

# Stochastische Simulation und Optimierung am Beispiel VW Phaeton

## Stochastic Simulation and Optimisation focused on the VW Phaeton

Dr.-Ing. T. Streilein, Dr.-Ing. J. Hillmann, Volkswagen AG, Wolfsburg

### Zusammenfassung

In der Realität streuen die Eigenschaften technischer Systeme. Stochastische Simulation ist ein Verfahren, das Streuungen bei der numerischen Analyse berücksichtigt. Im Mittelpunkt der nachfolgenden Ausführungen steht eine stochastische Simulation, die im Rahmen eines Pilotprojekts an der Rohkarosserie des VW Phaeton durchgeführt wurde.

Diese Simulation besteht aus zwei Teilen: einer rein stochastischen Untersuchung und einer stochastischen Optimierung. Hierbei wird der Einfluss streuender Materialstärken und streuender Versuchsrandbedingungen auf das Strukturverhalten bezüglich der Lastfälle Dynamik der Rohkarosserie und Frontalcrash untersucht. Aus dem Ergebnis dieser Untersuchung werden Rückschlüsse hinsichtlich der Robustheit und der Zuverlässigkeit der tragenden Struktur gegenüber den jeweiligen Anforderungen abgeleitet.

Die Untersuchung zeigt, dass eine stochastische Simulation zusätzliche, wichtige Erkenntnisse über das Systemverhalten liefert. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird eine modifizierte Rohbaustruktur abgeleitet, die robuster ist und hinsichtlich den Anforderungen bessere Ergebnisse aufweist.

### Summary

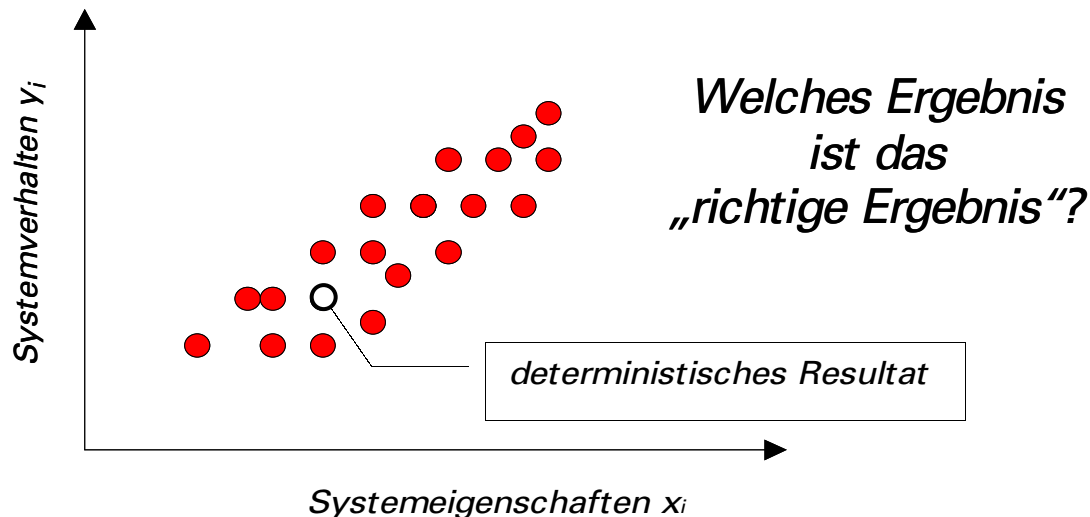
Under realistic conditions, almost all properties of technical systems are subject to scatter. Stochastic simulation is a numerical tool, which takes scatter into account.

This paper concentrates on a stochastic simulation, which was performed as a pilot project, based on the VW Phaeton body. The simulation consist of two parts: a stochastic investigation and a stochastic optimisation. The objective is to analyse the influence of scattering material thickness and scattering load case boundary conditions on the structural behaviour of the car body for dynamic and crash load conditions. Based on the results, conclusions on robustness and reliability of the car body structure in comparison to the corresponding requirements are drawn.

The investigation shows that a stochastic simulation provides additional, relevant information about the system behaviour. Based on this information, body structure modifications are defined, leading to a more robust structure and to better results.

## 1 Einleitung

Die Eigenschaften technischer Systeme streuen in der Realität. Daraus resultieren Streuungen im Systemverhalten, die bei der Beurteilung und bei der Auslegung tragender Strukturen zu beachten sind. Ein Verfahren, das die zuvor genannten Streuungen bei der numerischen Analyse technischer Systeme berücksichtigt, ist die stochastische Simulation.



**Bild 1:** Systemverhalten bei streuenden Systemeigenschaften

Typische Beispiele für streuende Systemeigenschaften sind:

- Blechdicken,
- Materialkennwerte,
- Geometrie von Bauteilen,
- Beanspruchung der Struktur
- Versuchsrandbedingungen.

Bei jedem realen Versuch streuen diese Eigenschaften in einem mehr oder weniger großen Bereich. Daraus folgt, dass  $n$  Versuche zu  $n$  verschiedenen Resultaten führen. Dies ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Wir sprechen immer von einem Verhalten oder von einem Ergebnis. Welches Ergebnis aus Bild 1 ist das „richtige Ergebnis“? Diese kurze Betrachtung zeigt, dass das *eine* deterministische Resultat, von dem wir häufig ausgehen, in der Realität nicht existiert. Es gibt vielmehr eine mehr oder weniger große Bandbreite, in der das Versuchsergebnis mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt.

Die Grundidee einer stochastischen Simulation besteht darin, dass nicht nur ein Rechenlauf sondern mehrere Rechenläufe unter Variation bestimmter Input-Variablen

durchgeführt werden. Daraus resultiert eine statistische Beschreibung des Problems, die gegenüber der deterministischen Beschreibung zusätzliche wichtige Informationen zum Systemverhalten liefert. Zu diesen Zusatzinformationen gehören:

- Mittelwert: Aussagen über die Lage der Resultate

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i , \tag{1}$$

- Standardabweichung: Aussagen über die Streuung der Resultate

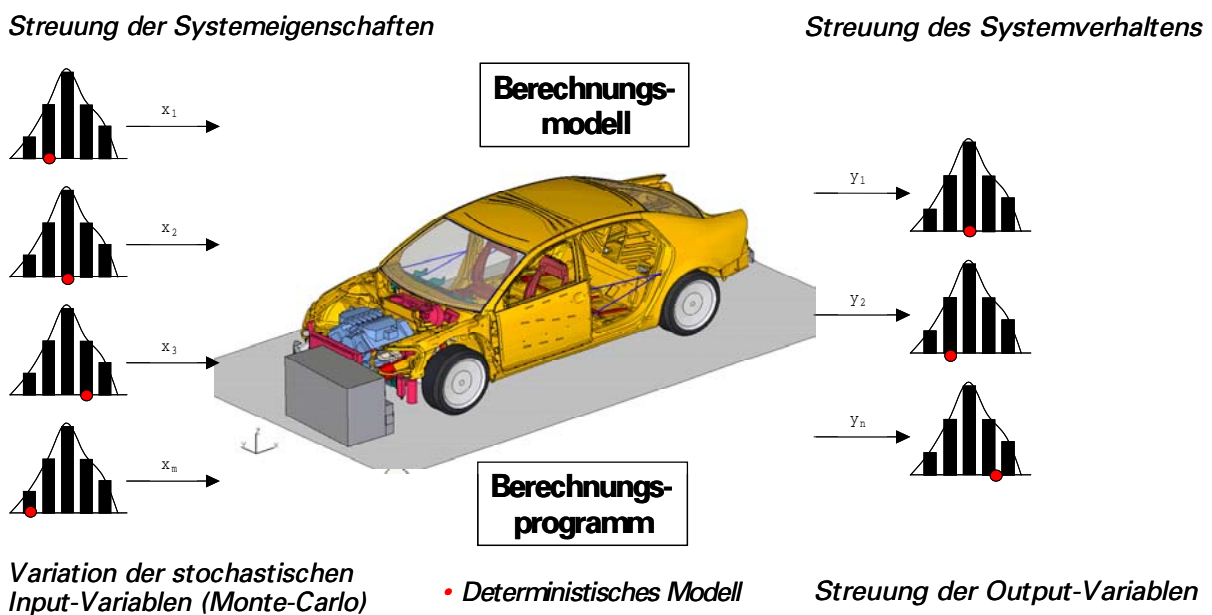
$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} , \tag{2}$$

- Korrelationsaussagen: Abhängigkeit der Input- von den Outputvariablen.

Demgegenüber liefert eine deterministische Beschreibung nur ein Ergebnis - den Nominalfall, der nicht mit dem Mittelwert übereinstimmen muss. Somit erlaubt eine stochastische Simulation die Bewertung der Robustheit und die Bewertung der Zuverlässigkeit einer Struktur. Dies führt letztendlich zu einer umfassenderen und realistischeren Bewertung des zu untersuchenden Systems.

## 2 Ablaufschema

Der grundsätzliche Ablauf einer stochastischen Simulation ist in Bild 2 dargestellt. Weitere Informationen zu diesem Thema sind bei MARCZYK [1] und bei REUTER/HOFFMANN [2] zu finden.



