

Stochastische Crashsimulation mit LS DYNA am Beispiel des Kopfaufpralls nach FMVSS 201

Ralf Reuter, Torsten Gärtner, EASi Engineering GmbH, Alzenau

Zusammenfassung:

In jüngster Zeit haben stochastische Simulationen auf der Basis von Monte-Carlo Methoden den Sprung von der wissenschaftlich theoretischen Idee zur industriellen Anwendung geschafft. Heute setzen verschiedene Unternehmen stochastische Simulationen bereits routinemäßig im Rahmen ihrer CAE Entwicklungsprozesse ein und nutzen die Vorzüge dieses Verfahrens.

Das vorliegende Paper gibt einen konzeptionellen Überblick über die Grundlagen dieser Methode. Es wird aufgezeigt, welchen Zusatznutzen die Anwendung in der Praxis liefert. Insbesondere wird auf die Abschätzung der Zuverlässigkeit der simulierten Systeme eingegangen. Während klassische deterministische Simulationen den Aspekt der Unsicherheit ausklammern, wird bei stochastischen Simulationen der Tatsache Rechnung getragen, daß reale Systeme stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind. Die Konsequenzen dieser Unsicherheit im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit eines Systems werden nur durch stochastische Simulationen schon in frühen Entwicklungsphasen deutlich und können durch geeignete Maßnahmen gesteuert werden. Man spricht deshalb statt von stochastischer Simulationen oft auch von "Uncertainty Management".

Die praktische Anwendung wird anhand der Simulation eines Kopfaufpralls nach FMVSS201 mit LS-DYNA demonstriert. Es wird gezeigt, welche Auswirkungen Unsicherheiten bezüglich der Versuchsbedingungen und der Eigenschaften der Innenraumverkleidung auf die Kopfbelastung haben.

Stichworte:

Stochastische Simulationen, Streuung, Monte Carlo Methode, Kopfaufprall FMVSS 201, Optimierung

Einleitung

Wenn man die Entwicklung von Crash-Simulationsmodellen in den letzten Jahren betrachtet, stellt man fest, daß diese deutlich größer geworden sind. Der Detaillierungsgrad ist massiv gestiegen, selbst kleinste geometrische Details werden modelliert. Gesamtfahrzeugmodelle sind heute mit mehreren hunderttausend Elementen vernetzt. Auch bei Modellen einzelner Module, wie zum Beispiel Airbags, werden vereinfachte Modelle, die mit geometrischen Skalierungen und der Initial Metric Methode arbeiten, immer häufiger durch aufwendig gefaltete Modelle ersetzt, die nicht selten aus 20000 und mehr Elementen bestehen (vgl. [1]). Zweifellos sind die Modelle durch diese detaillierte Abbildung auch wesentlich realistischer geworden, es scheint aber heute ein Punkt erreicht zu sein, wo eine noch feinere Modellierung die Vorhersagekraft der Modelle nicht mehr weiter erhöhen kann. Vielmehr besteht die Gefahr, daß numerische Ungenauigkeiten (z.B. durch Rundungsfehler) die Ergebnisse sogar verfälschen. Eine weitere Verbesserung der Vorhersagekraft wird deshalb wohl weniger aus einer noch besseren Abbildung der Geometrie, als aus einer verbesserten Modellierung anderer physikalischer Gegebenheiten resultieren. Am Beispiel der oben erwähnten Airbagmodellierung läßt sich dies gut verdeutlichen: Anstatt in Zukunft Airbags noch feiner zu vernetzen, macht es zweifellos mehr Sinn, die Stömvorgänge, insbesondere während der Entfaltung, im Modell abzubilden, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern.

Ein besonders wichtiges physikalisches Phänomen, das typischerweise in Simulationsmodellen vernachlässigt wird, ist die in der Realität vorhandene Streuung nahezu aller physikalischer Größen, die ein technisches System bestimmen. Egal ob Materialeigenschaften, geometrische Abmessungen oder Randbedingungen - all diese Parameter unterliegen einer realen Streuung. In Simulationsmodellen wird jedoch normalerweise von einem Nominal- oder Idealzustand ausgegangen, in dem sich ein reales System nur mit einer extrem geringen Wahrscheinlichkeit befindet.

Natürlich sind sich Ingenieure der Tatsache bewußt, daß die Streuungen unter Umständen die Leistungsfähigkeit eines Systems massiv verschlechtern können. Allerdings läßt sich nicht ohne weiteres vorhersagen, wie groß dieser Einfluß ist. In der Praxis führt dies oft dazu, daß man hohe Sicherheitsfaktoren in Systeme einbaut, um sicherzustellen, daß diese auch unter ungünstigen Umständen funktionieren (vgl. [6]).

Ein Beispiel dazu: Nach FMVSS 201 muß die Kopfbelastung, gemessen am HIC(d) (Head Injury Criterion), beim Aufprall einer Kopfform auf bestimmte Punkte im Fahrzeuginnenraum kleiner als 1000 sein. Liegt nun das Ergebnis einer Simulation oder eines Tests bei 900, wird man sicherlich noch nicht unbedingt zufrieden sein, denn dies schließt nicht aus, daß die Ergebnisse bei einem offiziellen Test höher liegen und eventuell sogar die Grenze von 1000 übersteigen. Die Fahrzeughersteller werden daher intern deutlich niedrigere Zielwerte setzen, um sicher zu sein, daß das Fahrzeug den Test in jedem Fall besteht.

