

# Multidisziplinäre Strukturoptimierung einer Motorhaube

Uwe Lobenwein, Michael Quadbeck

uwe.lobenwein@edag.de, michael.quadbeck@edag.de

Engineering und Design AG - EDAG, 71063 Sindelfingen, Deutschland

## **Abstract:**

Es soll anhand einer Motorhaubenstruktur des Ford Explorers die Anwendung der oben genannten Softwareprodukte für eine Optimierung demonstriert werden. Die Qualität des Ergebnisses besitzt für dieses Beispiel nur eine untergeordnete Priorität. Vielmehr soll hier in Kurzform die Anwendungsmöglichkeit der genannten Tools gezeigt werden und ein kurzer Überblick ausgewählter Problembereiche bei der Optimierung als Zusatzinformation und Diskussionsanregung vermittelt werden. Ein weiteres Ziel dieser Untersuchung ist, zu zeigen, dass parametrische Formoptimierungen nicht nur in der Konzeptphase, für die das Programm SFE Concept eigentlich entwickelt wurde, sehr vielversprechende Möglichkeiten bietet, sondern auch die Eigenschaften einer bestehenden Struktur entscheidend verbessern kann.

## **Keywords:**

Strukturoptimierung, Multidisziplinär, Schnittstellen, Parametrik, Crashsimulation, Steifigkeit, Eigenfrequenzen, Algorithmus,

## 1 Einführung

Die Anwendung der Simulation zur Untersuchung von physikalischen Systemen hinsichtlich ihres Verhaltens aufgrund spezieller Eigenschaften im Vergleich zu willkürlich erzeugten zusätzlichen Alternativen, kommt der Frage nach optimalen Verhalten nicht nach.

Die Verwendung der Simulation dient heute bislang immer noch einem "Nachvollziehungsprozess" welcher aber noch nicht gesichert als eine Entscheidungsgrundlage dient.

Aktuell und allgemein auch als solches anerkannt, wird die Simulation dazu verwendet, dass reale Systeme in einem Simulationsmodell nachgebildet werden, um diese anschließend beispielsweise für Sensitivitätsanalysen, d.h. erkennen von Zusammenhängen zwischen geänderten Inputgrößen und Einfluss auf die Ausgangsgrößen, anzuwenden.

Die Analyse des betrachteten Systemverhaltens wird dabei durch die Änderung von Variablen vorgenommen. Eine übergeordnete Betrachtung einer bestimmten Menge von Kombinationen der Inputvariablen liefert eine Ergebnismatrix, welche mit der Entscheidungsmatrix einen Abgleich vornimmt. Der Bereich geringster Abweichung wird als Basis für weitere Anwendungen genutzt. Zur Qualität des gefundenen Ergebnisses kann jedoch nichts gesagt werden und das Ergebnis kann durchaus von mehreren zufälligen Größen beeinflussbar bleiben, wobei die zufälligen Größen nicht direkt in den Ausgangsgrößen quantifizierbar sind.

Diese Vorgehensweise der Ergebnisanalyse ist jedoch stark passiv und verlangt keinerlei Betrachtung von Alternativen. Die Entscheidung ist von statischen Werten abhängig, mit denen versucht wird, eine positive Entscheidungsrichtung vorzugeben, ohne jegliche dynamische Anpassung an die Eigenschaften des untersuchten Systems vorzunehmen.

Es fehlt also eine analytische Vorgehensweise zur Ermittlung der Wirkung von Eingangsgrößen, d.h. ein Maß, um die positive oder negative Tendenz des Strukturverhaltens qualitativ zu ermitteln und nicht nur in starrer Form zu vorgegebenen Werten darzustellen.

Der betrachtete Zeitraum bei der Deformation von Crashstrukturen ist sehr kurz, jedoch relativ gesehen, zu den stattfindenden Ereignissen, sehr lang und in keiner Weise zu linearisieren. Die Wechselwirkungen des Strukturaufbaus und deren inneren Eigenschaften sind im Bereich der Deformation stark nichtlinear. Die vorhandene Nichtlinearität wird dabei durch das Identifizierungsproblem nochmals verschärft. Die notwendige Entscheidungsgrundlage soll ja eben nicht, wie zuvor gerade erwähnt, auf Basis von einfachen statischen Werten erfolgen, sondern sich auf dynamisch anpassende Größen beziehen. Dieses Problem steht auch im direkten Zusammenhang mit der Präferenzrelation, mit der eine Ordnung der auszuführenden Aktion dargestellt werden soll. Das Zielsystem ist somit zwangsläufig durch die Präferenzrelation, also durch die Merkmale und durch die Menge der Ziele gekennzeichnet und durchläuft dabei einen mehrfach verschachtelten Bewertungsprozess von Einzelgrößen des Gesamtsystems. Problematisch ist bei der Bewertung der Ergebnisse die erkannte Konsequenz der Beziehungsrelation zwischen Input und Output, sowie die Skalierung der Bewertungsfaktoren.

