

Stochastische Simulation in der Entwicklung und Verifikation von automobilen Systemen

Rainer Hoffmann, Andreas Kuhn,

EASi Engineering GmbH, Alzenau, Deutschland

Cristian Jimenez

EASi Engineering SL, Barcelona, Spanien

<http://www.easi.de>

Zusammenfassung:

Die heutige Automobilentwicklung ist von der Notwendigkeit gekennzeichnet in kurzer Zeit innovative Produkte mit hoher Robustheit und Qualität auf den Markt zu bringen. Hierbei spielt die rechnerische Simulation zur Entwicklungsunterstützung und Verifikation von neuen Produkten eine entscheidende Rolle. Das Erreichen von Performance-Zielen, z.B. Biegesteifigkeit, Wandaufprallkraft, Insassenverletzungswerte steht dabei im Mittelpunkt. Die Ermittlung von Qualität und Robustheit dieser Performance wird heute jedoch noch dem Versuch überlassen.

Die Stochastische Simulation als Erweiterung von deterministischen Analysen erweitert die Aussagekraft der rechnerischen Simulation um die Aspekte Qualität und Robustheit und kann dem Fahrzeugentwickler in einer frühen Entwicklungsphase die entscheidenden Fragen beantworten. Und dies weit vor der Verfügbarkeit von Prototypen.

Der Beitrag zeigt auf, in welchen Phasen der Automobilentwicklung stochastische Simulationen eingesetzt werden. Es werden aktuelle Beispiele aus den Bereichen Konzeptentwicklung, Systementwicklung und Multidisziplinäre Designverbesserung vorgestellt. Desweiteren werden Strategien zur Nutzung von erweiterten Computerressourcen zur Durchführung stochastischer Simulationen mit großen Fahrzeugcrashmodellen erläutert.

Keywords:

Robustheit, stochastische Simulation, Crash, NVH, multidisziplinär, Optimierung

1 Innovation und Risikomanagement

Den Wettlauf um die Gunst des Kunden entscheidet heute derjenige für sich der innovative Produkte schnell am Markt einführen kann. Innovationen sind die Basis für die Wettbewerbsfähigkeit jedes Unternehmens. Eine hohe Innovationsgeschwindigkeit sichert dabei auch langfristig die Marktposition des Unternehmens.

Innovation und hohe Innovationsgeschwindigkeit werden heute durch den Einsatz von Methoden der rechnerischen Simulation signifikant unterstützt. Das Erreichen von Performance-Zielen, z.B. Biegesteifigkeit, Wandaufprallkraft, Insassenverletzungswerten steht dabei im Mittelpunkt. Hierdurch wird nicht nur der Produktgestaltungsprozeß sondern auch der Prozeß der Absicherung der Performance eines innovativen Produktes verkürzt.

Insbesondere technische Innovationen bergen jedoch Risiken, die dazu führen können, daß neue Produkte nicht, oder später als geplant, den Markt erreichen. Darüber hinaus führen Risiken, die in der Produktentwicklung gänzlich ignoriert oder übersehen werden, häufig zu unerwarteten Problemen während Produktion oder Betrieb eines Produktes. Kostspielige Nachbesserungen oder sogar Rückrufaktionen sind die Folge. Die jüngste Vergangenheit hat gezeigt, dass heute Rückrufaktionen Ausmaße erreichen können, die das Überleben selbst großer multinationaler Unternehmungen gefährden. Innovationen bergen immer Risiken. Diese Risiken können nicht vermieden werden, es sei denn, Innovationen werden bewußt vermieden. Das kann sich jedoch kein Unternehmen leisten.

Aufgabe einer konsequenten Produktentwicklung muss es daher sein, die Risiken innovativer Produkte oder Produktionsmethoden zu jedem Zeitpunkt der Entwicklung zu kennen, zu bewerten und zu managen. Ein Verzicht auf ein solches Risikomanagement ist sträflich. Heute wird eine Risikobewertung in der Produktentwicklung durch das entwicklungsbegleitende physikalische Testen von Prototypen ermöglicht. Kostendruck, und die Forderung Produkte schneller in den Markt zu bringen, haben jedoch zu einer Straffung von Testprogrammen geführt. Mit dem Einsatz von Methoden zur virtuellen Produktentwicklung sollte diese Reduzierung durch den „Test“ im Computer kompensiert werden.

Inzwischen ist jedoch klar geworden, daß dies nicht im notwendigen Maße möglich ist. Der virtuelle Test kann den realen Test nicht ohne weiteres ersetzen!

Woran liegt das? Im Gegensatz zum realen Test bewertet der virtuelle Test nur den Idealzustand von Produkt und Betriebsbedingungen; das mathematische Modell ist exakt. Im Test dagegen sind Toleranzen aus Produktion und Lastbedingungen immer vorhanden; die Wirklichkeit ist nicht exakt. Dieses Dilemma hat nun entscheidenden Einfluß auf die Innovationsfähigkeit eines Unternehmens. Es bedeutet, daß wirkliche Innovation weiter den realen Test notwendig macht, da der virtuelle Test die Risiken einer Innovation, die aus Toleranzen, unsicheren Lasten und Randbedingungen resultieren nicht bewerten kann. Die Innovationsgeschwindigkeit eines Unternehmens wird damit durch die Möglichkeiten des realen Tests beschränkt.