Ideal wäre es natürlich, wenn man wüßte, wie das Ergebnis im schlechtesten Fall aussieht. Dann würde man das Fahrzeug so konstruieren, daß es in diesem Fall den Grenzwert gerade unterschreitet. Bei einem komplexen System wie einem Fahrzeug ist jedoch in der Praxis nicht möglich vorherzusagen, welches der schlechteste Fall ist. Zu viele Parameter beeinflussen die Systemleistung. Der Zielwert wird deshalb in den meisten Fällen deutlich niedriger als eigentlich nötig liegen. Dies erschwert nicht nur die Konstruktion, sondern ist oft auch sehr teuer. Es ist also sinnvoll, wenn man die Folgen der Streuung kennt und somit zuverlässige Aussagen über die Leistung eines Systems unter unsicheren Bedingungen treffen kann. Dazu braucht man statistische Aussagen über das Systemverhalten. Diese kann man aus umfangreichen und teuren Versuchsreihen gewinnen. Eine günstige Alternative hierzu ist die Berücksichtigung der Streuung in Simulationsmodellen. Anstatt eines Tests wird eine Simulation mehrfach wiederholt, um zu sehen, welchen Einfluß die Streuungen von Konstruktionsparametern und Randbedingungen auf die Ergebnisse haben. Solche sogenannte stochastische Simulationen erlauben, genau wie Testreihen, die statistische Auswertung der Ergebnisse und somit Aussagen über die Zuverlässigkeit eines Systems unter unsicheren Bedingungen.

Wenn man im obigen Beispiel wüßte, daß mit der Konstruktion, die zu einem HIC von 900 geführt hat, die Wahrscheinlichkeit, einen Wert von über 1000 zu erzielen kleiner als 1% ist (in der Statistik gibt es niemals die Aussage daß ein Ereignis sicher nicht eintritt!), würde man diese Konstruktion sicher nicht verändern. Läge die Wahrscheinlichkeit dagegen bei 25%, würde man zweifellos eine andere Lösung suchen.

Der folgende Abschnitt beschreibt, wie mit Hilfe der Monte Carlo Methode stochastische Simulationen sehr einfach durchgeführt werden können. Anschließend wird die praktische Anwendung der Methode am Beispiel einer Kopfaufpralluntersuchung demonstriert.

Stochastische Simulation mit der Monte Carlo Methode

Ein geeigneter Ansatz zur Lösung der oben beschriebenen Problematik sind stochastische Simulationen auf der Basis der Monte Carlo Methode. Mit Hilfe dieses Verfahrens wird eine gegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung durch Stichproben, die mit Hilfe von Zufallszahlen gewonnen werden, näherungsweise nachgebildet (vgl. [5], S. 232). Weiß man also beispielsweise, daß die Dicke eines Karosserieblechs normalverteilt mit einem Mittelwert von 2,5 mm und einer Standardabweichung von 0,005 mm ist, kann man diesen Parameter in einem Simulationsmodell mit einer annähernd identischen Verteilung einsetzen. Die Güte der Anpassung der mit der Monte Carlo Methode erzeugten Verteilung an die vorgegebene theoretische Verteilung hängt dabei von der Anzahl der erzeugten Zufallszahlen und dem verwendeten Monte Carlo Algorithmus ab.

Man parametrisiert also ein existierendes deterministisches Modell und ersetzt die zuvor als fest angenommenen Parameter durch Zufallszahlen, die einer bestimmten Verteilung gehorchen. Statt einem Modell erhält man dann eine Stichprobe von N Modellen. Typischerweise liegt N im Bereich von 40 bis 150. Jedes dieser Modelle wird dann berechnet. Da diese N Modelle völlig unabhängig voneinander sind, können sie in beliebiger Reihenfolge und somit auch alle gleichzeitig gerechnet werden. Dadurch ist es möglich, stochastische Simulationen äußerst effizient auf eine große Anzahl vorhandener CPUs zu verteilen. So gelingt es, auch größere Stichproben innerhalb relativ kurzer Zeiträume zu bearbeiten. (vgl. [3], S. 5)