Die Komplexität der Entscheidungsprozesse wird durch das Setzen von Mehrfachzielen deutlich erhöht und führt zu Konflikten, die zu indifferenten oder neutralen, sowie komplementären oder konkurrierenden Zielen führen. Um das Entscheidungsproblem wieder zu vereinfachen ist es denkbar, Ziele zu kategorisieren und in geeigneter Weise zu kombinieren. Entscheidend ist jedoch, dass eine hierarchische Ordnung und Verträglichkeit der Ziele vorliegt.

Die Ermittlung der Sensitivität des System auf Änderung der Eingangsgröße zur Änderung der Ausgangsgröße umfasst 3 Bereiche, welche in positiv, negativ und neutral unterteilt werden können. Die Eliminierung von angeblich neutralen Parametern ist ggf. jedoch sehr gefährlich und nicht, durch eine Varianzanalyse oder durch das Regressionsmaß als solche, beweisbar zu eliminieren. Ursache hierfür ist ein bestehender signifikanter Unterschied zwischen der Kovarianzen von Variablen untereinander und der Korrelationen zwischen Inputvariablen und Outputgrößen.

Für die Strukturoptimierung werden eine Vielzahl von einflussnehmenden Faktoren in Betracht gezogen, die einen störenden Einfluss besitzen und im Vorfeld auf ihre Wirkung und Plausibilität geprüft werden müssen. Typische Berechnungsabweichungen treten bei der Verwendung unterschiedlicher Elementtypen und Qualitäten auf. Zusätzliche Abweichungen werden durch die, aus realen Versuchen und darauf basierenden Ableitungen für die Simulation, ermittelten Parameter

eingebraucht. Modellierungsfehler des FE-Ersatz- oder Teilmodells können das eigentliche physikalische Verhalten des Systems ebenfalls stark beeinflussen und zu unbrauchbaren Ergebnissen führen.

Aus diesem Grund ist die zu optimierende Struktur in ihrer Startkonfiguration, inklusive der oben angemerkten Störmöglichkeiten, möglichst so zu wählen, dass eine aus der Ingenieurserfahrung heraus sinnvolle und plausible Struktur entsteht. Eine zu hohe Anzahl an Freiheitsgraden der parametrischen Flächenbeschreibung und eine sehr stark abweichende Anfangsgeometrie vom Optimierungsziel kombiniert mit einem zu großen Variablenbereich, führte in der Vergangenheit immer wieder zu unbrauchbaren Ergebnissen. Nicht zuletzt ist der Misserfolg auch darin begründet, dass eine sinnvolle Einschätzung der Startparameter ausgehend vom Initial Design schwer einzuschätzen ist.

### 1.1 Motivation

Die klassische Strukturoptimierungsmethode für Crashlastfälle ist in den meisten Fällen immer noch eine Ingenieursleistung, kombiniert mit einem Abgleich von Erfahrungswerten und allgemein anerkannten Tendenzen. Obwohl mittlerweile durchaus geeignete Optimierungsverfahren, wie die Sukzessive Response Surface Methoden (LS-OPT) vorhanden sind, um stark nichtlineare Systemantworten zu deuten und eine optimale Verteilung der Variablenwerte zu finden, ist die Erstellung der Modelle mit entsprechenden Möglichkeiten zur Änderung momentan noch die größte Herausforderung.

Die Bearbeitung von Strukturoptimierungsproblemen ließ uns erkennen, dass bestimmte Fragestellungen nicht mit ein oder zwei speziellen Softwareprodukten in akzeptabler Qualität und Modularität bezüglich der Modellerstellung zu bearbeiten sind. Aus diesem Grund wurden die bekannten und weniger genutzten Fähigkeiten der im Hause EDAG vorhandenen Standardsoftwarepakete untersucht und auf ihre Integrationsfähigkeit in den Optimierungsprozess hin geprüft.

Aus den zuvor durchgeführten Forschungsreihen und bearbeiteten Projekten ging hervor, dass jede Komponente im Optimierungsprozess in ihren festgelegten Eigenschaften einen eindeutigen Einfluss auf die Systemantworten hat und im schlimmsten Fall negativ wirkt, unerkannt bleibt und das System stark sensitiv reagiert. Dies bedeutet konkret, dass der Solver in seinen Grundeinstellungen eventuell nicht zu hundert Prozent für diese Problemlösung geeignet ist oder die Abbildung des FE-Modells mit gewählten Elementen nicht ausreichend die Physik des Bauteils abbildet. Im schlimmsten Fall überlagern sich diese Effekte und führen zu einer falschen Bewertung der Struktur.