Läßt sich dieses Dilemma lösen? Ja, hierzu ist es aber notwendig den wirklichen Test im Computer abzubilden, d.h. auch die Unsicherheiten in Produkteigenschaften, Lasten und Randbedingungen in das virtuelle Modell mit einzubeziehen. Stochastische Simulationen erlauben genau dies. Statt nur den Idealzustand des Produktes zu simulieren, werden in stochastischen Simulationen die in der Realität vorhandenen Streuungen im virtuellen Modell statistisch richtig mitgeführt.

Das Ergebnis stochastischer Simulationen ist nicht die Ideallösung, sondern die wahrscheinlichste Lösung unter realen Bedingungen. Gleichzeitig wird die wahrscheinlichste Lösung auch hinsichtlich ihrer Robustheit und Risiken bewertet. Damit sind stochastische Simulationen die ideale Basis, um frühzeitig im Entwicklungsprozeß Risiken zu bewerten und zu managen. Sie sind die Basis für eine hohe Innovationsgeschwindigkeit mit Hilfe virtueller Methoden.

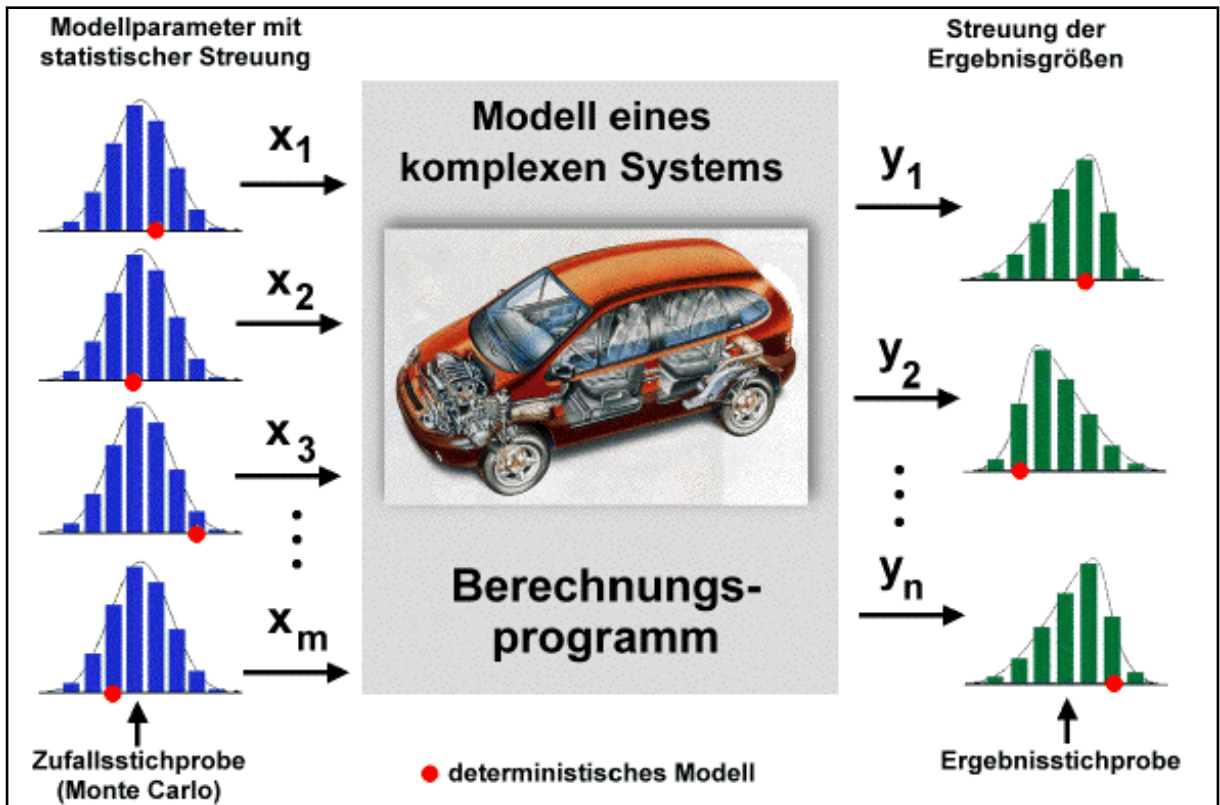


Abb. 1 Das Konzept der stochastischen Simulation

Stochastische Simulationen basieren auf statistischen Methoden wie z.B. der Monte-Carlo Methode. Sie ersetzen typischerweise eine einzelne Analyse durch eine Vielzahl von Analysen, deren kombinierte Ergebnisse eine statistische Beschreibung des simulierten Produktes erlauben.

Obwohl solche Methoden schon in den Achtziger Jahren bekannt waren, ist der industrielle Durchbruch im Engineering Bereich erst in den vergangenen 2 Jahren gelungen. Die ST-ORM Technologie von EASi Engineering hat es erstmals ermöglicht kosteneffizient stochastische Simulationen durchzuführen. Dies ist möglich durch ein spezielles pay-per-use Modell, das die hohen Kosten für Hard- und Software, die noch heute mit stochastischer Simulation assoziiert werden, eliminiert. Für typische Anwendungen im Bereich Strukturmechanik wie z.B. Crashesimulation oder auch multidisziplinäre Anwendungen kostet eine ST-ORM Simulation heute nur ca. 3 -5 mal soviel wie eine einzelne Analyse. Die Aussagen der stochastischen Simulation sind für den Ingenieur jedoch wesentlich wertvoller. Dies kann an folgendem Beispiel illustriert werden.