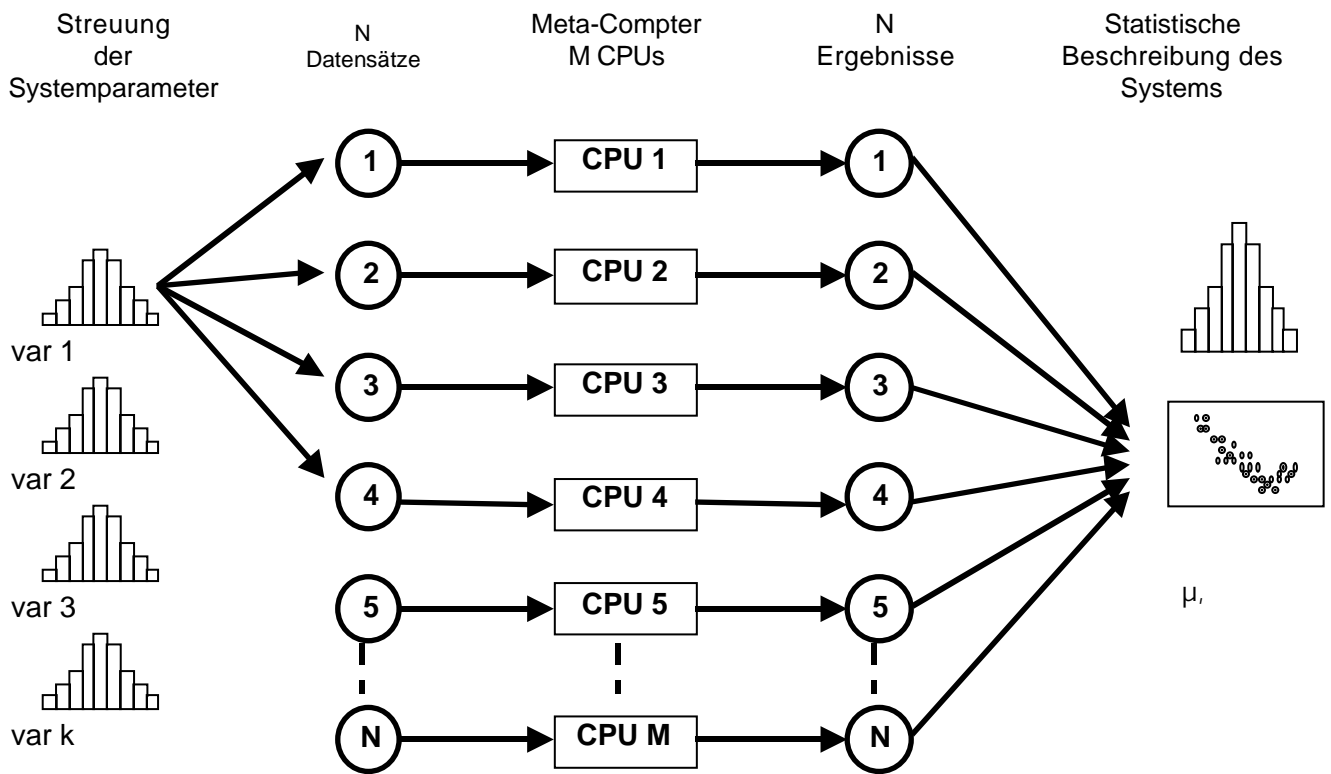


Abb. 1: Schema einer Monte-Carlo Studie

Als Ergebnis erhält man N Lösungen des stochastischen Modells. Anstelle einer einzigen deterministischen Lösung hat man also wieder eine Stichprobe von Lösungen, die man mit statistischen Methoden auswerten kann. Auch die Ergebnisse liegen in Form von Verteilungen vor und können beispielsweise als Histogramme dargestellt werden. Anhand des weiter oben bereits erwähnten Beispiels läßt sich dies gut illustrieren.

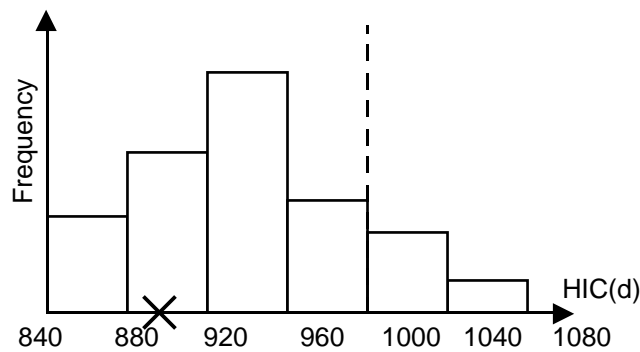


Abb. 2: Histogramm des HIC(d)

Der durch die gestrichelte Linie angedeutete Grenzwert liegt bei 1000. Der Wert, der aus einer deterministischen Simulation hervorgeht, beträgt 900 (x). Das Histogramm, das sich aus der stochastischen Simulation ergibt, zeigt in diesem Fall, daß die Wahrscheinlichkeit den Grenzwert zu überschreiten relativ groß ist und daß das deterministische Modell ein zu optimistisches Ergebnis geliefert hat, das niedriger als der Mittelwert (= wahrscheinlichstes Ergebnis) ist. Der Informationsgehalt der stochastischen Ergebnisse ist also wesentlich höher als der der deterministischen Lösung, die keinerlei Anhaltspunkte bezüglich der Zuverlässigkeit der Ergebnisse liefert.

Letztendlich braucht man aber genau diese Informationen, um fundierte Entscheidungen auf der Basis von Simulationsmodellen treffen zu können.