Um diesen Zusammenhang vielleicht nochmals eindringlicher in seiner Bedeutung hervorzuheben soll hier darauf hingewiesen werden, dass Strukturänderungen sich immer auf die angekoppelten Systeme auswirken. Wie jedoch ein gekoppeltes System bezüglich der Strukturänderung eines entfernten Bauteils reagiert und welches Phänomen grundsätzlich zur Änderung der Systemantwort beigetragen hat, ist nur schwer zu registrieren, bzw. durch einen Automatismus zu verselbstständigen. Es kann hier noch kein allgemeingültiger Ansatz geliefert werden um diesem Problem entgegenzuwirken.

## 2 Parametrische Modelle mit SFE CONCEPT

Die Strukturoptimierung soll nach Möglichkeit ein iterativer Vorgang sein, in dem sich die Struktur gesteuert durch den Entscheidungsprozeß des Optimierungsalgorithmus eigenständig an die benutzerdefinierten Vorgaben anpasst. Damit soll in erster Linie durch die Formänderung einer Struktur und der damit einhergehenden Eigenschaftsänderung das Optimierungsziel erreicht werden. Um dies zu realisieren, muss ein Modell mit entsprechender Modularität erstellt werden, das sich mit möglichst wenigen Parametern steuern lässt und gleichzeitig einen großen Gestaltungsraum bereithält. Hieraus entsteht die Forderung nach zuverlässigen Vorgehensweisen zur Flächenänderung und der assoziativen Vernetzung, in Verbindung mit den notwendigen FE-Randbedingungen. Dieses ist mit Abstand das anspruchvollste Aufgabengebiet innerhalb der Optimierung.

Die Suche nach einem geeigneten Programm für die Flächengenerierung und FE-Modifikation führte zu SFE CONCEPT, das auf die Erstellung beliebiger Flächen- und Topologiestrukturen spezialisiert

ist. Die Grundphilosophie von SFE CONCEPT bedient sich dabei einfacher und klar hierarchisch gegliederter Geometrieelemente, um die gewünschte Flächengeometrie und Topologie zu beschreiben; vgl. Kap. 2.1. Die zwingende Strukturgestaltung nach den Regeln von SFE CONCEPT für weiterführende Geometriemodifikationen ist Grundvoraussetzung für die spätere batchgesteuerte Änderung der Struktur. Über die einfache Variation der Gestalt einer Flächengeometrie hinaus, können übergeordnet auch auf Datenbanken basierende Topologieänderungen vorgenommen werden.