**Bild 2:** Ablaufschema einer stochastischen Simulation

Ausgangspunkt einer stochastischen Simulation ist das deterministische Berechnungsmodell - im folgenden auch Ausgangsmodell genannt - für das alle Input-Variablen gemäß den Vorgaben eingestellt sind. Daraus folgt das Nominalergebnis. Nun erfolgt die Definition der stochastischen Input-Variablen  $x_i$  (z.B. Blechdicken, Materialeigenschaften, etc.) und die Definition der stochastischen Output-Variablen  $y_i$  (z.B. Strukturmasse, Eigenfrequenzen, Intrusionen, etc.). Für die Qualität der stochastischen Simulation ist die Auswahl der Input-Variablen von entscheidender Bedeutung. Hier liegt auch ein Hauptproblem der stochastischen Simulation, weil einige wesentliche Parameter, wie z.B. die Streuungen im Fertigungsprozess, in einer numerischen Analyse bisher nur schwer zu erfassen sind.

Im nächsten Schritt werden  $n=50$  bis  $n=100$  Kopien des Ausgangsmodells generiert. Dieser Schritt erfolgt unter Anwendung des Monte-Carlo-Verfahrens, wobei die Input-Variablen unter Berücksichtigung einer bestimmten Verteilungsfunktion im Input-Deck variiert werden. Das Ausgangsmodell und die  $n=50$  bis  $n=100$  Kopien werden nun rechnerisch analysiert. Schließlich werden die  $n+1$  Resultate statistisch ausgewertet. Hierbei interessiert insbesondere die berechnete Streubreite der Output-Variablen im Vergleich zur vorgegebenen Streubreite der Input-Variablen.

Der gesamte Ablauf einer stochastischen Simulation lässt sich mit Hilfe eines geeigneten Softwareprogramms automatisieren. Im Rahmen dieses Projektes wurde das Programm ST-ORM (siehe [3]) verwendet.

### 3 Anwendungsfelder

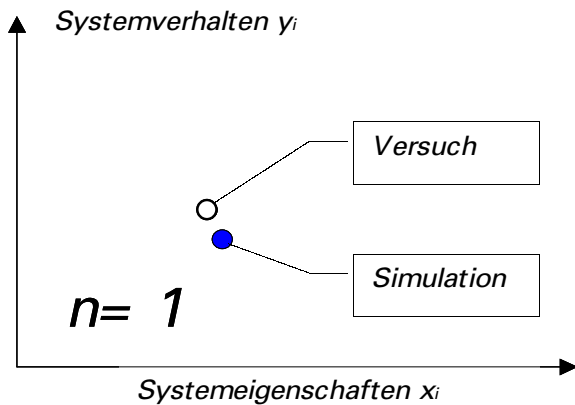
Im folgenden werden die wesentlichen Anwendungsfelder der stochastischen Simulation kurz erläutert. Detailliertere Angaben hierzu findet man bei MARCZYK [1] und bei REUTER/HOFFMANN [2].

#### 3.1 Validierung

Zunächst wird ein rein hypothetischer Abgleich zwischen einem Versuch und einer Simulation betrachtet (Bild 3a). Dieser übliche 1:1-Abgleich zeigt eine gute Übereinstimmung. Nun werden weitere Versuche und weitere Simulationen unter Berücksichtigung streuender Input-Variablen durchgeführt. Hierbei können zwei unterschiedliche Fälle auftreten:

- Fall A: Der Zusammenhang zwischen den Systemeigenschaften  $x_i$  und dem Systemverhalten  $y_i$  wird vom Berechnungsmodell *richtig* wiedergegeben (Bild 3b).
- Fall B: Der Zusammenhang zwischen den Systemeigenschaften  $x_i$  und dem Systemverhalten  $y_i$  wird vom Berechnungsmodell *falsch* wiedergegeben (Bild 3c).

In beiden Fällen sind der erste Versuch und die erste Simulation aus Bild 3a enthalten. Diese einfache Betrachtung zeigt, dass der übliche 1:1-Abgleich zwischen einem Versuch und einer Simulation den Anforderungen einer seriösen Validierung nicht genügt. Hierzu ist eine Stichprobe mit  $n > 1$  erforderlich.

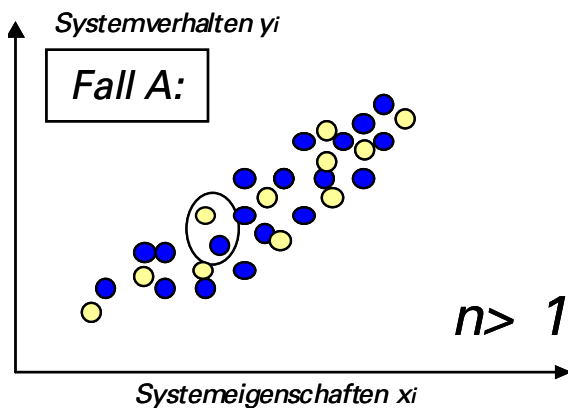


3a: Deterministische Simulation

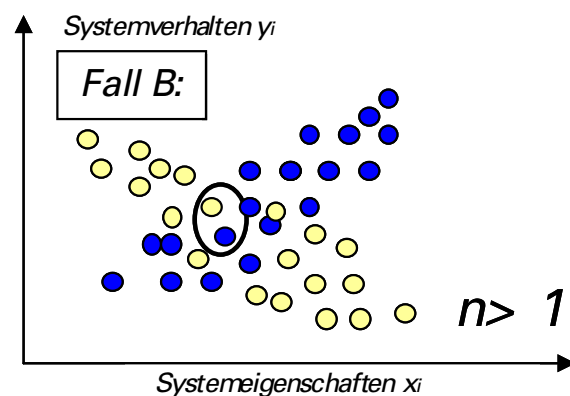
3b: Stochastische Simulation, Fall A

3c: Stochastische Simulation, Fall B

**Bild 3a**



**Bild 3b**



**Bild 3c**

### 3.2 Robustheit

Bei der Robustheitsuntersuchung stellt man folgende Frage: Wie empfindlich reagiert die Struktur auf eine kleine Streuung der Systemeigenschaften? Dazu wird der Variationskoeffizient der Input-Variablen  $CV_{\text{Input}}$  mit dem Variationskoeffizient der Outputvariablen  $CV_{\text{Output}}$  verglichen. Der Variationskoeffizient

$$CV = \frac{s}{x_m} = \frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}} \quad (3)$$

ist eine bezogene Streuung, die aus dem Verhältnis zwischen Standardabweichung zu Mittelwert ermittelt wird. Daraus folgen bezüglich der Robustheit zwei Fälle:

**Fall A:** Der Variationskoeffizient der Input-Variablen ist kleiner gleich dem Variationskoeffizienten der Output-Variablen.

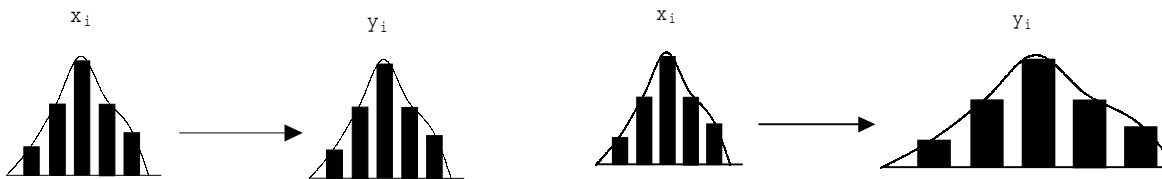
$$CV_{Output} \leq CV_{Input} \quad (4)$$

D.h., das System dämpft die Streuung der Systemeigenschaften. Das System reagiert *robust* (Bild 4a).

**Fall B:** Der Variationskoeffizient der Input-Variablen ist größer als der Variationskoeffizient der Output-Variablen.

$$CV_{Output} > CV_{Input} \quad (5)$$

D.h., das System verstärkt die Streuung der Systemeigenschaften. Das System reagiert *nicht robust* bzw. *empfindlich* (Bild 4b).



**Bild 4a:** System reagiert robust

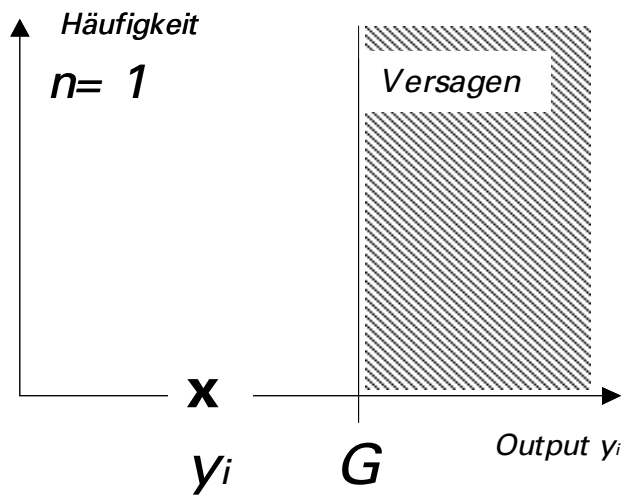
**Bild 4b:** System reagiert empfindlich

### 3.3 Zuverlässigkeit

Bei der Zuverlässigkeitsanalyse untersucht man die Sicherheit eines Systems gegen ein mögliches Versagen. Diese Sicherheit ist definiert als der Abstand zwischen einer bestimmten Output-Variablen und dem dazugehörigen Versagens-Grenzwert. Ein System gilt als zuverlässig, wenn dieser Abstand genügend groß ist.