Stochastische Simulationen liefern neben Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit eines Systems natürlich noch viele zusätzliche Informationen. So erkennt man sehr deutlich die Bedeutung, die einzelne Parameter für die Leistung eines Systems haben. Mit Hilfe von Korrelationsanalysen kann dieser Einfluß quantifiziert werden. Natürlich kann diese Information wiederum unmittelbar zur Verbesserung (Optimierung) eines Systems genutzt werden.

Die Anwendungsgebiete der stochastischen Simulationen sind sehr vielfältig. Prinzipiell machen sie überall dort Sinn, wo Streuungen und Unsicherheiten einen nicht vernachlässigbaren Einfluß haben. So wird die Methode im Bauwesen schon länger eingesetzt, weil dort sehr große Unsicherheit bezüglich der auftretenden Lasten (z.B. Erdbeben) herrscht. Ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet liegt im Bereich der Simulation biomechanischer Systeme, weil dort typischerweise extrem große Streuungen auftreten (vgl. [2]). Im Bereich der Crashsimulation wird die Methode erst seit wenigen Jahren angewandt. Erst die Verfügbarkeit entsprechender Hardware hat den industriellen Einsatz ermöglicht, da die Rechenzeiten von Crashmodellen teilweise sehr lang sind. Besonders interessant ist die Anwendung bei kleineren Teilmodellen, wie dem in dieser Arbeit vorgestellten Kopfaufprallmodell oder bei MKS Modellen mit relativ kurzen Rechenzeiten (vgl. [4]).

Für die Durchführung von stochastischen Simulationen steht mit dem Programmpaket ST-ORM (STochastic Optimization and Robustness Management) eine grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung, die sowohl die Definition stochastischer Probleme als auch die Steuerung und Überwachung der Rechenläufe und die Auswertung der Ergebnisse ermöglicht. Das Programm kann in Verbindung mit nahezu jedem Berechnungsprogramm eingesetzt werden. Einzige Voraussetzung ist das Vorhandensein eines ASCII Eingabedatensatzes. Die hier gezeigten Beispiele wurden alle mit ST-ORM durchgeführt.

Stochastische Simulation am Beispiel einer Kopfaufprallsimulation

Modellbeschreibung

Anhand eines praktischen Beispiels soll die Anwendung der Methode erläutert werden. Dabei wurde bewußt ein Beispiel ausgewählt, das zeigt, daß schon mit einem relativ geringen Rechenaufwand und ohne spezielle Hardware beachtliche Ergebnisse erzielt werden können.

Das verwendete LS-DYNA Modell bildet den Kopfaufprall auf die B-Säule eines PKW ab. Die simulierten

Versuchsbedingungen entsprechen der US Vorschrift FMVSS 201 (vgl. [7]). Voruntersuchungen hatten gezeigt, daß man nicht notwendigerweise ein Gesamtfahrzeugmodell für diese Untersuchung verwenden muß, da die Belastung sehr lokal auftritt. Um eine gute Übereinstimmung mit einem Versuch zu erzielen, reicht die Modellierung der B-Säule und der unmittelbar angrenzenden Karosserieteile aus. Die Ränder dieses Teilmodells wurden mit Hilfe von Randbedingungen (SPC) fest eingespannt.

Die folgende Abbildung zeigt das Modell in verschiedenen Ansichten.

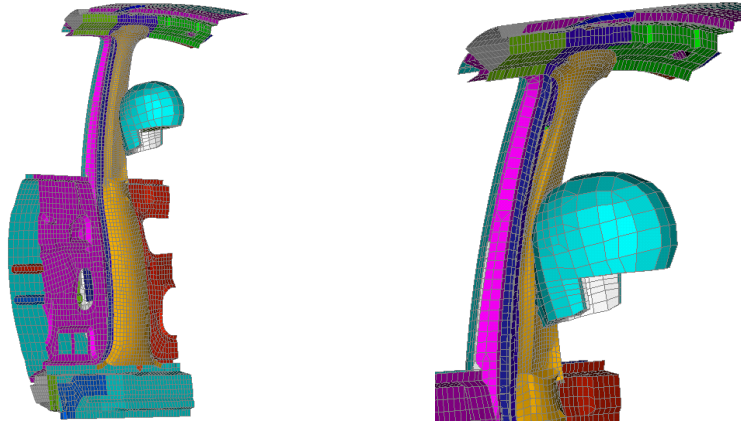


Abb. 3: Kopfaufprall-Modell

Insgesamt besteht das Modell aus ca. 20000 Schalen- und Volumenelementen. Besonderer Wert wurde auf die Modellierung der Bauteile im unmittelbaren Auftreffbereich gelegt, da diese von größter Bedeutung für die auftretenden Belastungen sind. Deshalb müssen in diesem Bereich sämtliche Rippen, Schrauben usw. möglichst genau modelliert werden.

Bei der Kopfaufpralluntersuchung nach FMVSS 201 ist die zentrale Bewertungsgröße das Head Injury Criterion (HIC). Im Ausgangsmodell lag dieser Wert bei

$$\text{HIC}(d) = 993$$

Der Wert lag aus unserer Sicht "gefährlich" nah am Grenzwert von 1000. Wir haben deshalb untersucht, ob der Grenzwert mit ausreichender Sicherheit unterschritten wird und, da dies nicht der Fall war, das System (in diesem Fall den Aufbau der B-Säulen Innenverkleidung) so verbessert, daß auch bei den zu erwartenden Versuchsstreuungen eine ausreichende Sicherheit besteht.