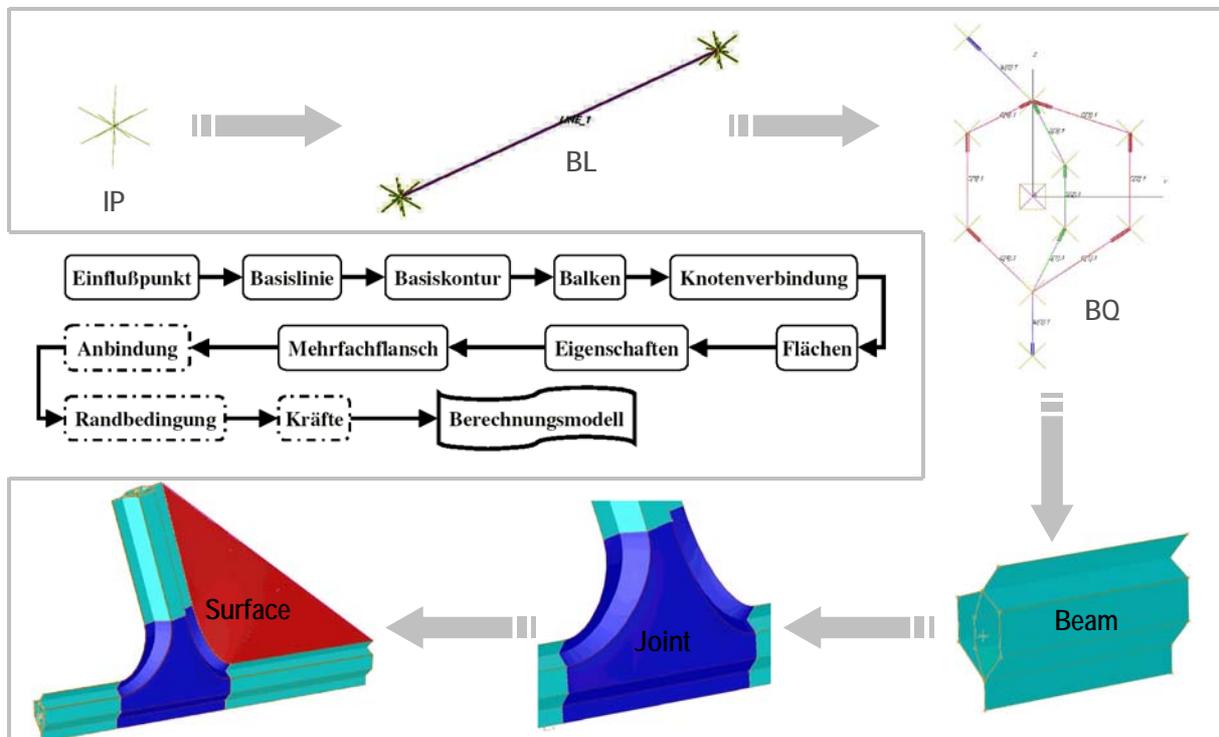


Bild 1 / SFE CONCEPT Geometrieerstellung

Das Bild 1 verdeutlicht nochmals den prinzipiellen Zusammenhang der Geometrieelemente und deren Einflussrichtung. Durch eine geschickte Kombination der Einzelelemente lassen sich beliebig komplexe Strukturen abbilden. Auch die Darstellung von Bohrungen oder Sickenbildern ist möglich, sowie die Anwendung nützlicher Zusatzfunktionen für die Modellierung des späteren FE-Modells. Die Verschmelzung der geometrischen und berechnungsrelevanten Definitionseigenschaften innerhalb von SFE CONCEPT sind dabei ein entscheidendes Detail für effektive Einbindung in einen Optimierungsprozess.

## 2.1 SFE CONCEPT Philosophie

Der Zusammenhang der Grundelemente in SFE CONCEPT kann gut mit einer hierarchischen Rangfolge in Bild 2 im Vergleich betrachtet werden, wobei jedes einzelne Segment der Kette seine Information immer an das nächst niedrigere Kettenglied weitergibt. Das Ranghöchste und somit auch einflussstärkste Geometrieelement ist der Einflusspunkt (IP). Eine Änderung seiner Position wirkt sich beispielsweise auf alle aufbauenden Topologie- und Flächenelemente aus. Der IP bildet zusammen mit der Basislinie und der Basiskontur die komplette Bandbreite der Topologie und deren Gestalt ab. Alle Balken- und Zwischenflächen werden automatisch erzeugt bzw. neu interpretiert.

Die Ableitung von möglichen Designvariablen für die spätere Optimierung ist aus allen drei Teilbereichen der Grafik denkbar. Für das im Folgenden vorgestellte Modell der Motorhaube wurden die Koordinaten von einzelnen Einflusspunkten und Eckpunkten unterschiedlicher Basiskonturen sowie die Eigenschaften mehrerer PID's durch Wandstärkenänderungen modifiziert.

Die Definition der Designvariablen und deren Ober- und Untergrenzen kann mittels der grafischen Oberfläche von SFE CONCEPT vorgenommen werden. Dabei genügt es, die Änderungen der

Parameter interaktiv aufzuzeichnen. Diese werden anschließend in einer Designvariable gespeichert. Zudem können die Designvariableninformationen direkt zu verschiedenen Optimierungstools, wie LS-OPT oder OPTIMUS, exportiert werden. Die Steuerung der Designvariablen im sogenannten Batchmode von SFE CONCEPT werden durch Eingabedaten im ASCII-Format ermöglicht und demnach einfach mit einen direkten Zugriff durch die Optimierungstools änderbar. Mit dem internen Finite Elemente-Generator von SFE CONCEPT ist es möglich, zu jeder Geometrie ein FE-Modell zur Analyse abzuleiten. Zur weitere Verarbeitung sind die optimierten Geometrien oder FE-Modelle dabei direkt aus SFE CONCEPT ableitbar.