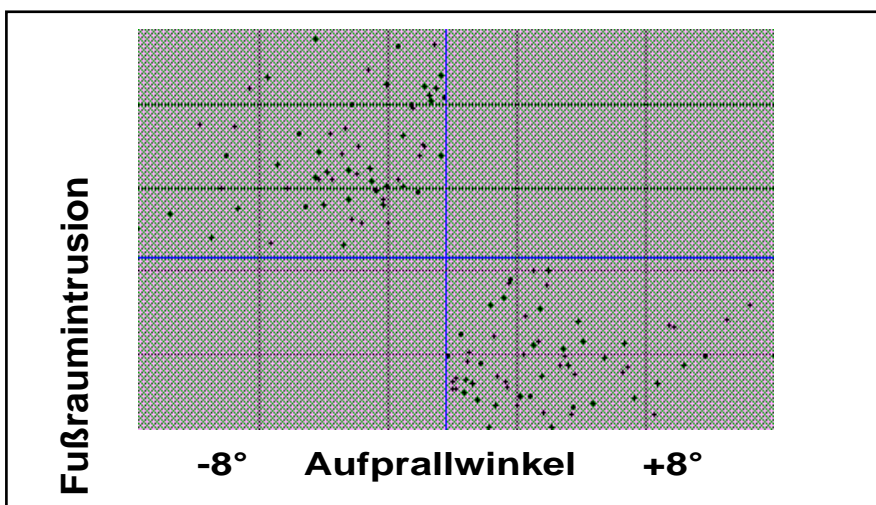


Abb. 2 Ergebniscluster beim Frontalcrash

Der Plot zeigt die Ergebnisse einer stochastischen Crashesimulation. Jeder einzelne Punkt repräsentiert hierbei eine einzelne Craschanalyse des Gesamtfahrzeuges. Es ist die maximale Fussraum-Intrusion in Abhängigkeit des Aufprallwinkels beim Aufprall auf eine abgesetzte Barriere dargestellt. Der Plot belegt, dass auf Grund von realen Streuungen eine starke Abhängigkeit der Intrusion vom Aufprallwinkel besteht. Insbesondere zeigen sich zwei unabhängige Ergebniswolken. Diese sind auf eine physikalische Bifurkation während des Crashvorganges zurückzuführen.

Im Gegensatz zum Ergebnis einer einzelnen Analyse liefert die Auswertung einer stochastischen Simulation dem Ingenieur eine quantitative Aussage über die Risiken eines Produktes unter realen Bedingungen. Auf dieser Basis läßt sich das Risiko bewerten und notwendigen Konstruktionsentscheidungen können getroffen werden. So könnten im vorliegenden Fall die lastaufnehmenden Strukturen so gestaltet werden, dass sie unempfindlich gegenüber Winkeländerungen werden. Diese Art von Konstruktionsverbesserung werden heute erfolgreich mit der Software ST-ORM durchgeführt.

2 Integration von Test und Simulation

In der Vergangenheit wurden Test und Simulation häufig als konkurrierende Technologien zur Verifikation von neuen Produkten verstanden. Heute ist es jedoch notwendig beide Technologien ergänzend einzusetzen um den stark ansteigenden Anforderungen an die technische Produktentwicklung gerecht zu werden. Diese steigenden Anforderungen sind das Ergebnis erhöhter Produktkomplexität die, weil sie neue Entwicklungsrisiken erzeugt, zu weiteren Produkthanforderungen führt. Ziel der Integration von Test und Simulation ist es hierbei die entstehenden Risiken zu managen. Dabei müssen die Stärken der beiden Technologien genutzt werden.