Stochastische Analyse

Im ersten Schritt wurde also untersucht, wie sich Streuungen auf das Ergebnis auswirken. Dabei kann man zwei wichtige Streuungsursachen unterscheiden: Die Versuchsbedingungen und die Eigenschaften des untersuchten Systems.

Bei den Versuchsbedingungen kann die wichtigste Streuung schon der Vorschrift FMVSS 201 entnommen werden: Die Aufprallgeschwindigkeit kann zwischen 23,3 und 23,9 km/h schwanken. Diese Streuung wurde in der stochastischen Analyse in Form einer gleichverteilten Variablen simuliert (vgl. [7], S. 21).

Bei den Systemeigenschaften handelt es sich primär um Geometrie- und Materialkenngrößen, wie z.B. die Dicken von Blech- und Verkleidungsteilen und insbesondere der Rippen, die E-Moduli der verschiedenen Materialien und die Reibungskonstanten bei den Kontakten zwischen Kopf und B-Säule. Im einzelnen wurden folgende Werte variiert, wobei jeweils eine Normalverteilung angenommen wurde:

Parameter	Standardabweichung vom Nominalwert
Kontaktreibungskoeffizient (stat./dyn.)	30 %
E-Modul der Stahlteile	1 %
E-Modul der Kunststoff-Innenverkleidung	5 %
Bruchdehnung der Kunststoff-Innenverkleidung	10 %
Dicke der Stahl- und Kunststoffteile	2 %

Die große Streuung bei der Reibung wurde deshalb gewählt, da es eine erhebliche Unsicherheit bzgl. dieses Wertes gab. Mit der großen Streuung soll geprüft werden, ob Abweichungen des tatsächlichen Wertes vom angenommenen Wert Einfluß auf die Ergebnisse haben.

Insgesamt wurden mit diesem Modell 50 Rechenläufe durchgeführt, um die Verteilung des HIC zu ermitteln. Das folgende Histogramm (vgl. Abb. 4) zeigt, daß die Wahrscheinlichkeit den Grenzwert zu überschreiten in der Tat sehr hoch ist. Sie liegt zwischen 40% und 50% und ist somit nicht akzeptabel.

Der Mittelwert des HIC liegt bei 992 und somit sehr nah am Ausgangsmodell, die Standardabweichung liegt bei 24,7.

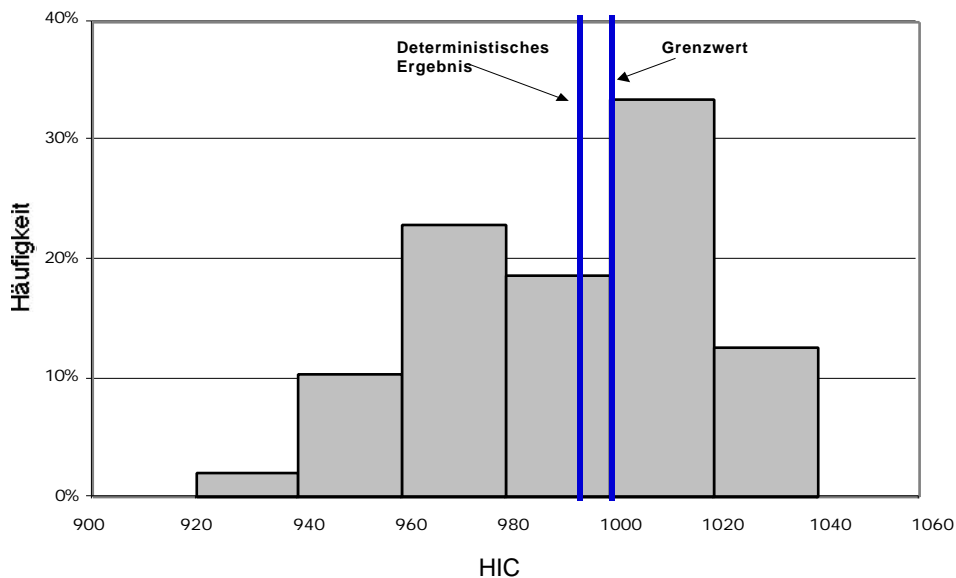


Abb. 4: Verteilung des HIC

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der stochastischen Analyse sind die Korrelationen zwischen den Streuungen der Modellparameter und der Ergebnisstreuung. Diese zeigen, welche Parameter den größten Einfluß auf das Ergebnis haben. Korrelationen können mittel verschiedener Koeffizienten quantifiziert werden. Der am häufigsten verwendete Koeffizient ist der *Bravais-Pearson Koeffizient*. Dieser mißt die Stärke des linearen Zusammenhangs zweier Größen. Der *Rang-Korrelationskoeffizient* nach *Spearman* ist dagegen auch geeignet, monotone nicht-lineare Zusammenhänge zu bewerten (vgl. [5], S. 510). Da bei Crashsimulationen häufig nicht-lineare Zusammenhänge beobachtet werden, empfiehlt sich hier der Rang-Korrelationskoeffizient r_s .