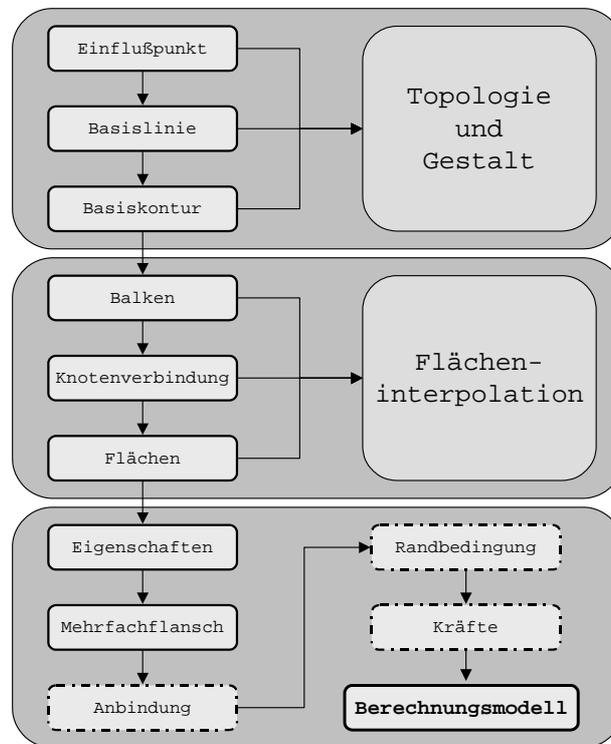


Bild 2 / Hierarchie- und Informationsstruktur eines SFE CONCEPT-Modells

### 3 Modelldefinition

#### 3.1 Modellaufbau

Die Geometrie der Motorhaube wurde vom frei verfügbaren Ford Explorer FE-Modell abgeleitet.[14] Der Detailgrad des Motorhaubendeckbleches und des unterliegenden Versteifungsbleches wurde an den vorab festgelegten Zeitrahmen angepasst. Dadurch werden konstruktive Details nicht im CONCEPT-Modell berücksichtigt (vergl. Bild 3) und pauschal in ihrer Wirkung innerhalb der Optimierung vernachlässigt. Strenggenommen widersprechen wir hiermit fast allen in der Einleitung genannten Problemen, in der Hoffnung keine positiven oder negativen Effekte ausgeblendet zu haben. Um die Designvorgaben der Oberflächenstruktur nicht zu verletzen beschränkt sich die Vergabe der Form- und Dimensionsparameter auf das innenliegende Versteifungsblech, welches an den Randbereichen über kongruente Knoten und an der Flanschen im mittleren Haubenbereich durch Klebverbindungen mit dem Deckblech verbunden ist.

Es werden zwei SFE CONCEPT-Modelle erzeugt, die sich jedoch nur in den aufgetragenen Randbedingungen unterscheiden. Im ersten SFE CONCEPT-Modell wird ein NASTRAN-FE-Modell für die Eigenfrequenzanalyse, sowie ein LS-DYNA-FE-Modell erzeugt. Diese Modelle beinhalten keine Randbedingungen, da das LS-DYNA-FE-Modell über eine Include-Funktion in ein Modell des Explorer-Vorderwagens eingefügt wird. Das zweite SFE CONCEPT-Modell enthält die Randbedingungen für die Beulsteifigkeitsanalyse. An den Anbindungsstellen der Scharniere und des Schlosses, sowie an den Auflagestellen der Motorhaube werden mit RBE2-Elementen, die durch

SPC's fixiert werden, die Lagerbedingungen modelliert. Die Flächenlast von 100N wirkt auf einen 80mm x 80mm großen Bereich.

Durch die Anwendung des impliziten Solver NASTRAN und dem explizitem Solver LS-DYNA sind bezüglich der Modelldefinitionen unterschiedliche aber dennoch vergleichbare Verbindungstechniken erforderlich. So wurden die Klebverbindungen in den NASTRAN-Modellen durch Hexa-RBE3-Hexa-Elemente nachgebildet, im LS-DYNA-Modell durch Hexaeder-Elemente. Die Elementqualität aller Modelle wird durch ein RECONSTRUCT in ANSA überarbeitet.