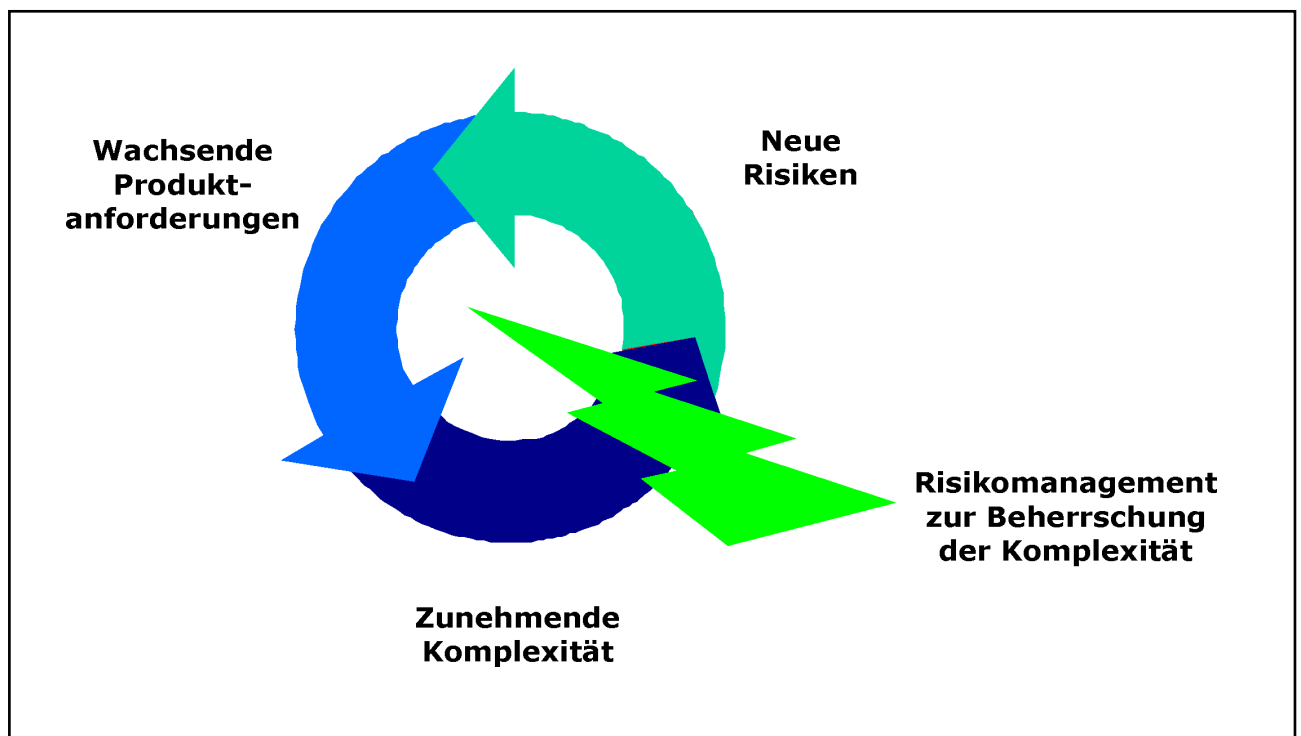


Abb. 3 Zusammenhang zwischen Produkthanforderung, Komplexität und Risiken

3 Stochastische Simulation im Produkt-Entwicklungsprozeß

Der Einsatz der stochastischen Simulation im heutigen Produktentwicklungsprozeß ist durch eine große Differenzierung gekennzeichnet. Wir unterscheiden hier zwischen der Art der Anwendung und dem Zeitpunkt der Anwendung. Die Art der Anwendung verteilt sich dabei auf die Themen:

- Realistischere Simulation
- Robustheitsmanagement
- Modell Validation
- Stochastische Design-Verbesserung
- Design Exploration

3.1 Realistischere Simulation

Realistische Simulation ist der Kern von stochastischer Simulation. Nur der Übergang von einer deterministischen Betrachtungsweise mit nominellen Daten und Modellen zu Modellen, welche die tatsächlichen Streuungen der systemrelevanten Parameter beinhalten, führt zu realistischen Simulationen. Hierzu müssen insbesondere die streuenden Einflüsse von Rand- und Anfangsbedingungen in Versuchen berücksichtigt werden.

3.2 Robustheitsmanagement

Es gibt keine eindeutige Definition von Robustheit in der technischen Produktentwicklung. Bevor die Robustheit eines Designs untersucht werden kann, ist es notwendig sicherzustellen, daß das verwendete Modell robust ist. Modellrobustheit ist dadurch charakterisiert, dass Streuungen der Eingangsparameter durch das Modell nicht unnatürlich verstärkt werden (numerische Stabilität). Für die Ergebnisstreuungen nicht-robuster Modelle gibt es dabei keine physikalischen Erklärungen. Ursachen für nicht robuste Modelle sind in erster Linie Modellierungsschwächen und Fehler in den verwendeten Algorithmen.

Erst mit einem robusten Modell ist eine Aussage über die Robustheit des untersuchten Produktes möglich. Dabei ist es notwendig die Grenzen zwischen Performance, Qualität und Robustheit richtig zu ziehen. Während die Performance durch die Position der Ergebniswolke im Ergebnisraum beschrieben wird, wird die Qualität eines Produktes durch die Größe dieser Ergebniswolke beschrieben. Die Form der Wolke charakterisiert die Robustheit eines Designs. Insbesondere das Auftauchen von mehreren Wolken deutet auf physikalische Bifurkationen und damit auf ein nicht-robustes Systemverhalten hin; Ausreißer sind als einzelne Punkte zu erkennen, die besonders untersucht werden müssen.