$$r_s = \frac{rk(x_i) rk(y_i) - n \bar{rk}(x) \bar{rk}(y)}{\sqrt{\left((rk(x_i))^2 - n (\bar{rk}(x))^2 \right) \left((rk(y_i))^2 - n (\bar{rk}(y))^2 \right)}}$$

$$r_s = \frac{rk(x_i) rk(y_i) - \frac{n}{4} (n+1)^2}{\sqrt{\left((rk(x_i))^2 - \frac{n}{4} (n+1)^2 \right) \left((rk(y_i))^2 - \frac{n}{4} (n+1)^2 \right)}}$$

-1 r_s 1

$rk(x_i)$: Rang von x_i

$\bar{rk}(x)$: mittlerer Rang von x

n : Stichprobenumfang

Den Rang von x_i ermittelt man, indem man abzählt, wie viele Beobachtungswerte kleiner als x_i sind und zu dieser Zahl 1 addiert.

Der Korrelationskoeffizient ist immer ein Wert zwischen -1 und 1. Ein Wert von 0 bedeutet, daß es keinerlei Zusammenhang gibt. Ein Wert von 1(-1) bedeutet, daß ein monoton steigender (fallender) Zusammenhang vorliegt.

Die folgende Tabelle zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den Modellparametern und dem HIC:

	p1	p2	p3	p4	P5	P6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14
Be-schreibung	V0	Reibung	E Blech	E Höhen-versteller	E Ver- kleidung	D B-Sl. Außen	D B-Sl. Zwischen- schicht	B-Sl. innen	D Ver- kleidung	D Gegen- platte	D Höhen- versteller	D Ver- stärkung	Bruch- dehung Ver- kleidung	D Rippen Verkleidung
HIC	0,72	-0,31	-0,11	-0,17	-0,03	0,01	0,51	0,19	0,07	-0,05	-0,134	-0,08	0,03	0,10

(Erläuterung: D = Dicke, E = E-Modul, B-Sl. = B-Säule)

Es ist keine Überraschung, daß die Aufprallgeschwindigkeit den größten Einfluß auf das Ergebnis hat. Weitere wichtige Parameter sind in diesem Fall die Dicke der sog. Zwischenschicht, einer Blecheinlage in der B-Säule, und die Kontaktreibung.

Die folgende Abbildung zeigt die relativen Größen der Korrelationskoeffizienten und gibt damit einen optischen Eindruck der Bedeutung einzelner Parameter für das Ergebnis.

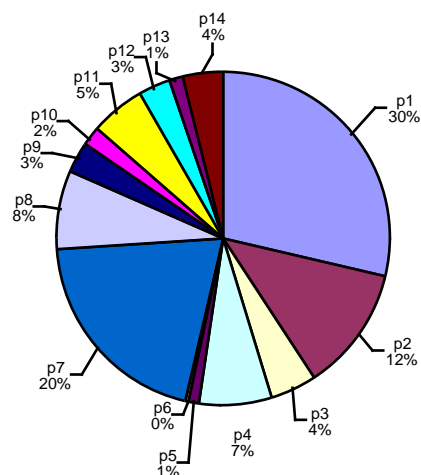


Abb. 5: Korrelationskoeffizienten - relative Größe

Im folgenden Schritt wurde versucht, die Kopfbeschleunigung auf ein Maß zu verringern, bei dem die

Wahrscheinlichkeit, den Grenzwert zu überschreiten, sehr klein ist. Hierzu wurde der, in der Software ST-ORM verfügbare, stochastische Optimierungsalgorithmus verwendet. Hierbei handelt es sich streng genommen nicht um eine wirkliche Optimierung, sondern um eine Verschiebung hin zu einem vorgegebenen Ziel. Das Prinzip des Algorithmus' ist sehr einfach:

Es wird eine Reihe von stochastischen Simulationsläufen nacheinander durchgeführt. Nach jedem Lauf wird die euklid'sche Distanz der Ergebnisse jeder Einzelrechnung zum vorgegebenen Ziel berechnet. Das Ziel ist ein durch die Zielwerte eines oder mehrerer Ergebnisse definierter Punkt im (n-dimensionalen) Ergebnisraum (vgl. Abb. 6). Die Rechnung mit der geringsten Distanz ist die Basis für den folgenden Lauf. Die als Optimierungsgrößen definierten Parameter streuen nun um die Werte der "besten" Rechnung. Die Modifikation der Optimierungsgrößen kann begrenzt werden, um physikalisch/technischen oder auch ökonomischen Schranken Parameter simuliert. Sie bleiben dabei jedoch auf ihrem Anfangsniveau. Das Verfahren verschiebt also die Ergebniswolke in Richtung eines vorgegebenen Ziels.