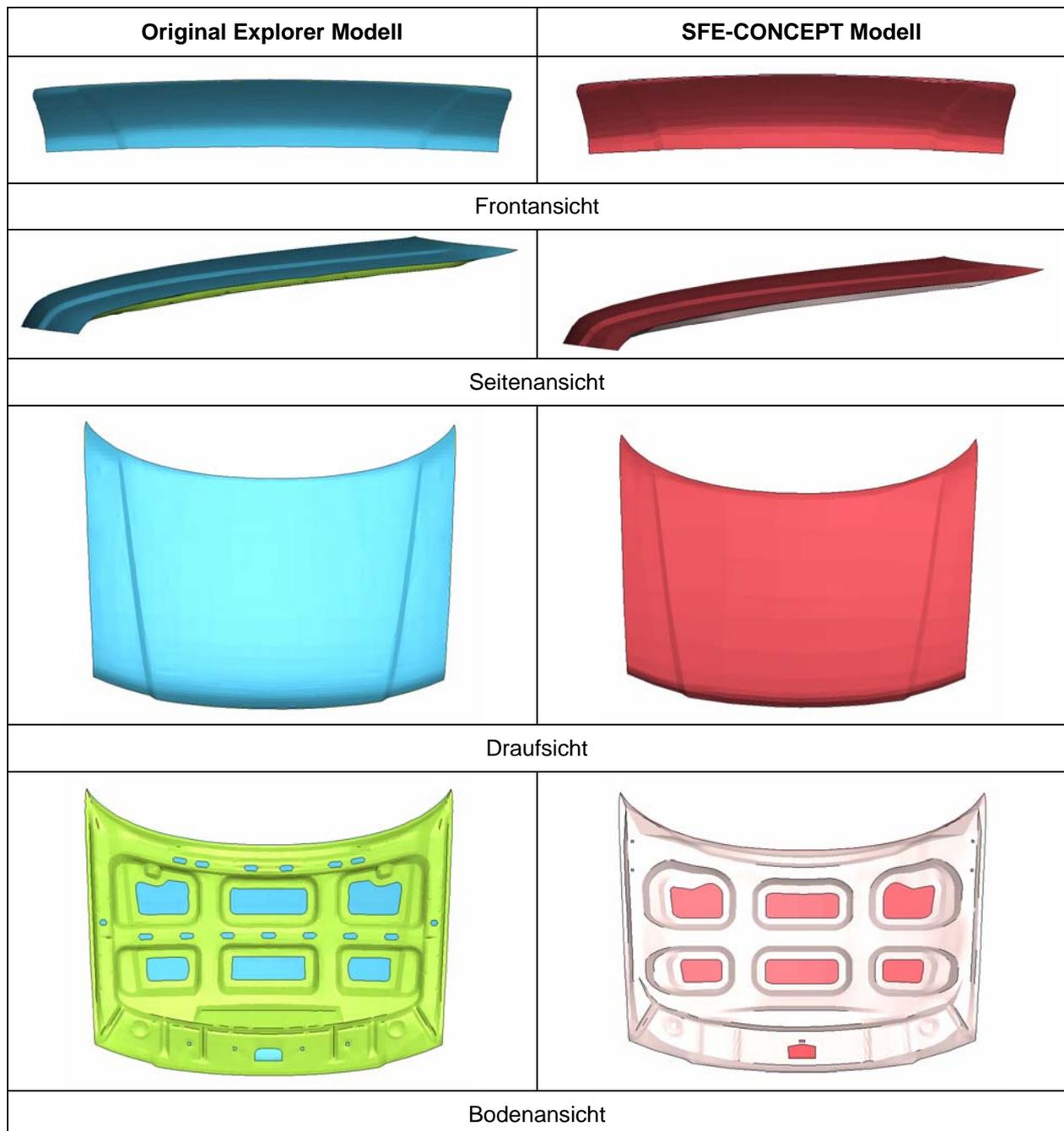


Bild 3 / Darstellung der Motorhaubenstruktur im Vergleich

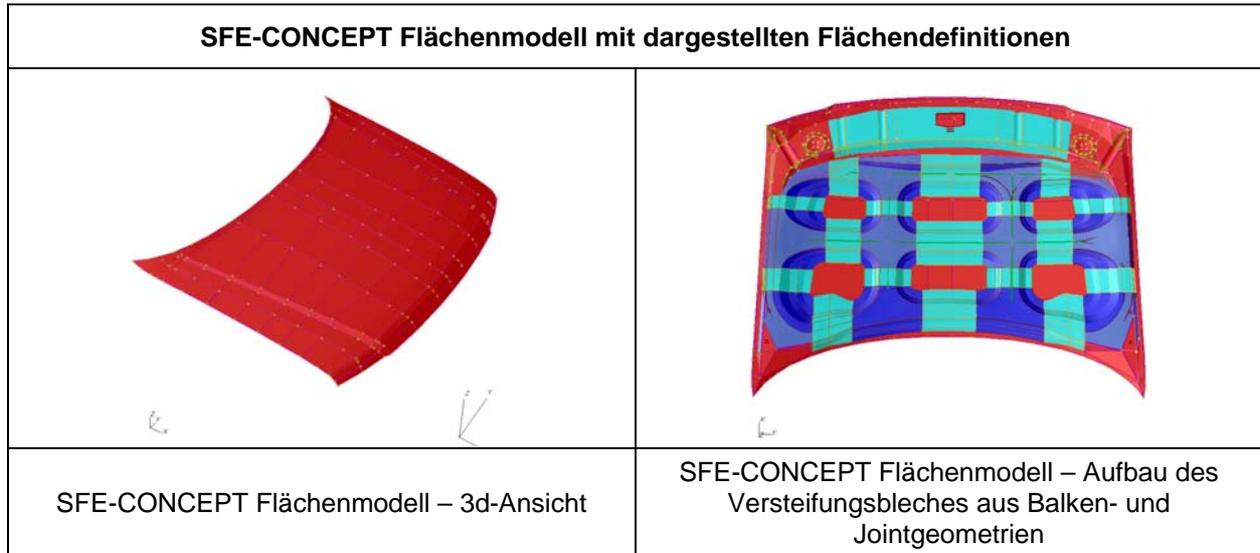


Bild 4 / SFE CONCEPT Flächendefinitionen im Motorhaubenmodell

### 3.2 Designmodell

Die für die Optimierung als sinnvoll erachteten Designvariablen sind in der Tabelle 1 und in den Abbildungen 5 dargestellt. Geometrieänderungen werden an den Blechknoten und den verbindenden Stegquerschnitten des Innenblechs vorgenommen. Weiterhin werden die Blechstärken des Motorhaubendeck- und des Versteifungsblechs optimiert.