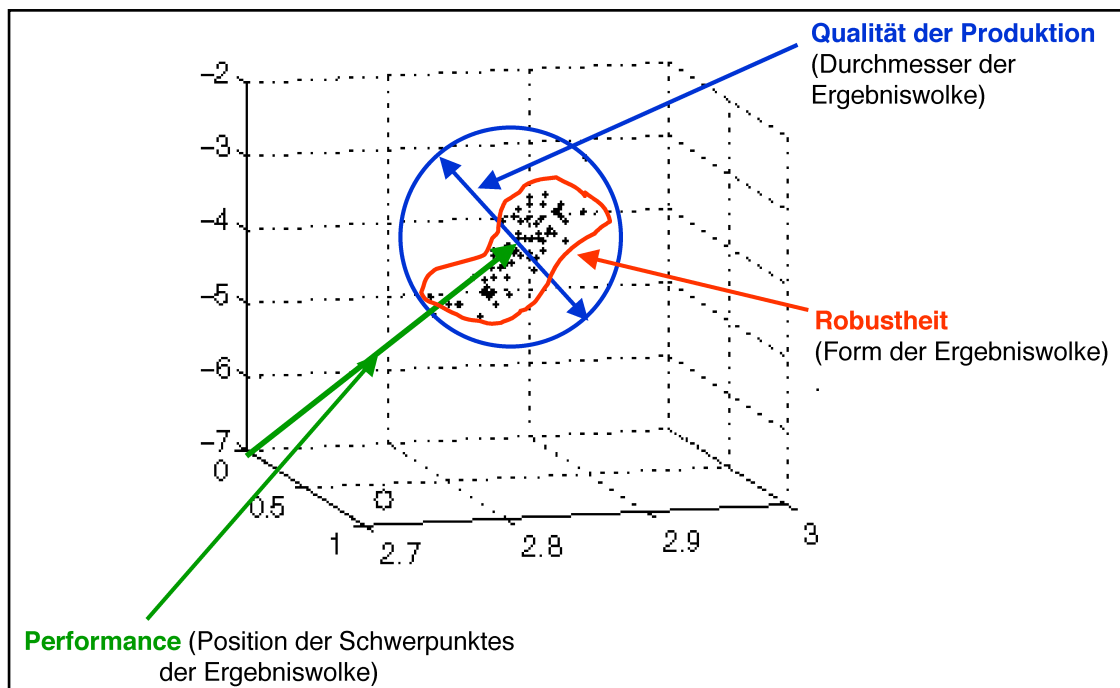


Abb. 4 Bewertung einer Ergebniswolke bezüglich Performance, Qualität und Robustheit

3.3 Modell Validation

Der Validation eines Modells gegenüber experimentellen Ergebnissen wird heute zu wenig Bedeutung zugeordnet. Dabei ist es gerade diese Validation, die entscheidenden Einfluß auf die spätere Aussagekraft von Vorhersagen auf der Basis des mathematischen Modells hat. Validationen versuchen darüber hinaus in der Regel einen Versuch mit einer Simulation in Einklang zu bringen. Wie gefährlich dieses Vorgehen ist, zeigt die Abbildung 5. Obwohl Analyse und Experiment sehr nahe beieinander liegen, sind die Ergebniswolken in diesem 2-dimensionalen Ergebnisraum sehr unterschiedlich. Die Einzelereignisse beschreiben nicht das Verhalten des Systems in einer Simulation unter Berücksichtigung der realen Streuungen.

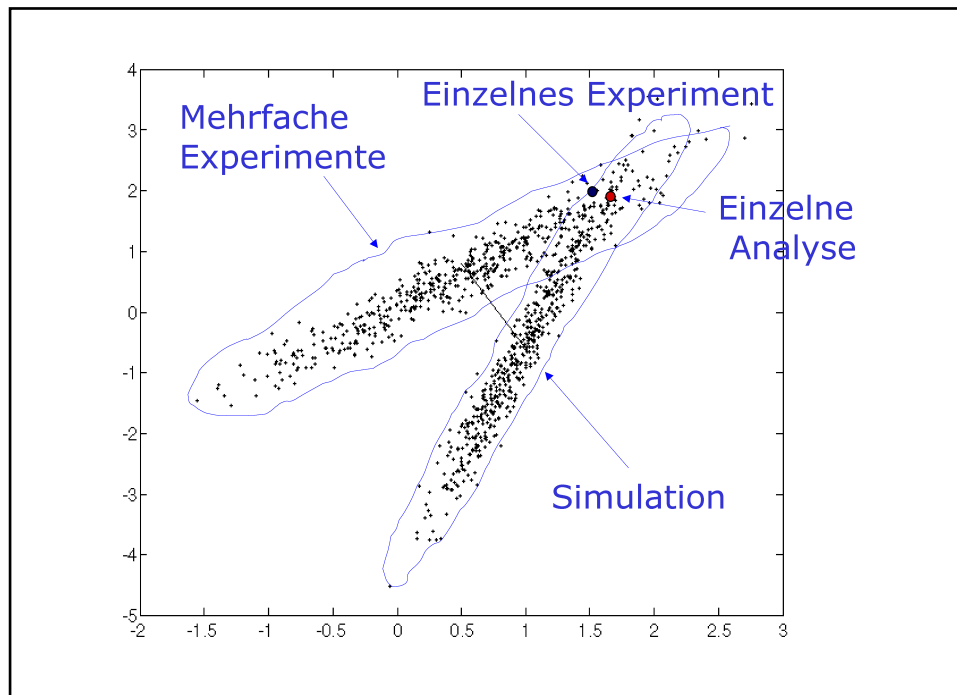


Abb. 5 Simulation und Experimente im 2-dimensionalen Ergebnisraum

Das Ziel einer Validation muß damit neu definiert werden. Es ist notwendig eine Übereinstimmung der Ergebniswolken bezüglich Schwerpunkt (=wahrscheinlichste Performance), Größe (=Qualität) und Form (=Robustheit) im n-dimensionalen Ergebnisraum zu erreichen. Nur bei einer solchen Übereinstimmung kann von Validation gesprochen werden.