Hauptvorteil des Verfahrens ist die gleichzeitige Absicherung der Robustheit des optimierten Ergebnisses. So wird verhindert, einen Ausreißer als Optimum zu identifizieren.

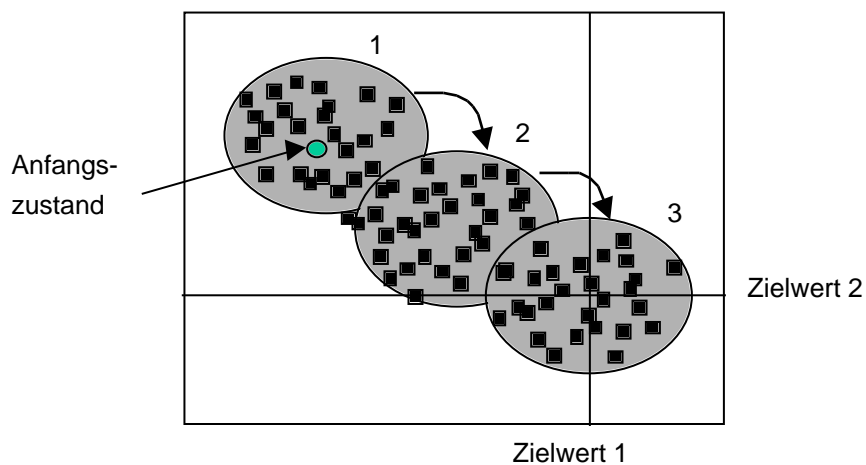


Abb. 6: Stochastische Optimierung

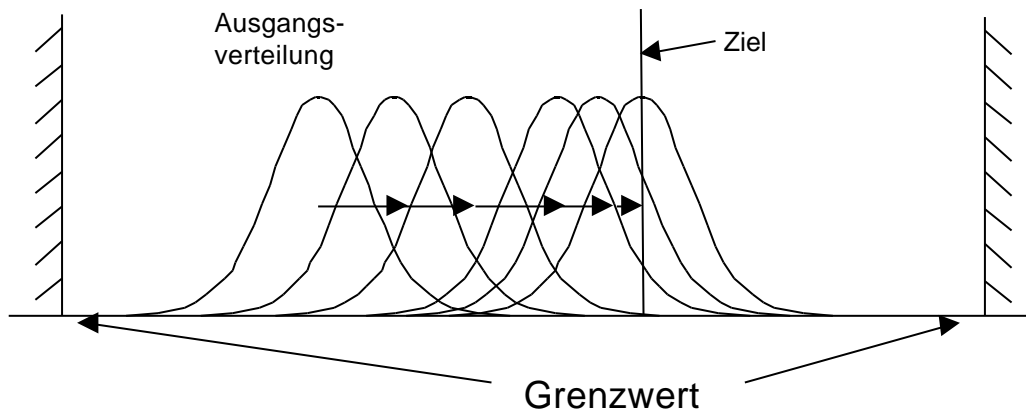


Abb. 7: Bewegen der Verteilung der Optimierungsgrößen

Im vorliegenden Fall wurden folgende Parameter als Optimierungsgrößen ausgewählt:

- Dicke der Verkleidungsrippen
- E-Modul der Verkleidung

- Dicke der B-Säulen-Zwischenschicht
- Dicke der B-Säulen-Verstärkung

Für die Auswahl spielten zwei Punkte eine Rolle:

- Die im Rahmen der Robustheitsuntersuchung festgestellte Bedeutung für das Ergebnis und
- die Möglichkeit bzw. Zulässigkeit von Änderungen an dem jeweiligen Bauteil.

Alle übrigen Parameter wurden weiterhin mit den oben genannten Streuungen simuliert. Nur die Streuung der Reibkoeffizienten wurde auf ein realistischeres Maß reduziert ($\sigma = 2\%$).

Das zu verbessernde Ergebnis ist in diesem Fall nur der HIC-Wert. Insofern spielt die Höhe des Zielwerts in diesem Fall keine Rolle, da es sich um einen 1-dimensionalen Zielraum handelt.

Bereits mit nach 2 Rechenläufen à 24 Simulationen konnte das Ergebnis deutlich verbessert werden. Der HIC Mittelwert wurde auf 936 gesenkt, die Standardabweichung betrug 18. Damit ist die Wahrscheinlichkeit den Grenzwert von 1000 zu überschreiten auf unter 0,1% gesunken, wenn man von einem annähernd normalverteilten Ergebnis ausgeht. Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisverbesserung anhand der Verteilungskurven. Wegen der besseren Übersichtlichkeit wurden die empirischen Verteilungen durch Normalverteilungen mit gleichen Verteilungsparametern ersetzt.

