immer noch die Sensitivität der plastischen Dehnungen gegenüber kleineren Anprallwinkel zu sehen, in Folge der Verstärkungsmaßnahmen führt diese Sensitivität aber nicht mehr zu unerwünschten plastischen Dehnungen. Die Konstruktion zeigt jetzt nur noch eine kleine Sensitivität gegenüber der Streuung der Umformung. Die Ursache hierfür ist das Verschieben des Steifigkeitssprungs der Überlappung zweier Bleche aus dem Bereich hoher Ausdünnung des Umformprozess. Damit verbleibt nur eine geringe Sensitivität gegenüber der Streuung der initialen Blechdicke vom Blechband (Coil).

Damit konnte die rechnerische Robustheitsbewertung des virtuellen Modells die Robustheit der verbesserten Fahrzeugvariante gegenüber Streuungen nachweisen. Auch der Abnahmeversuch der Baureihe zeigte keinerlei Beanstandungen.

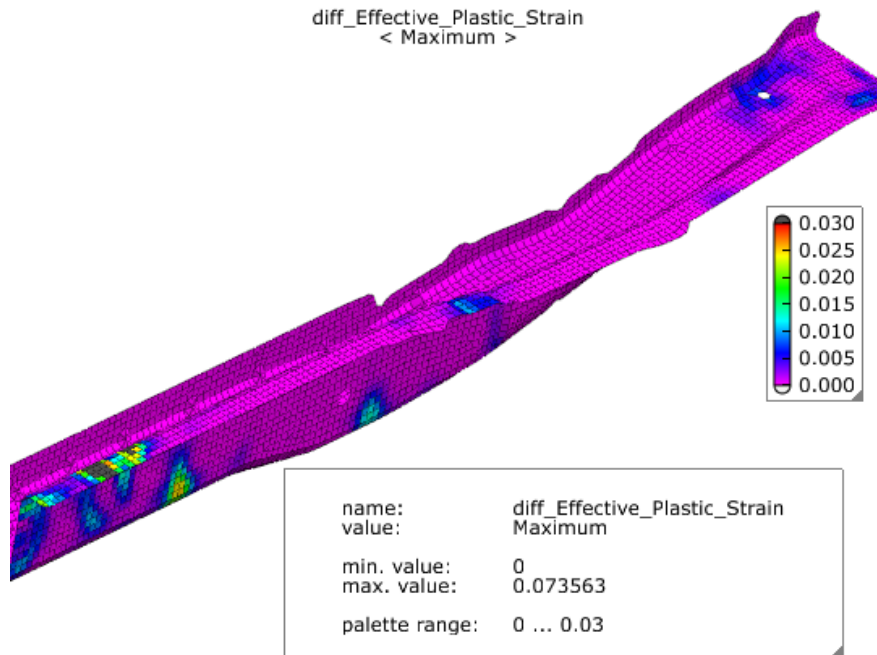


Abbildung 9 Elementweise maximale plastische Dehnungen aller 100 Designberechnungen (Statistics_on_Structure)

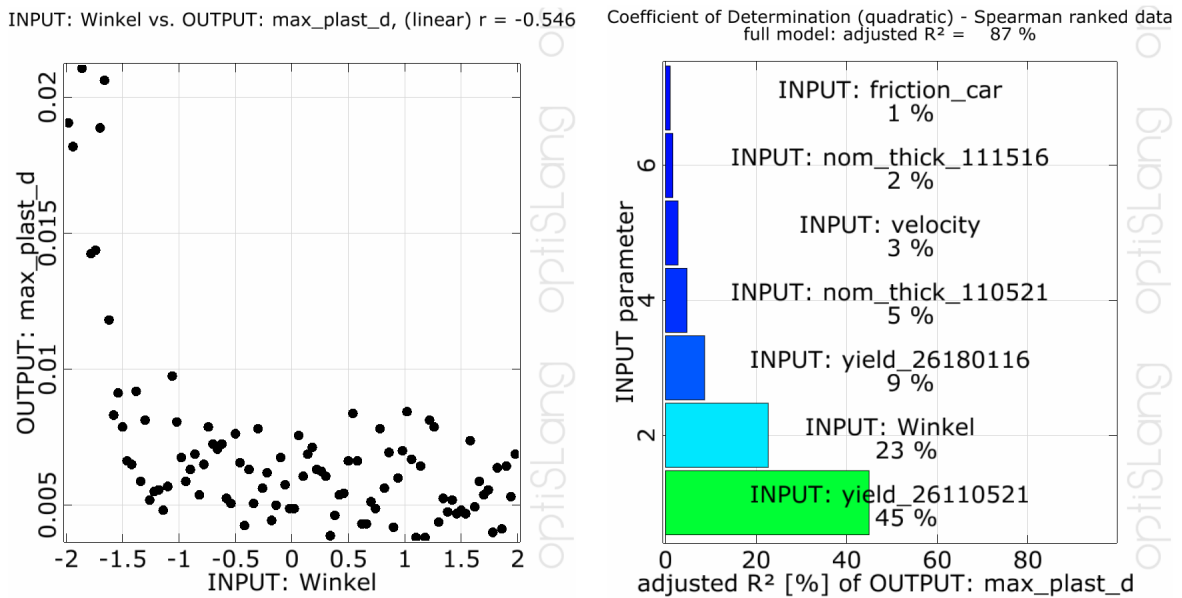


Abbildung 10 Anthill Plot zwischen Variation Winkel und maximaler plastischer Dehnung des Längsträgers sowie das Bestimmtheitsmaß der maximalen plastischen Dehnung (optiSLang)

4. Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel der Robustheitsbewertung eines Reparaturcrashlastfalls konnten zahlreiche Mehrwerte von Robustheitsbewertungen in der virtuellen Produktentwicklung aufgezeigt werden.