Bei einer deterministischen Betrachtung führt man nur eine Simulation durch. In Bild 5a ist hierzu ein hypothetischer Fall dargestellt. Nach der o.g. Definition ist das System scheinbar zuverlässig. Es werden weitere Simulationen durchgeführt. Zwei unterschiedliche Fälle können nun auftreten:

- Fall A: Alle Output-Variablen liegen unterhalb der Versagensgrenze. Das System ist tatsächlich zuverlässig (Bild 5b).
- Fall B: Eine große Anzahl von Output-Variablen liegen oberhalb der Versagensgrenze. Das System ist nicht zuverlässig (Bild 5c).

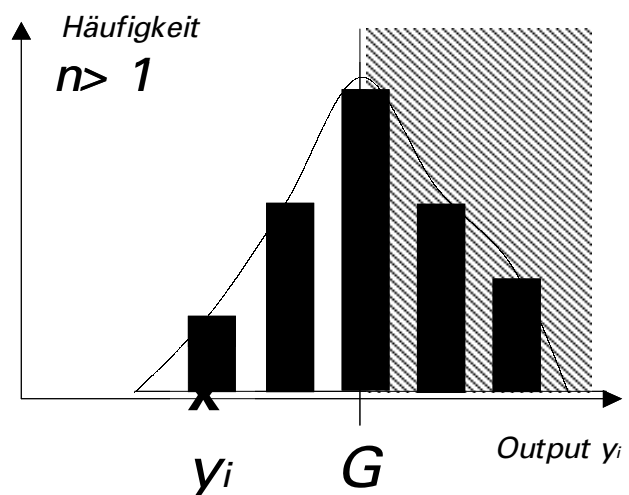
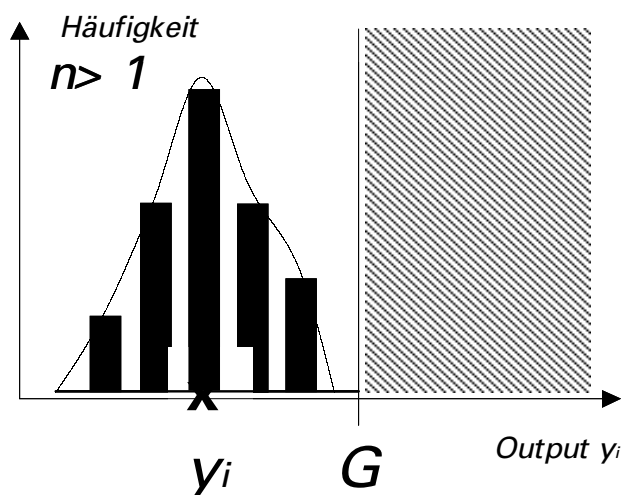


3a: Deterministische Simulation

3b: Stochastische Simulation, Fall A

3c: Stochastische Simulation, Fall B

**Bild 5a:** System ist scheinbar sicher



**Bild 5b:** System ist zuverlässig

**Bild 5c:** System kann versagen

In beiden Fällen ist das Resultat der ersten Simulation aus Bild 5a enthalten. Daraus folgt, dass eine Beurteilung der Zuverlässigkeit nur dann möglich ist, wenn eine statistische Ergebnisbeschreibung vorliegt.

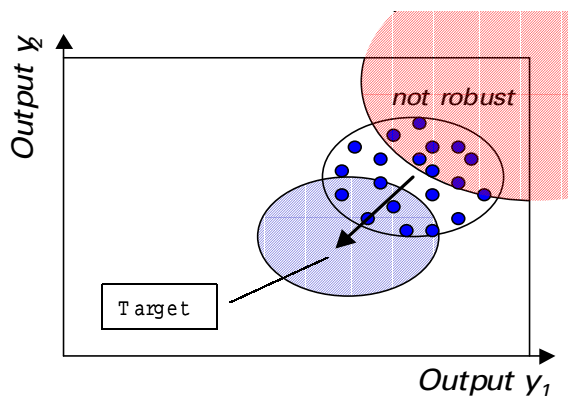
### 3.4 Optimierung

Im Gegensatz zu den deterministischen Optimierungsverfahren (Gradientenverfahren, BFGS-Verfahren), die zielgerichtet bei der Suche nach dem Minimum der Zielfunktion  $F$  vorgehen, arbeiten stochastische Verfahren (Monte-Carlo-Verfahren, Evolutionsstrategie) nach dem Zufallsprinzip. Derartige Verfahren verlieren aufgrund ihrer zufallsgesteuerten Vorgehensweise deutlich an Konvergenzgeschwindigkeit, sobald eine Minimumlage gefunden wird. Sie verfügen jedoch über gute globale Sucheigenschaften und über einen numerisch stabilen Algorithmus, der auch Opti-

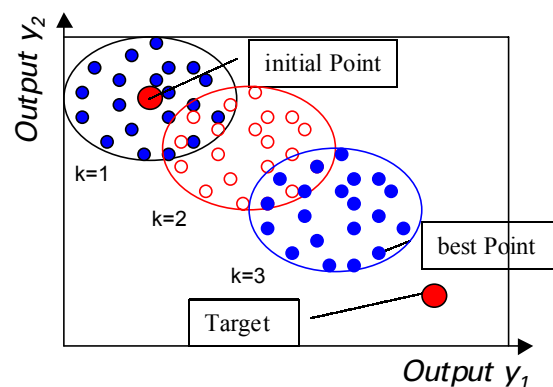
mierungsläufe im Zusammenhang mit Crashanalysen zulässt. Dabei wird nicht das mathematische Optimum gesucht, sondern eine Struktur, die in der Praxis ausreichend robust und zuverlässig ist. Ziel ist es, das Systemverhalten vom nicht robusten in den robusten Bereich zu verschieben (Bild 6a).

Der schematische Ablauf einer stochastischen Optimierung ist in Bild 6b dargestellt. Hierbei sind folgende Schritte zu durchlaufen:

1. Definition der Optimierungsaufgabe:
  - Designvariablen  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$
  - Restriktionen  $x_i^u < x_i < x_i^o$
  - Zielfunktion  $F(x_1, x_2, \dots, x_n) \Rightarrow \text{Min.}$
2. Bestimmung des Zielfunktionswerts für den Ausgangszustand  $x_0$  (Initial Point).
3. Erzeugung und Bewertung von  $n$  neuen Parametersätzen  $\mathbf{x}$  mit dem Monte-Carlo-Verfahren, indem der Ausgangsparametersatz  $x_0$  unter Beachtung einer bestimmten Verteilungsfunktion (z.B. Gleichverteilung) variiert wird.
4. Der Parametersatz mit dem kleinsten Zielfunktionswert wird als Ausgangsparametersatz für den nächsten Iterationsschritt gewählt.
5. Dieser Iterationsprozess (Schritte 2 bis 4) wird solange fortgesetzt, bis ein vorgegebener Abstand zum Zielwert (Target Point) unterschritten ist. Der Parametersatz  $x_{\min}$  (Best Point) mit dem geringsten Abstand zum Zielpunkt ist schließlich das Resultat der Optimierung.



**Bild 6a:** Ziel der Optimierung



**Bild 6b:** Ablauf der Optimierung

Ein Vergleich zwischen deterministischen und stochastischen Optimierungsverfahren sowie eine Kombination beider Vorgehensweisen ist in [4] angegeben.

### 3 Anwendungsbeispiel

Nachfolgend wird eine stochastische Simulation vorgestellt, die im Rahmen eines Pilotprojekts bei Volkswagen durchgeführt wurde. Sie besteht aus zwei Teilen: einer stochastischen Untersuchung und einer stochastischen Optimierung. Dabei wurde ein Vorserienstand des VW Phaeton mit dem Ziel untersucht, die Rohkarosserie bis zur Serienreife bezüglich der Robustheit und Struktureigenschaften zu verbessern.

#### 3.1 Ziel und Definition der stochastischen Untersuchung

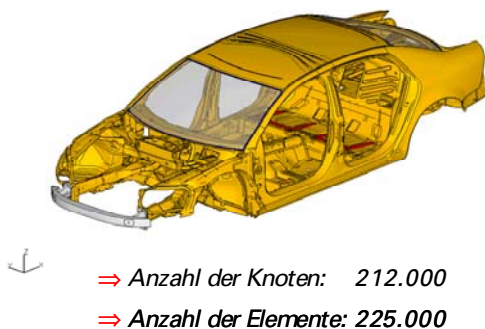
Folgende Fragen sollen durch die stochastische Untersuchung beantwortet werden:

- Beurteilung der Robustheit:  
⇒ Wie empfindlich reagiert die Struktur auf eine Streuung der Systemvariablen?
- Beurteilung der Zuverlässigkeit:  
⇒ Wird eine vorgegebene Steifigkeit gemäss Lastenheft erreicht?  
⇒ Wird eine vorgegebene Fußraumintrusion im LF Frontalcrash eingehalten?
- Verbesserung der Ausgangsstruktur:  
⇒ Reduktion der Streuung des Systemverhaltens,  
⇒ Erhöhung der dynamischen Steifigkeit ,  
⇒ Reduktion der Fußraumintrusion bei einem Frontalcrash.