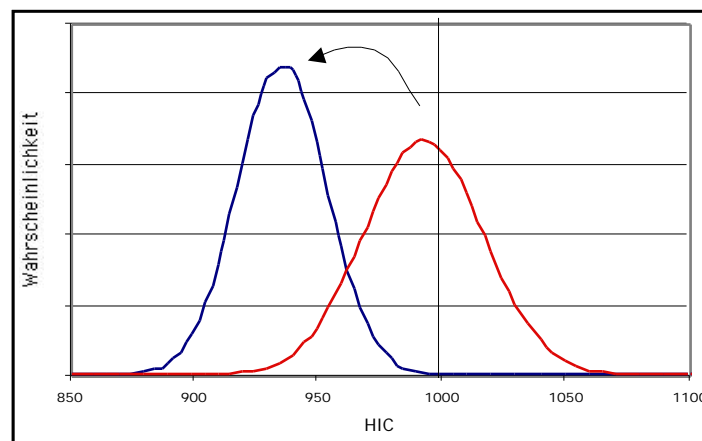


Abb. 8: Ergebnisverbesserung

Dazu wurden die Mittelwerte der Optimierungsgrößen wie folgt geändert:

- Dicke der Verkleidungsrippen unverändert bei 5 mm
- E-Modul der Verkleidung von 2600 N/mm^2 auf 2850 N/mm^2
- Dicke der B-Säulen-Zwischenschicht von 1,2 mm auf 1,1 mm
- Dicke der B-Säulen-Verstärkung von 2,5 auf 2,3 mm

Das hier gefundene Ergebnis stellt zweifellos kein Optimum im mathematischen Sinne dar. Es ist vielmehr eine praktisch umsetzbare, robuste Lösung, bei der mit ausreichender Sicherheit ein Überschreiten des Grenzwerts vermieden wird. In der Praxis sind jedoch solche Lösungen weitaus wertvoller als Optimallösungen, die nicht nur meist teuer und schwer umsetzbar sind, sondern oft auch zu mangelnder Robustheit neigen.

In Bezug auf das in der Einleitung geschilderte Beispiel zeigt sich hier, daß man in Kenntnis der Ergebnisstreuung einen HIC Mittelwert von über 900 durchaus akzeptieren kann, da in diesem Fall die Streuung so gering ist, daß die Wahrscheinlichkeit einer Verletzung des Grenzwerts extrem niedrig ist.

Zusammenfassung

Stochastische Simulationen sind eine sinnvolle Ergänzung zu herkömmlichen deterministischen Methoden. Sie bieten dem Ingenieur einen tieferen Einblick in das Verhalten seiner Modelle unter realistischen und damit unsicheren Bedingungen. Stochastische Simulationen erlauben die Bewertung der Zuverlässigkeit von Simulationsergebnissen. Dies ist gerade vor dem Hintergrund, daß alle Automobilhersteller einen weitgehenden Verzicht auf Prototypentests anstreben, von sehr großer Bedeutung. Wenn wichtige Konstruktionsentscheidungen allein auf der Basis von Simulationsergebnissen getroffen werden müssen, dann kommt der Bewertung dieser Ergebnisse natürlich eine enorme Bedeutung zu.

Die bewußte Berücksichtigung von physikalischen Streuungen bringt die Simulation der Realität ein Stück näher. Der Preis, der dafür in Form von zusätzlichen Rechnungen gezahlt werden muß, ist immer noch gering verglichen mit den Kosten von Hardwaretests. Wenn also stochastische Simulationen nur einige dieser Tests ersetzen können, stellen sie zweifellos auch eine wirtschaftlich sinnvolle Lösung dar.

Einsparpotentiale bietet die Methode auch durch die mögliche Reduzierung von Sicherheitsfaktoren, die auf der wesentlich verbesserten Abschätzung der Folgen von Streuungen und Unsicherheiten beruht. Sicherheitsfaktoren werden in der Praxis oft unnötig hoch gewählt, weil man sich zwar über Streuungen im Klaren ist, deren Ausmaß aber nicht kennt.

Literatur

- [1] Gärtner, T./Eriksson, M./Fältström, J.:
Advanced Technology for the Simulation of Folded Airbags. In: Second European LS-DYNA Users Conference, Gothenburg 1999, S. H 3-11.
- [2] Hoffmann, R./Reuter, R.:
The Power of Stochastic Simulation in Biomechanical Applications: A New Approach to Redefine Biofidelity. In: Yang, K.H.: Impact Biomechanics from Head to Foot - Wayne State Bioengineering Center 60th Anniversary Symposium Proceedings 1999, S. 93-96.
- [3] Marczyk, J.:
Meta-Computing and Computational Stochastic Mechanics. In: Marczyk, J. (Ed.): Computational Stochastic Mechanics in a Meta-Computing Perspective, Barcelona 1997, S. 1-18.
- [4] Reuter, R./Watermann, A.:
Application of Uncertainty Management to MADYMO Occupant Simulations. In: Proceedings of the 2nd European MADYMO Users' Conference, Stuttgart 1999.
- [5] Sachs, L.:
Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg 1999.
- [6] Verderaiame, V.:
Inherent Conservatism in Deterministic Quasi-Static Structural Analysis. NASA, Technical Paper TP-97-206238, Marshall Space Flight Center, Alabama 1997.
- [7] U.S. Department of Transportation – NHTSA:
Laboratory Test Procedure for FMVSS 201 – Occupant Protection in Interior Impact / Upper Interior Head Impact Protection. U.S. DOT TP-201U-00.