Das im Versuch beobachtete Phänomen konnte im virtuellen Modell mittels einer Robustheitsbewertung wiedergefunden werden. Weil das Phänomen von lokalen Steifigkeitsverhältnissen verursacht worden ist, wurde es notwendig, die räumliche Struktur der Ausdünnung sowie die Streuung der räumlichen Struktur der Ausdünnung zu berücksichtigen. Nur die Kombination aus Streuungen lokaler Steifigkeits- und Festigkeitsänderung sowie der Streuung des Anprallwinkels der Barriere ermöglichte es, im virtuellen Modell das reale Phänomen des Versuchs nachzuempfinden.

In der Folge wurden Maßnahmen im Fahrzeug eingeführt, die Steifigkeit und Festigkeit gezielt erhöhten. Gleichzeitig wurden mittels rechnerischer Robustheitsbewertungen der Umformsimulation das Wissen um die Streuung der räumlichen Struktur von Ausdünnung und Verfestigung verifiziert. Mit diesem Wissen konnten die Annahmen der Streuungen der Blechdicken in der folgenden Robustheitsbewertung des Crashlastfalls geschärft werden.

Für den Lastfall Reparaturcrash können in allen Robustheitsbewertungen ausreichend große Bestimmtheitsmaße (über 80%) aufgefunden werden. Das bedeutet, dass numerisches Rauschen in diesem Lastfall nicht die Ergebnisvariation dominiert.

Nachdem mit Robustheitsbewertungen erfolgreich experimentelle Phänomene aufgefunden und deren Ursachen identifiziert werden können, wird die Methodik zunehmend zur stochastischen Absicherung in der virtuellen Produktentwicklung vor dem Experiment eingesetzt.

Bei Robustheitsbewertungen wird empfohlen konservative, tendenziell zu große Eingangsstreuungen zu definieren, deshalb bedeuten Überschreitungen von Zielkriterien mit kleinen Wahrscheinlichkeiten (z.B. 1 oder 2%) nicht zwangsläufig Überschreitungen dieser Zielkriterien in der Realität. Eher sind kleine Überschreitungen so zu interpretieren, dass die Sicherheitsabstände knapp bemessen sind. Treten Überschreitungen von Zielkriterien mit hoher Wahrscheinlichkeit auf (z.B. 10%) und sind die Annahmen zu den dafür verantwortlichen Eingangsstreuungen auch in Realität zu erwarten, sind Designänderungen zur Erhöhung der Sicherheitsabstände zu empfehlen. Im Anschluss an Designmaßnahmen empfiehlt es sich mittels einer Robustheitsbewertung die erzielte Verbesserung zu bestätigen.

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

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

Literatur

- [1] J. Will, C. Bucher: Robustness Analysis in Stochastic Structural Mechanics, Proceedings NAFEMS Seminar Use of Stochastics in FEM Analyses; May 2003, Wiesbaden, www.dynardo.com
- [2] Bucher, C.: Basic concepts for robustness evaluation using stochastic analysis; Proceedings EUROMECH colloquium Efficient Methods of Robust Design and Optimization, September 2007, London, www.dynardo.com
- [3] Will, J.: State of the Art – robustness in CAE-based virtual prototyping processes of automotive applications, Beiträge der Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 4.0, 2007, Weimar, Germany, www.dynardo.com
- [4] Will, J.; Möller, J-St.; Bauer, E.: Robustness evaluations of the NVH comfort using full vehicle models by means of stochastic analysis, VDI-Berichte Nr.1846, 2004, S.505-527
- [5] Will, J.; Baldauf, H.: Integration of Computational Robustness Evaluations in Virtual Dimensioning of Passive Passenger Safety at the BMW AG , VDI-Berichte Nr. 1976, Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, 2006, S. 851-873
- [6] Will, J.; Menke, T.; Stühmeyer, A.: Computational Robustness Evaluations of Forming Processes, „Neuere Entwicklungen in der Blechumformung“, 2006, 9./10. Mai, Stuttgart, Germany
- [7] Will, J.; Stelzmann, U.: Robustness Evaluation of Crashworthiness Simulation Results; Proceedings 6th European LS-DYNA Users Conference, Gothenburg, Sweden, 2007, S. 4.47-4.59, www.dynardo.com
- [6] optiSLang - the Optimizing Structural Language, Version 3.0, DYNARDO, Weimar, 2008, www.dynardo.com
- [8] SoS - Statistics_on_Structure, Version 1.0, DYNARDO 2007, Weimar, www.dynardo.com
- [9] Will, J.; Bucher, C.: Statistical Measures for the CAE-based Robustness Evaluation, Beiträge der Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 3.0, 2006, Weimar, Germany , www.dynardo.com
- [10] Will, J.; Bucher, C.; Ganser, M.; Grossenbacher, K.: Computation and visualization of statistical measures on Finite Element structures for forming simulations; Beiträge der Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 2.0, 2005, Weimar, Germany, www.dynardo.com