Nr.	Bezeichnung	Initialwert [mm]	Designraum [mm]	
			Untergrenze	Obergrenze
1	Blechstärke Außenblech	0,94	0,58	1,4
2	Blechstärke Innenblech	0,67	0,54	0,9
3	Jointsinnen Y	0,0	-50	50,0
4	Jointsinnen X	0,0	-40	40,0
5	Jointsaussen X	0,0	-60	40,0
6	Jointsvorn Y	0,0	-30	50,0
7	Jointshinten Y	0,0	-50	50,0
8	Quermitte X	0,0	0,0	-10,0 je Seite
9	Quermitte Y	0,0	0,0	-10,0 je Seite
10	Queraussen Z	0,0	0,0	-10,0

Tabelle 1 / Designvariablen

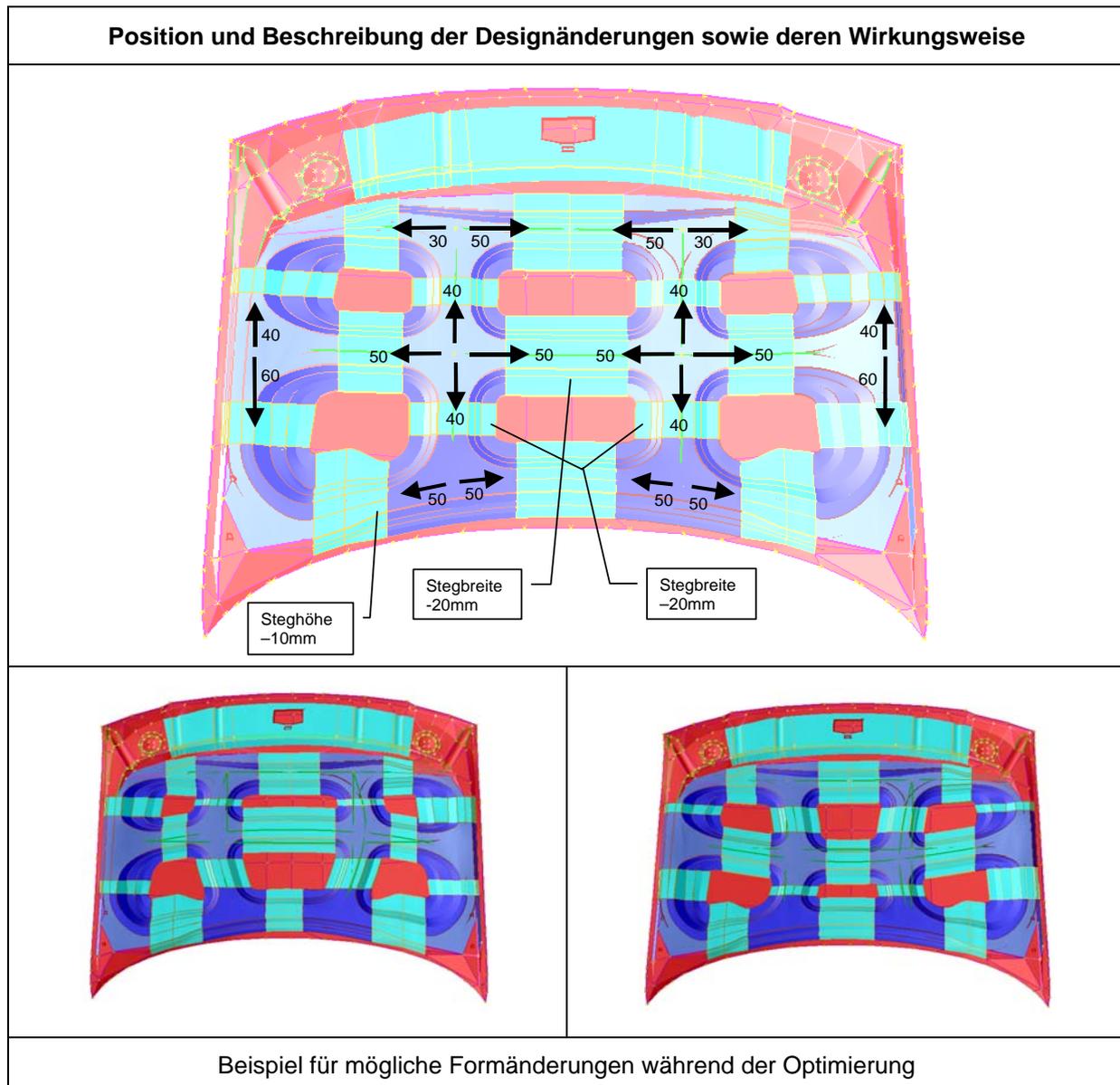


Bild 5 / Graphische Darstellung der Designvariablen

### 3.3 Modellvereinfachungen

Modellvereinfachungen sind in der FEM nicht ungewöhnlich und oft eine praktikable Methode um den zeitlichen Aufwand für eine hohe Anzahl an Berechnungen zu verringern. Diese Vereinfachungen führen dabei oft zu Abweichungen in den Systemantworten zwischen Gesamt- und Teilmodell. Die Definition der struktureretzenden Randbedingungen gestaltet sich häufig schwierig, zumal bei Änderungen des Lastfalls oder bei gravierenden Strukturänderungen im Interessenbereich auch eine Änderung im Verhalten der ersetzten Struktur zu erwarten wäre, die nicht durch das Ersatzsystem berücksichtigt wird. Die Höhe des dabei entstehenden Fehlers ist nur durch zeitintensive Gesamtmodellberechnungen darstellbar und bleibt auch in seiner Bedeutung für die Optimierung weitgehend unbekannt.