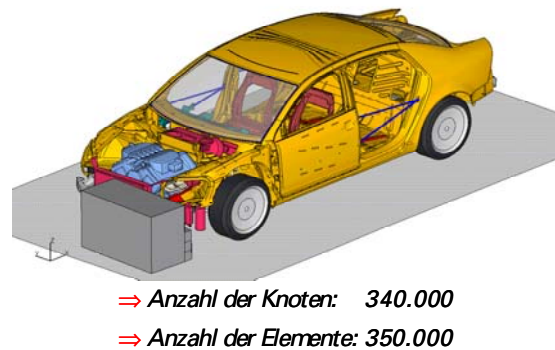
Für die stochastische Untersuchung werden insgesamt  $n=72$  Rechenläufe parallel auf 8 CPUs (NEC SX4) durchgeführt. Um numerische Streuungen vollständig auszuschalten, läuft eine Rechnung immer nur auf einem Prozessor. Es werden jeweils zwei Lastfälle je Rechenlauf analysiert:

- LF 1: Modalanalyse der Rohkarosserie (Body in White) mit MSC-NASTRAN,
- LF 2: Frontalcrash (Worst-Case-Motor, ODB,  $v=64$  km/h) mit PAMCRASH.

Die FE-Modelle für die einzelnen Lastfälle sind in Bild 7 dargestellt.



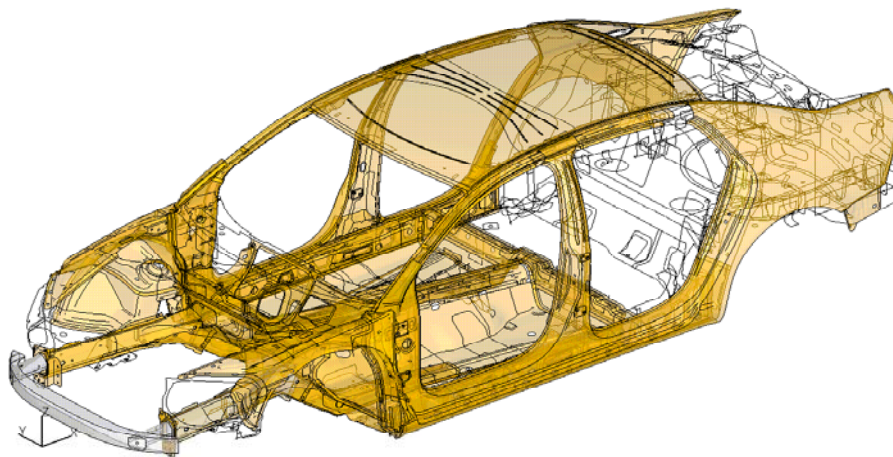
**Bild 7a:** Modell für Modalanalyse



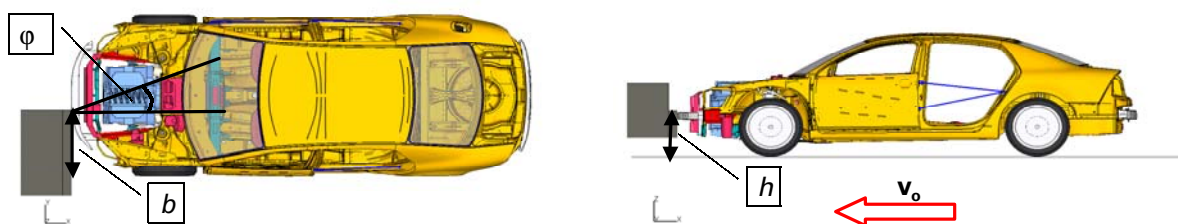
**Bild 7b:** Modell für Crashanalyse

Die im Rahmen des Pilotprojektes gewählten stochastischen Input-Variablen können in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- Streuung der Systemeigenschaften:
  - ⇒ Variation der Blechdicke von insgesamt 60 Bauteilen in den Bereichen Vorderwagen und Oberbau:  $t_{\text{new}} = t_{\text{ini}} \pm 0.05 \text{ mm}$
- Streuung der Versuchsrandbedingungen:
  - ⇒ Variation der Auffahrgeschwindigkeit:  $v_{\text{new}} = v_{\text{ini}} \pm 1 \text{ km/h}$
  - ⇒ Variation des Aufprallwinkels:  $\varphi_{\text{new}} = \varphi_{\text{ini}} \pm 5 \text{ Grad}$
  - ⇒ Variation der Überdeckungsbreite:  $b_{\text{new}} = b_{\text{ini}} \pm 25 \text{ mm}$
  - ⇒ Variation der Überdeckungshöhe:  $h_{\text{new}} = h_{\text{ini}} \pm 25 \text{ mm}$



**Bild 8:** Streuung der Systemeigenschaften

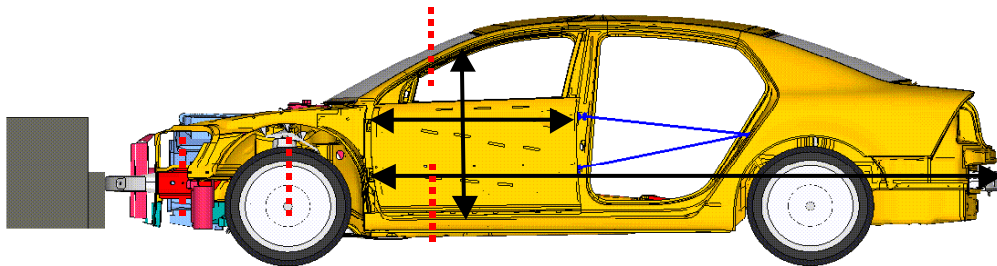


**Bild 9:** Streuung der Versuchsrandbedingungen

Alle stochastischen Input-Variablen werden nach dem Monte-Carlo-Verfahren unter Berücksichtigung einer Normalverteilung nach Gauß gestreut. Die ausgewählten Bleche sind in Bild 8 farblich hervorgehoben. Die Streuung der Versuchsrandbedingungen geht aus Bild 9 hervor. Sie haben nur Einfluss auf den LF Frontalcrash.

Die stochastischen Output-Variablen beider Lastfälle sind nachfolgend angegeben:

- Output-Variablen für LF Modalanalyse  
⇒ Eigenfrequenzen der Rohkarosserie (Body in White)  $f_1, f_2, f_3, f_4$
- Output-Variablen für LF Frontalcrash (Bild 10)  
⇒ Schnittkräfte, Beschleunigungen, Fußraumintrusion  
⇒ Rückverlagerung der Säule-A, relative Verformungen im Bereich Tür vorn



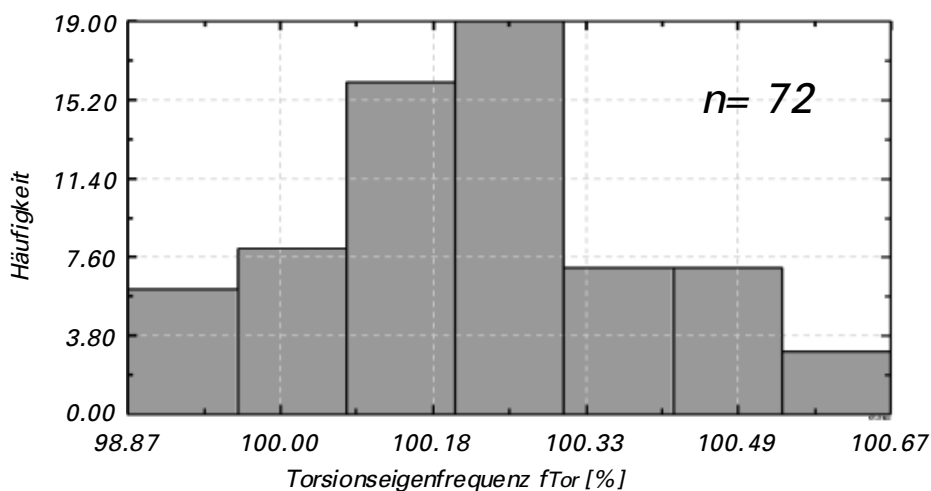
**Bild 10:** Output-Variablen für den LF Frontalcrash