3.4 Stochastische Design Verbesserung

Als weitere Anwendung stochastischer Simulationen bietet sich die Verbesserung von Systemen an. Die Verbesserung mittels Stochastischer Simulation ist eine sehr natürliche Vorgehensweise, die sich insbesondere dadurch auszeichnet, daß sie ohne Annahmen und Bedingungen auskommt. In der Praxis ist es so, daß es für ein System eine recht kleine Anzahl sog. Designparameter gibt, also solcher Parameter, die man innerhalb eines vorgegebenen Rahmens (= Design Intervall, vgl. Abbildung 6) ändern kann, um das System zu verbessern. Daneben gibt es natürlich viele weitere Parameter (diese werden auch als freie stochastische Variablen bezeichnet, vgl. Abbildung 6), die sich im Rahmen ihrer Streuung zufällig ändern.

Die stochastische Designverbesserung ist ein iterativer Prozeß. Man spricht auch von Stepping oder Return Mapping. Bei dieser Methode nähert man sich schrittweise, beginnend an einem beliebigen Startpunkt, schrittweise einem Zielwert. Wie schon erwähnt, kommt es in der Regel nicht darauf an eine optimale Lösung zu finden, sondern eine Lösung die den tatsächlichen Anforderungen (z.B. aus dem Lastenheft) genügt. Genau diese Anforderungen gibt man als Zielwerte vor. Hier unterscheidet sich die Methode von typischen Optimierungsverfahren, wo man ohne Zielvorgabe ein mathematisches Optimum zu finden versucht.

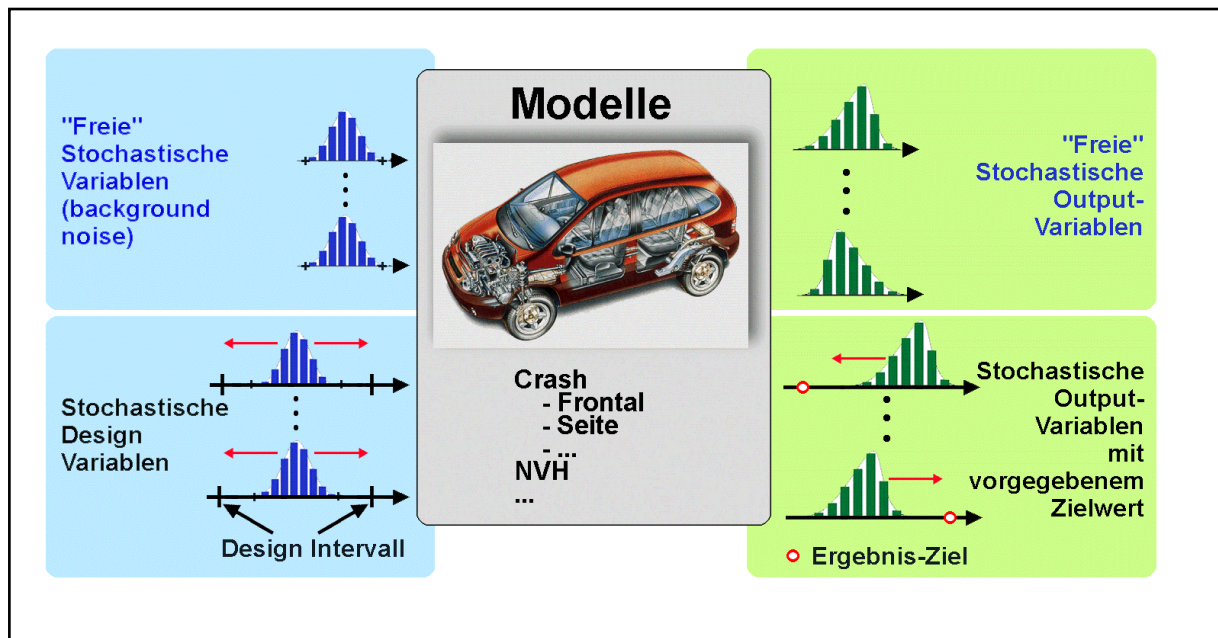


Abbildung 6: Konzept der Stochastischen Verbesserung

Nach der Definition von Start- und Zielpunkten erzeugt man eine kleine Stichprobe (ca. 15 Fälle) mit kleinerer Streuung um den Startpunkt herum. Innerhalb dieser Stichprobe ermittelt man die Distanz jeden Falls zu dem Zielwert im n-dimensionalen Raum und generiert dann eine neue Stichprobe um den besten Fall herum. Dies geschieht durch Verschiebung der Mittelwerte der Designparameter auf den Wert den der jeweilige Parameter im besten Fall angenommen hat. Diesen iterativen Vorgang wiederholt man so lange, bis man die Ziele erreicht hat, bzw. bis man ihnen nahe genug gekommen ist. Die Methode kommt meist mit deutlich weniger Rechnungen aus als bei einer Exploration des Designraumes und ist deshalb eher für Modelle mit langen Rechenzeiten geeignet. Anders als die direkte Methode gibt sie jedoch nicht einen globalen Überblick über die möglichen Lösungen und weist unter Umständen eine Abhängigkeit der Ergebnisse vom Startpunkt auf. Sie ist damit eher für kleine Verbesserungsschritte geeignet. In der Praxis wird diese Methode häufig erfolgreich zur Reduzierung der Masse von Fahrzeugstrukturen angewandt. Hierbei werden die Blechdicken der Karosserieelemente variiert und meist mehrere Lastfälle aus dem Bereich Crash (Front, Seite) und dem Bereich Steifigkeit/NVH gleichzeitig betrachtet. Die multidisziplinäre Vorgehensweise wird durch das Programmpaket ST-ORM [3] ermöglicht und in Abschnitt 4 näher diskutiert.

3.5 Design Exploration

In der frühen Phase der Entwicklung eines innovativen Produktes sind weder Robustheit noch Optimalität die bestimmenden Zielgrößen. Vielmehr geht es darum die Grenzen eines neuen, nicht auf Erfahrung basierenden Systems zu finden. Die Design Exploration mittels der Monte-Carlo Methode bietet dafür die geeignete Plattform. Statt mit realen Streuungen zu arbeiten, werden die Parameter über den gesamten Designraum gleichverteilt. Der erfahrende Ingenieur gewinnt aus den Ergebnissen mit Hilfe der Methoden der multivariaten Datenanalyse Erkenntnisse, die in der herkömmlichen Produktentwicklung nur durch lange Testserien oder aus dem tatsächlichen Produkteinsatz zu gewinnen sind.

3.6 Zeitpunkt der Anwendung

Die bisher beschriebenen Anwendungen haben inzwischen einen festen Platz in der modernen Produktentwicklung. Um jedoch effektiv zu sein ist der Zeitpunkt ihrer Anwendung im Entwicklungsablauf entscheidend. Die industrielle Praxis mit der Software ST-ORM hat gezeigt, daß gerade die ressourcenintensiven Gesamtfahrzeuganwendungen auf bestimmte Zeitpunkte in der Entwicklung beschränkt bleiben. Sehr erfolgreich ist darüber hinaus der Einsatz der stochastischen Methoden bei Komponenten und Subsystemen. Abbildung 7 stellt die Anwendungen über dem Produktentwicklungsablauf dar.

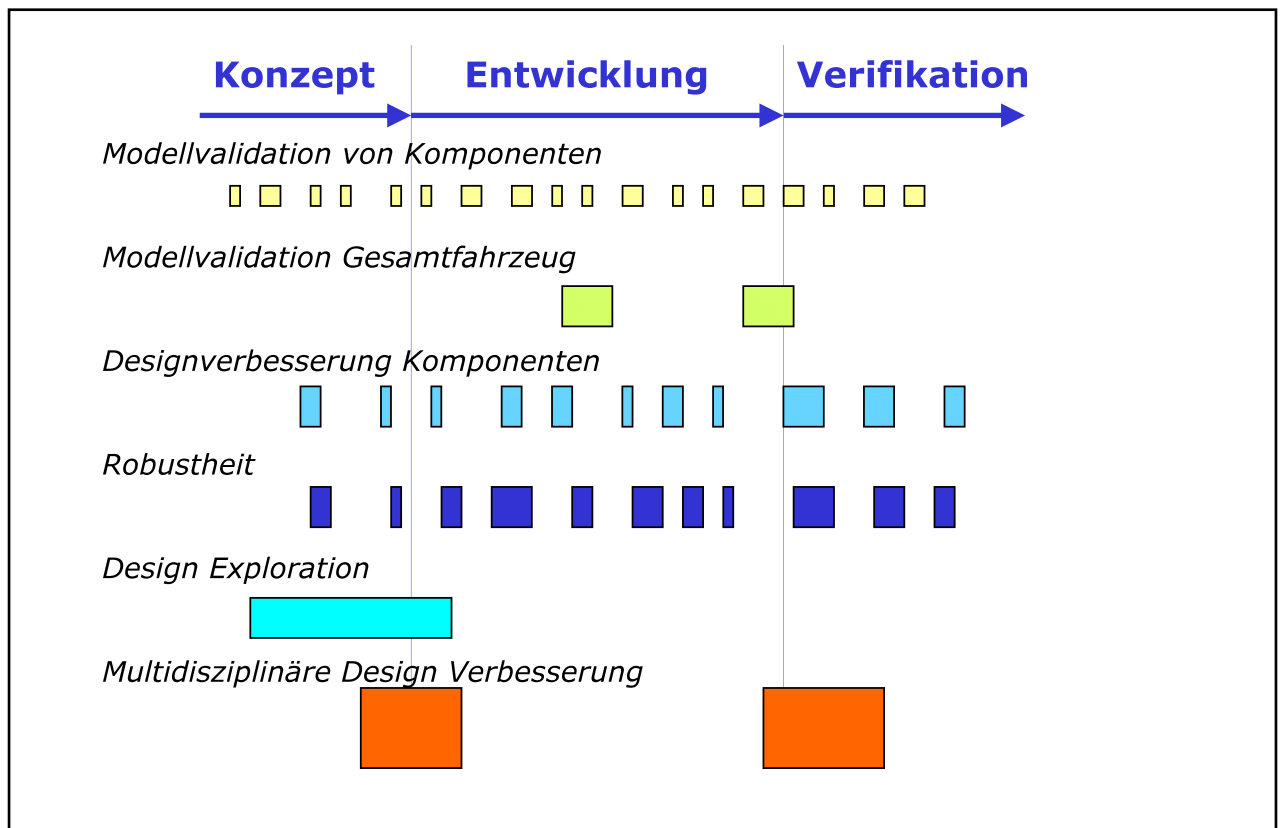


Abb. 7 Zeitlicher Einsatz von stochastischen Methoden in der Automobilentwicklung

4 Multidisziplinäre Designverbesserung

Automobile unterliegen zahlreichen Anforderungen, die heute in verschiedenen Disziplinen des CAE verifiziert und verbessert werden. So gefundene Designs werden anschließend konsolidiert. In dieser Phase müssen Kompromisse gefunden werden, die trotz aller Zielkonflikte in den Anforderungen ein akzeptables Systemverhalten gewährleisten.