### 3.2 Ergebnis der stochastischen Untersuchung

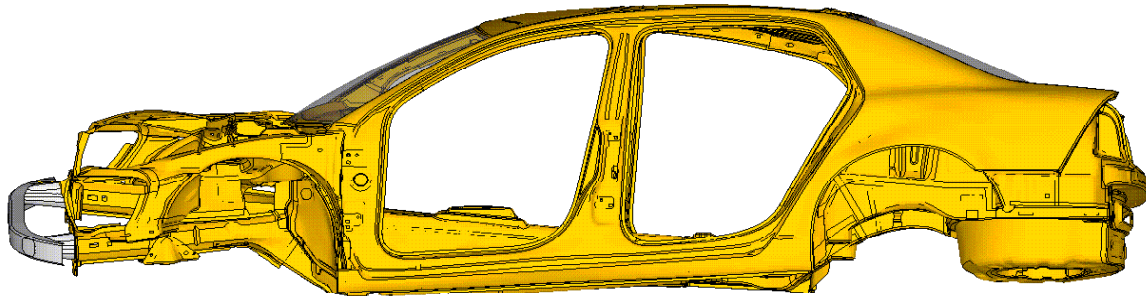
Für die grundsätzlichen Aussagen im Rahmen dieser Untersuchung sind relative Resultate vorteilhaft, weil damit eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Eigenschaften leichter möglich ist. Daher werden nachfolgend ausschließlich relative Ergebnisse genannt, die jeweils auf einen Zielwert von 100% bezogen sind. Es wird zunächst das Ergebnis der Modalanalyse vorgestellt. In Tabelle 1 ist die statistische Auswertung exemplarisch für die erste globale Torsionseigenfrequenz  $f_{\text{Tor}}$  (Bild 12) angegeben. Der Zielwert für diese Eigenfrequenz ist auf einen Wert von

$$f_{\text{Z,Tor}} = 100\%$$

normiert. Die Streuung von  $f_{\text{Tor}}$  geht aus Bild 11 hervor.



**Bild 11:** Streuung der Eigenfrequenz  $f_{\text{Tor}}$  (Simulation Vorserienstand)



**Bild 12:** Erste Torsionseigenform (Simulation Vorserienstand)

Anzahl der Rechenläufe n	72
Nominalwert $x_n$	100.24 %
Mittelwert $x_m$	100.22 %
Unterer Grenzwert $x_u$	98.87 %
Oberer Grenzwert $x_o$	100.67 %
max. Streubreite $\Delta x = x_o - x_u$	1.80 %
Standardabweichung s	0.18 %
Variationskoeffizient $CV = s / x_m$	0.18 %

**Tabelle 1:** statistische Auswertung der Eigenfrequenz  $f_{\text{Tor}}$  (Simulation Vorserie)

Der Mittelwert  $x_m$  liegt bei 100.22%. Das ist nur eine geringe Abweichung zum Nominalwert  $x_n$ , der bei 100.24% liegt. Die maximale Streubreite  $\Delta x$  zwischen dem oberen Grenzwert  $x_o$  und unteren Grenzwert  $x_u$  beträgt nur 1.80%. Dies ist ein akzeptabler Wert. Demnach wird der Zielwert bei geringer Streubreite knapp erreicht. Aus der Standardabweichung und dem Mittelwert resultiert eine bezogene Streuung von

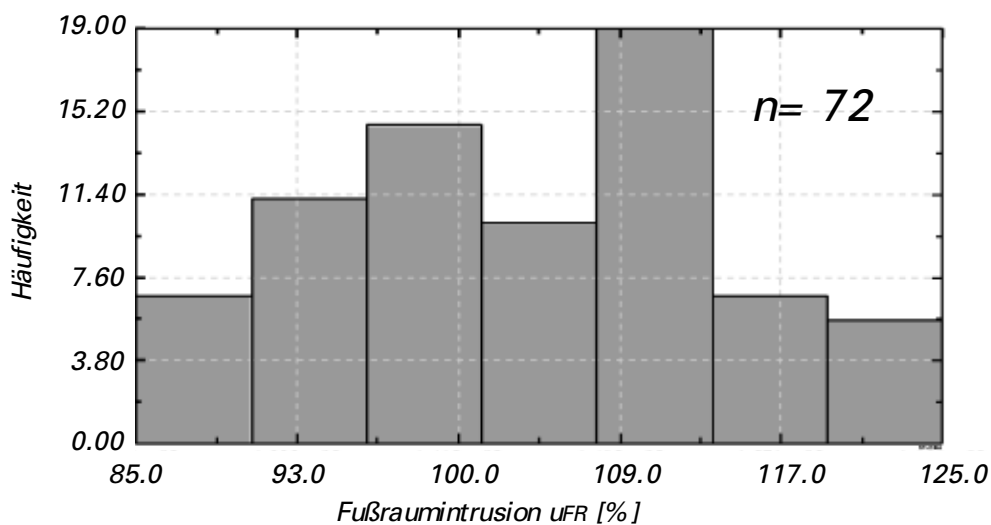
$$CV_{f_{\text{Tor}}} = 0.18\% < CV_{\text{input}} \cong 2\%,$$

die deutlich kleiner ist als der mittlere Variationskoeffizient der Input-Variablen. Daraus folgt: die Struktur ist für die erste Torsionseigenfrequenz robust. Diese Aussage gilt auch für die Eigenfrequenzen, die hier nicht näher dargestellt sind.

Für die Crashanalyse erhält man ein anderes Bild. In Tabelle 2 ist die statistische Auswertung exemplarisch für die Fußraumintrusion  $u_{FR}$  angegeben, die beim Frontalcrash für die Strukturauslegung im Bereich Boden vorn maßgebend ist. Der Zielwert für die Fußraumintrusion ist auf einen Wert von

$$u_{Z,FR} = 100\%$$

normiert. Die Streuung der Fußraumintrusion  $u_{FR}$  geht aus Bild 13 hervor. Es werden jeweils die statischen Intrusionswerte betrachtet, d.h. der elastische Rückverformungsanteil ist nicht enthalten.



**Bild 13:** Streuung der Fußraumintrusion  $u_{FR}$  (Simulation Vorserienstand)

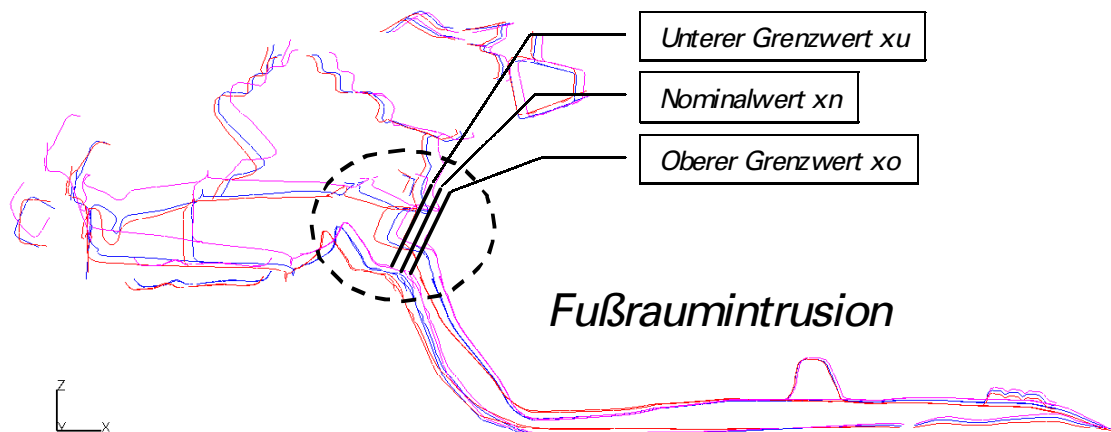
Anzahl der Rechenläufe n	72
Nominalwert $x_n$	105.30 %
Mittelwert $x_m$	104.30 %
Unterer Grenzwert $x_u$	85.10 %
Oberer Grenzwert $x_o$	125.10 %
max. Streubreite $\Delta x = x_o - x_u$	40.00 %
Standardabweichung s	11.90 %
Variationskoeffizient $CV = s / x_m$	11.41%

**Tabelle 2:** statistische Auswertung der Fußraumintrusion  $u_{FR}$  (Simulation Vorserie)

Der Mittelwert  $x_m$  liegt bei 104.30%. Das ist nur eine geringe Abweichung zum Nominalwert  $x_n$ , der bei 105.30% liegt. Die maximale Streubreite  $\Delta x$  zwischen dem oberen Grenzwert  $x_o$  und unteren Grenzwert  $x_u$  beträgt 40.0%. Das ist ein deutlich höherer Wert als bei der Modalanalyse. Demnach wird der Zielwert bei hoher Streubreite leicht überschritten. Aus der Standardabweichung und dem Mittelwert resultiert eine bezogene Streuung von

$$CV_{u,FR} = 11.41\% > CV_{input} \cong 2\%,$$

die deutlich größer ist als der mittlere Variationskoeffizient der Input-Variablen. Daraus folgt: die Struktur des Vorserienstands reagiert bezüglich der Fußraumintrusion im Frontalcrash empfindlich. Im Gegensatz zur Modalanalyse ist die Streuung bei der Crashanalyse nicht akzeptabel. Dies geht aus Bild 14 hervor.



**Bild 14:** y-Schnitt, maximale Streuung der Fußraumintrusion (Simulation Vorserie)

Das im Rahmen der stochastischen Simulation erzielte Ergebnis wird durch den Versuch bestätigt. In Tabelle 3 sind die bezogenen Streuungen CV aus Versuch und Simulation gegenübergestellt. Hierbei zeigt sich tendenziell eine gute Übereinstimmung. Die höheren Streuungen im Crashversuch sind dadurch begründet, dass in einem frühen Entwicklungsstadium häufig Versagensmechanismen auftreten, die in der Simulation nicht berücksichtigt sind. Hinzu kommt, dass in einer Simulation nicht alle streuenden Parameter integrierbar sind.

	Versuch n=4	Simulation n=72
LF 1: Torsionseigenfrequenz f	0.35 %	0.18 %
LF 2: Fußraumintrusion u	18.64 %	11.41 %

**Tabelle 3:** Vergleich der bezogenen Streuung CV (Vorserie)

Für die untersuchten Lastfälle resultieren daraus die Schlussfolgerungen:

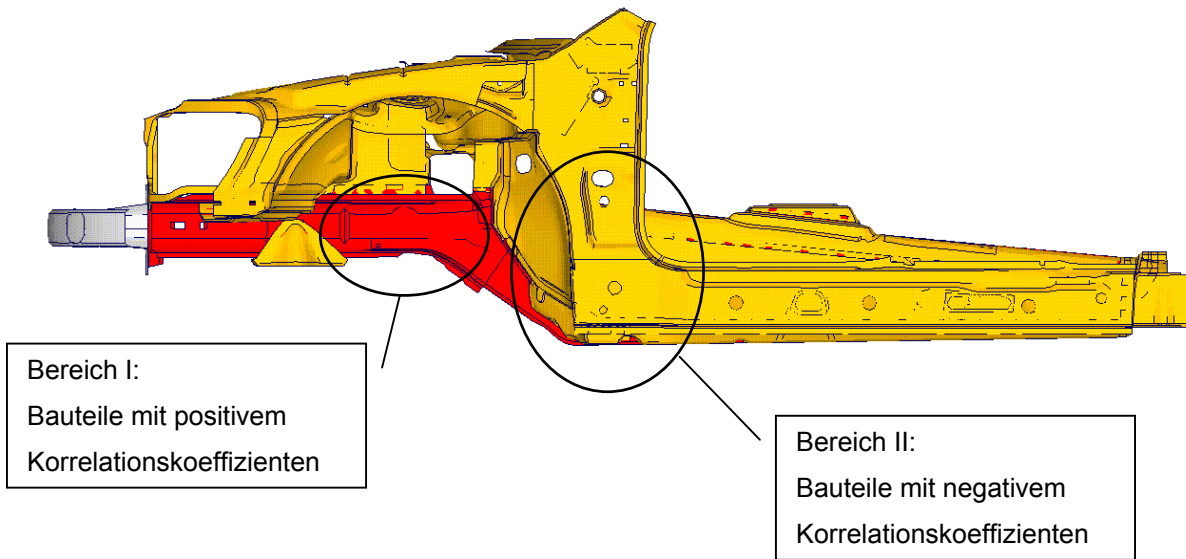
- Modalanalyse:
  - ⇒ Robustes Verhalten der Struktur,
  - ⇒ Zuverlässigkeit hinsichtlich dem Erreichen eines gewählten Zielwerts ist hoch,
  - ⇒ Sicherheitsabstand gegen den Zielwert kann möglichst klein sein,
  - ⇒ Validierung: 1:1 Abgleich zwischen Simulation und Versuch ist sinnvoll.
- Frontalcrash:
  - ⇒ Empfindliches Verhalten der Struktur,
  - ⇒ Zuverlässigkeit hinsichtlich dem Erreichen eines gewählten Ziels ist gering,
  - ⇒ Sicherheitsabstand gegen den Zielwert sollte möglichst groß sein,
  - ⇒ Validierung: 1:1 Abgleich zwischen Simulation und Versuch ist nur eingeschränkt möglich.

### 3.3 Verbesserung der Ausgangsstruktur

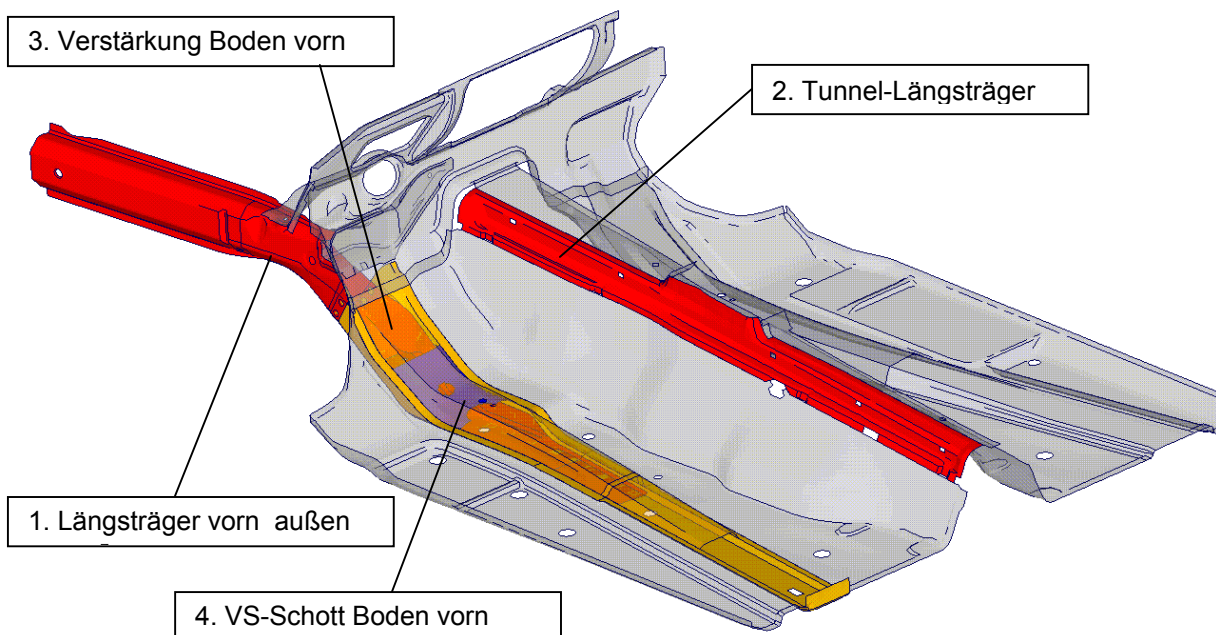
Die in Abschnitt 3.2 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Struktur hinsichtlich den dynamischen Anforderungen robust und ausreichend bemessen ist. Demgegenüber sind die Streuungen für den LF Frontalcrash zu hoch. Zudem wird der vorgegebene Zielwert für die Fußraumintrusion noch nicht erreicht.

Anhaltspunkte für die Ursache dieser hohen Streuung liefert eine Korrelationsanalyse, die aus der stochastischen Simulation folgt. Aus der Korrelationsmatrix lässt sich - analog zu einer Sensitivitätsanalyse - die Abhängigkeit der Output-Variablen von den Input-Variablen ableiten. In Bild 15 sind die Bauteil-Bereiche mit den höchsten linearen Korrelations-Koeffizienten bezüglich der Fußraumintrusion dargestellt. Hierbei fällt auf, dass die Bauteile vor der Stirnwand eine positive Korrelation, die Bauteile hinter der Stirnwand eine negative Korrelation aufweisen. Das heißt, man erhält einen positiven Einfluss auf die Fußraumintrusion, wenn die Materialstärken der Bauteile vor der Stirnwand heruntersetzt, und die Materialstärken der Bauteile hinter der Stirnwand heraufgesetzt werden.

Dies deutet auf ein Abstimmungsproblem zwischen der Festigkeit des Längsträgers und der Festigkeit des Stirwandbereiches hin. Durch eine leichte Streuung der Blechdicken können demnach ungünstige Festigkeitsverhältnisse entstehen, die zu den starken Streuungen in der Fußraumintrusion führen.



**Bild 15:** Bauteil-Bereiche mit hohem Einfluss auf die Fußraumintrusion

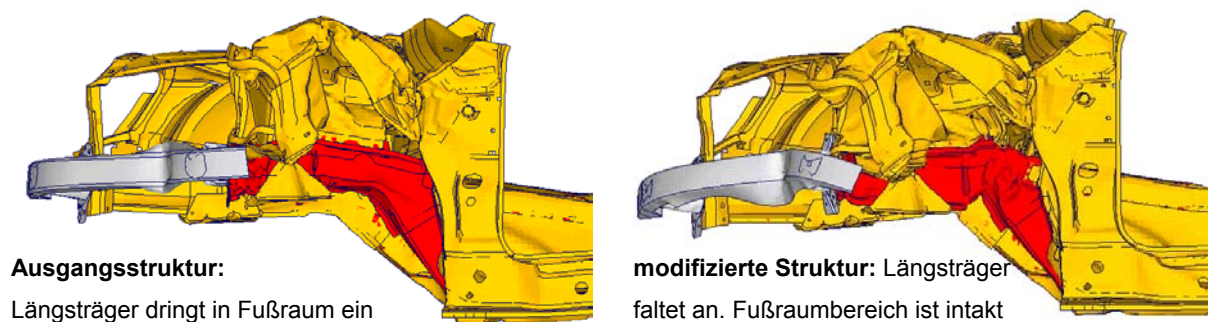


**Bild 16:** Maßnahmenpaket für den Frontalcrash

Um einerseits die Streuung der Fußraumintrusion deutlich zu reduzieren und andererseits den gesetzten Zielwert zu erreichen, werden folgende Maßnahmen vorgesehen (Bild 16):

1. Längsträger vorn außen:  
Reduktion der Materialstärke von  $t=2.0\text{mm}$  auf  $t=1.5\text{mm}$ ,
2. Tunnel-Längsträger:  
Erhöhung der Materialstärke von  $t=1.5\text{mm}$  auf  $t=2.0\text{mm}$ ,
3. Verstärkung Boden vorn: Einsatz höchstfester Bleche  
Verbesserung der Materialgüte von ZStE220 auf CPW800,
4. Zusätzliches Verstärkungsschott im Bereich Boden vorn.