Während die Kompromissfindung heute allein auf der Erfahrung des Ingenieurs basiert, bietet die multidisziplinäre Designverbesserung auf der Basis stochastischer Simulation einen strukturierten Lösungsansatz.

ST-ORM unterstützt die multidisziplinäre Designoptimierung mit einer innovativen Prozesssteuerung, die es ermöglicht den Designverbesserungsprozess für mehrere Anwendungen und/oder Lastfälle mittels eines graphischen Interfaces interaktiv aufzubauen. Hierbei werden sowohl der zeitliche Ablauf der Analysen, die Vorgaben des Datenaustausches zwischen den Solvern, Abbruchbedingungen als auch die Zuordnung der Solver auf bestimmte Rechnerressourcen definiert (Abb. 8).

5 Zukünftige Entwicklungen

Die stochastische Simulation ist in ihren verschiedenen Anwendungen heute fester Bestandteil moderner Produktentwicklungsabläufe. Hierbei zeigen sich jedoch unternehmensspezifisch unterschiedliche Integrationstiefen. Zukünftige Entwicklungen zielen auf die weitere Verknüpfung von Test und Simulation auf der Basis von stochastischen Simulationen bei einer weiteren Verbesserung der Benutzbarkeit der Software. Dazu gehört auch die schnelle graphische Zuordnung von Parameterverteilungen mittels solverspezifischer graphischer Preprozessoren. EASi hat hier mit VisualST-ORM ein Produkt entwickelt, welches für die Standardsolver wie LS-DYNA, PAM-CRASH und NASTRAN den Aufbau und die visuelle Verifikation stochastischer Simulationsmodelle in einer graphischen Umgebung ermöglicht. Diese Vorgehensweise beschleunigt die Arbeit signifikant.

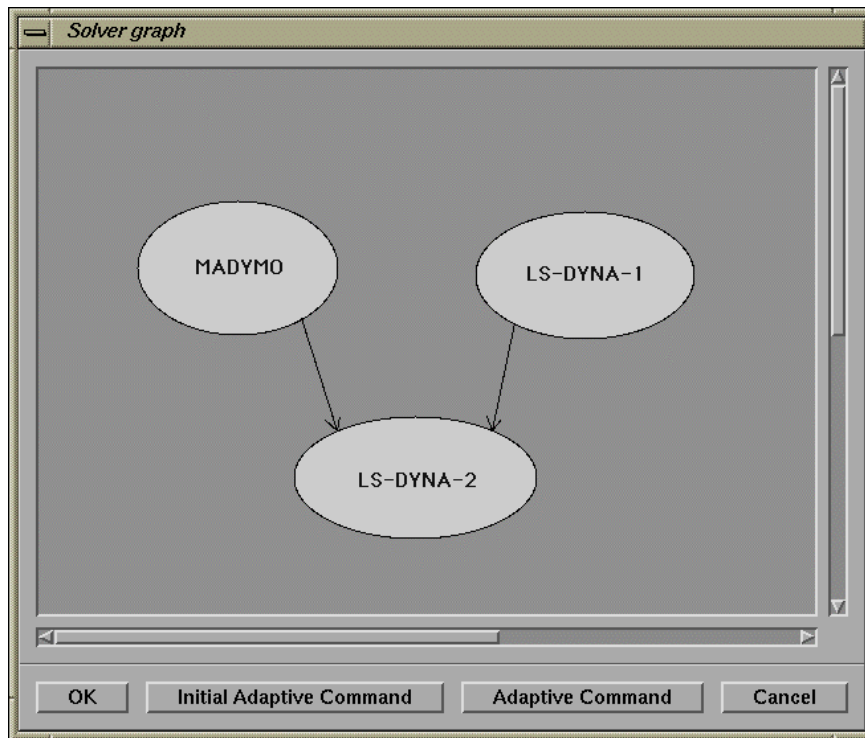


Abb. 8 Prozessfluss in einer multidisziplinären Designverbesserung

6 Referenzen

- /1/ Wunsch, M., Holzner, M.: „Stochastic Simulation in Approaching Current Product Development Challenges“, Proceedings of 3rd European Stochastic Forum 2002, EASi Engineering GmbH, Alzenau
- /2/ Marczyk, J.: *Principles of Simulation Based Computer-Aided Engineering*. FIM Publications, Barcelona 1999.
- /3/ ST-ORM Version 2.2, A Meta-Computing System for Stochastic Optimization and Robustness Management, EASi Engineering GmbH, 2002
- /4/ Doltsinis, I./Rau, F./Werner M.: *Analysis of random systems*. In: Doltsinis, I. (Hrsg.): *Stochastic Analysis of Multivariate Systems in Computational Mechanics and Engineering*. CIMNE, Barcelona 1999, S. 9-159.
- /5/ Reuter, R., Hoffmann, R., *Bewertung von Berechnungsergebnissen mittels Stochastischer Simulationsverfahren*, VDI Tagung Berechnung im Automobilbau, Würzburg 2000