Diese Maßnahmen, die nahezu Gewichtsneutral sind, führen insgesamt zu einer deutlichen Reduktion der Fußraumintrusion. Dies zeigt ein Vergleich zwischen dem Nominalwert der Ausgangsstruktur mit  $u_{FR} = 105 \%$  und dem Nominalwert der modifizierten Variante mit  $u_{FR} = 81 \%$  (s. Bild 17). Diverse Crashversuche für den Serienstand haben die Wirksamkeit dieser Maßnahmen bestätigt. Die hohen Streuungen, die im Vorserienstand festgestellt wurden, konnten deutlich reduziert werden (Tabelle 4). Somit wurde der VW Phaeton hinsichtlich der Stabilität und der Robustheit im Frontalcrash verbessert.



**Bild 17:** Verhalten im Frontalcrash, Bereich Längsträger/Stirnwand (Simulation)

	Anzahl Versuche n	Bezogene Streuung CV
Vorserienstand	4	18.64 %
Serienstand	4	13.90 %

**Tabelle 4:** Vergleich der Streuung für die Fußraumintrusion  $u_{FR}$  (Versuch)

### 3.4 Stochastische Optimierung

Ein Vorteil der stochastischen Optimierung gegenüber den analytischen Optimierungsverfahren ist ihre numerische Stabilität. Daher kann sie ohne Probleme im Zusammenhang mit Crashanalysen angewendet werden. Das Ziel dieser Optimierung ist eine Minimierung der Strukturmasse ohne Verschlechterung der dynamischen Eigenschaften und der Crasheigenschaften. Des Weiteren soll überprüft werden, wie effizient eine stochastische Optimierung bei der momentanen Leistungsfähigkeit der Hardware ist.

Die Optimierungsaufgabe ist wie folgt definiert:

- Ausgangszustand:
  - ⇒ Masse des Berechnungsmodells:  $m_0 = 100\%$ ,  
(Body in White)
  - ⇒ kleinste globale Eigenfrequenz:  $f_0 = 100\%$ ,
  - ⇒ Fußraumintrusion:  $u_{FR,0} = 100\%$ ,
- Zielfunktion:  $F(m, \Delta f, \Delta u_{FR}) \rightarrow \min$ ,
- Randbedingungen:
  - ⇒ Eigenfrequenz  $f > 95\%$ ,
  - ⇒ Fußraumintrusion  $u_{FR} < 120\%$ ,
- Designvariablen: 60 Materialstärken gemäss der Definition in Abschnitt 3.2,
- Restriktionen:  $0.60 \text{ mm} < t_i < 5.00 \text{ mm}$ ,
- Anzahl der Rechenläufe:
  - ⇒ 10 Iterationsschleifen mit 12 Simulationen je Iterationsschleife ( $n=120$ ).

Bei den Randbedingungen für die Eigenfrequenz und die Fußraumintrusion wird bewusst ein gewisser Spielraum eingeräumt. Dies ist notwendig, damit die Optimierung nicht gleich am Anfang in einen unzulässigen Bereich läuft. Sollten die Randbedingungen verletzt werden, so wird auf die Zielfunktion

$$F := F + P$$

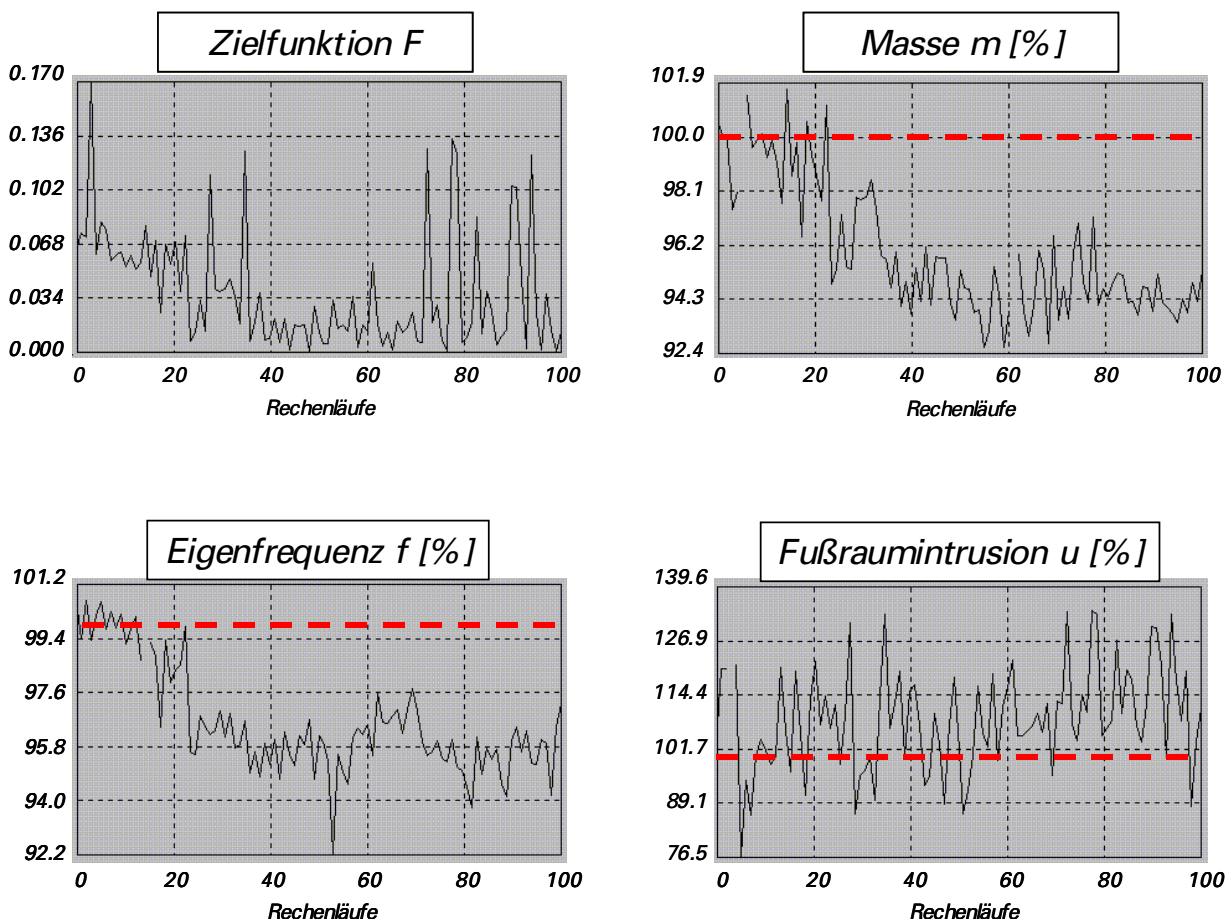
ein Strafwert  $P$  (Penaltyfaktor) addiert, der von der Schwere der Verletzung abhängig ist. In Bild 18 sind die Entwicklung der Zielfunktion und der wichtigsten Zustandsgrößen bei zunehmendem Fortschritt der Optimierung dargestellt. Um eine übersichtliche Darstellung zu gewährleisten, sind die Rechenläufe mit einem zu hohen Penaltyfaktor nicht abgebildet. Die Ausgangswerte sind jeweils durch eine Strichlinie markiert.

Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Die Zielfunktion  $f$  schwankt stark und nimmt im Mittel leicht ab.

- Die Masse des Berechnungsmodells nimmt um ca. 5% ab.
- Die erste Eigenfrequenz nimmt ab und nähert sich dabei der gesetzten Randbedingungen von 95%.
- Die Fußraumintrusion nimmt zu und schwankt dann im Bereich der gesetzten Randbedingungen von 120%.

Obwohl die Zielfunktion abnimmt, ist das Ergebnis der Optimierung unbefriedigend. Stochastische Verfahren nutzen die Gradienteninformation  $\partial F/\partial x$  der Zielfunktion  $F$  nicht. Daraus resultiert eine langsamere Konvergenzgeschwindigkeit gegenüber den analytischen Verfahren (siehe [4]). Daher sind bei einem stochastischen Vorgehen deutlich mehr Rechenläufe als  $n=120$  erforderlich, um eine merkliche Systemverbesserung zu erhalten. Dies ist aber bei der momentanen Leistungsfähigkeit der Hardware problematisch.



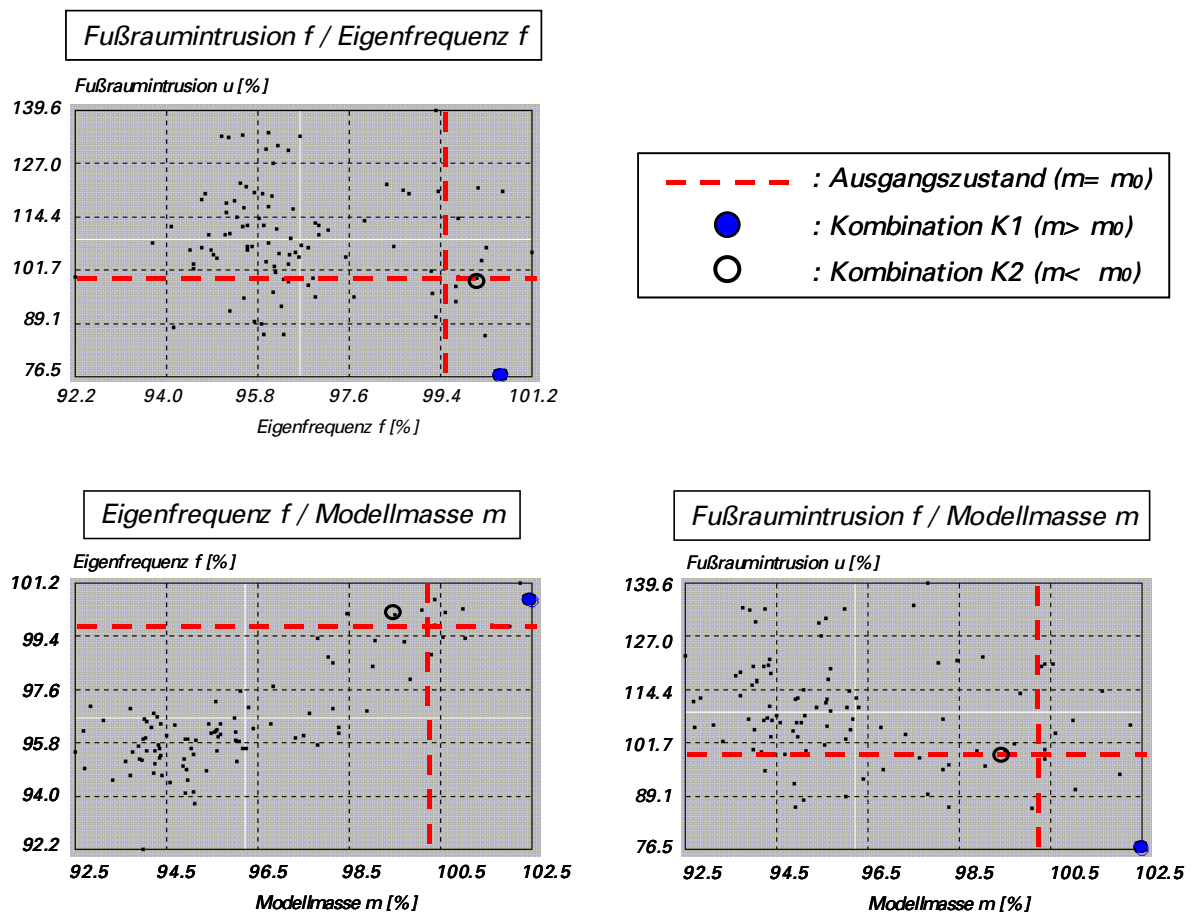
**Bild 18:** Entwicklung der Zielfunktion und Zustandsgrößen (Simulation Vorserie)

Obwohl der Optimierungsverlauf insgesamt nicht befriedigend ist, liefert die Untersuchung einige hilfreiche Informationen über das Systemverhalten. In Bild 19 sind die Abhängigkeiten zwischen der Masse, der ersten Eigenfrequenz und der Fußraum-

intrusion aus den Rechenläufen der Optimierung dargestellt. Hieraus können zwei Blechdickenkombinationen abgeleitet werden:

- Kombination  $K_1$  ( $m_1 > m_0$ ), die bei einer Erhöhung der Masse um 2% zu einer deutlichen Reduktion der Fußraumintrusion auf 76% führt.
- Kombination  $K_2$  ( $m_2 < m_0$ ), die bei nahezu gleichbleibenden Eigenschaften ( $f, u_{FR}$ ) zu einer Reduktion der Masse um fast 1% führt.

Dafür waren jedoch 120 Rechenläufe mit einem Zeitaufwand von drei Wochen erforderlich. Ein solches Vorgehen ist bei der momentanen Hardwaresituation ineffizient.



**Bild 19:** Abhängigkeit zwischen Masse, Frequenz u. Intrusion (Simulation Vorserie)

	Modellmasse $m$ [%]	Frequenz $f$ [%]	Intrusion $u_{FR}$ [%]
Ausgangszustand	100.0	100.0	100.0
Kombination K1	102.0	100.7	76.2
Kombination K2	99.2	100.2	100.1

**Tabelle 5:** Vergleich verschiedener Blechdickenkombination (Simulation Vorserie)

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Stochastische Simulation ist ein Verfahren, das die in der Realität auftretenden Streuungen bei der numerischen Analyse tragender Strukturen berücksichtigt. Zu den wesentlichen Anwendungsfeldern der stochastischen Simulation gehören die Validierung zwischen Simulation und Versuch, die Untersuchung der Robustheit, Sicherheitsbetrachtungen und die Optimierung bestehender Strukturen.

Bei VW wurde im Rahmen eines Pilotprojektes eine stochastische Simulation am Vorserienstand des VW Phaeton durchgeführt. Hierbei wurden die Lastfälle Modalanalyse und Frontalcrash betrachtet. Die wesentlichen Erkenntnisse aus dieser Untersuchung sind:

- Der Vorserienstand der Rohkarosserie ist bezüglich der globalen Eigenfrequenzen robust und ausreichend dimensioniert.
- Demgegenüber traten für den Lastfall Frontalcrash deutlich höhere Streuungen auf, die zu einem empfindlichen Verhalten bezüglich der Fußraumintrusion  $u_{FR}$  führen.
- Die Korrelationsanalyse zeigt, dass die Festigkeiten zwischen den Bereichen Längsträger vorn und Stirnwand nicht ausreichend abgestimmt sind.
- Durch ein geeignetes Maßnahmenpaket wurde dieses Abstimmungsproblem beseitigt.
- Versuche mit dem Serienstand des VW Phaeton zeigen ein stabiles Verhalten bezüglich der Fußraumintrusion. Der Zielwert wird unterschritten. Die Streuungen werden reduziert.
- Das Ergebnis der stochastischen Optimierung ist nicht zufriedenstellend. Die hier durchgeführten 120 Rechenläufe reichen nicht aus, um zu einer merklichen Systemverbesserung zu gelangen. Obwohl das Ziel der Optimierung nicht erreicht wird, liefert sie einige interessante Blechdickenkombinationen.

Diese Untersuchung zeigt, dass eine stochastische Simulation in der Fahrzeugentwicklung sinnvoll ist. Die hohen Rechenzeiten und der damit verbundene Zeitaufwand sind jedoch problematisch. Daher sollte die stochastische Simulation auf die wesentlichen Meilensteine der Fahrzeugentwicklung beschränkt bleiben.

Eine stochastische Optimierung im Zusammenhang mit einer Craschanalyse des Gesamtfahrzeugs ist aus Sicht der Autoren zur Zeit nicht sinnvoll. Untersuchungen in [4] zeigen, dass im Vergleich zu einem analytischen Verfahren bei einer stochastischen Optimierung eine hohe Anzahl an Rechenläufen erforderlich ist, um zu einer merklichen Systemverbesserung zu gelangen. Der dafür erforderliche Zeitaufwand ist bei der momentanen Leistungsfähigkeit der Hardware einfach zu hoch.

Sollte die Entwicklung im Bereich der Hardware jedoch weiterhin so rasant verlaufen wie in der Vergangenheit, so wird die stochastische Optimierung aufgrund ihrer Stabilität und ihrer einfachen Anwendung in Zukunft ein fester Bestandteil der Fahrzeugentwicklung werden. Erste Anzeichen hierfür gibt es bereits durch den Einsatz von PC-Clustern auf der Basis des Betriebssystems Linux.

## **5 Literatur**

- [1] MARCZYK, J.: Principles of Simulation Based Computer-Aided Engineering. FIM Publications, Barcelona 1999.
- [2] REUTER, R; HOFFMANN, R.: Bewertung von Berechnungsergebnissen mittels stochastischer Simulationsverfahren. VDI Berichte Nr. 1559, 2000.
- [3] ST-ORM, A Meta-Computing System for Stochastic Optimization and Robustness Management. EASi Engineering GmbH, 2000.
- [4] STREILEIN, T.: Erfassung formativer Verfestigung in viskoplastischen Stoffmodellen. Bericht Nr. 97-83, Institut für Statik der TU Braunschweig, 1997.