Die Abweichungen sind selbstverständlich nicht nur zwischen Teil- und Gesamtmodell vorhanden, sondern sind hauptsächlich im Vergleich zu realen Vorgängen eine zu reduzierende Größe. Die Modellgestaltung beschäftigt sich daher mit der Abbildungsgenauigkeit der Struktur und derer Schnittstellen zu anderen Strukturgruppen. Aber genau hier scheiden sich die Gewohnheiten und Erfahrungen. Unter wirtschaftlichen Aspekten sollten die Berechnungen so schnell wie möglich

durchgeführt werden und dabei ein aussagekräftiges Ergebnis liefern. Der Modellaufbau und die Abbildung der Physik sollten zu einem Mindestmaß an die Interpretierbarkeit der Ergebnisse führen. Der wissenschaftliche Standpunkt beschäftigt sich dagegen mit der Korrektheit der Ergebnisse und deren Aussagekraft als Basis für die Vorhersage für Modellmodifikationen. Lokale Strukturphänomene lassen sich dabei nur mit detaillierter Darstellung der Struktureigenschaften darstellen. Ohne Zweifel sind die Ergebnisse einer wissenschaftlichen Betrachtung eine bessere Basis für die Optimierung, jedoch würde darauf aufbauend aufgrund des hohen Modellierungsaufwandes und der benötigten Berechnungskapazitäten entweder nie ein endgültiges Ergebnis generiert werden können, oder die auftragsausführende Firma bankrott gehen. Dieses Szenario ist nicht zielführend und deswegen nur durch den Einsatz der Modellvereinfachung zu verhindern. Im Konkreten gilt dies beispielsweise für die Abbildung jeglicher Verbindungstechniken zwischen Bauteilen durch Schrauben, Schweisspunkten, Niet- oder Klebverbindungen. Jede dieser Techniken wird in der Regel aus Zeitgründen abstrahiert und durch Elemente mit ähnlichen phänomenologischen Eigenschaften ersetzt.

Eine vereinfachte Modellstruktur wird aber auch durch den Definitionsaufwand und der überhaupt zur Verfügung stehenden Möglichkeiten im automatisiertem Ablauf der Optimierung vorgeschrieben und muss als möglicherweise negative Randerscheinung akzeptiert und berücksichtigt werden. Nach genauer Analyse der Initialmodelle lassen sich bestimmte Lastfälle insbesondere für den Kopfaufprall rationalisieren, da diese repräsentativ durch andere Lastfälle abgebildet, bzw. deren Grenzwerte erfüllt werden. Bezüglich der hohen Anzahl an notwendiger Berechnungen für Kopfaufschlagmatrix gemäß der Richtlinie 70/156/EEC Phase1 besteht sogar eine Notwendigkeit zur Vereinfachung innerhalb des Zeitrahmens dieser Forschungsreihe.

### 3.4 Lastfalldefinition

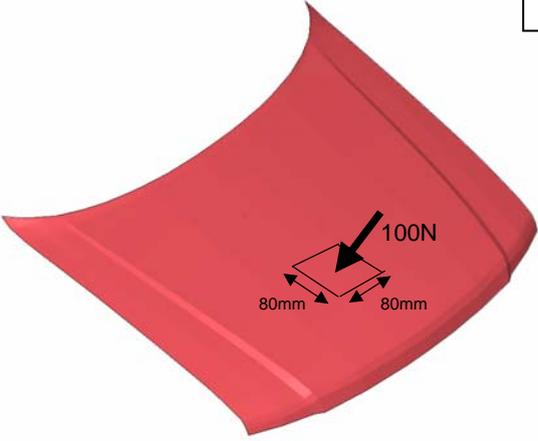
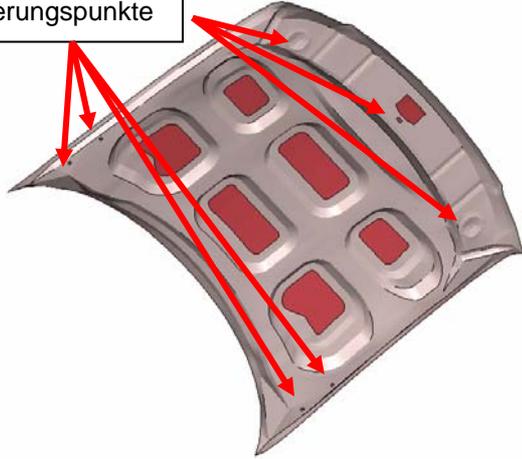
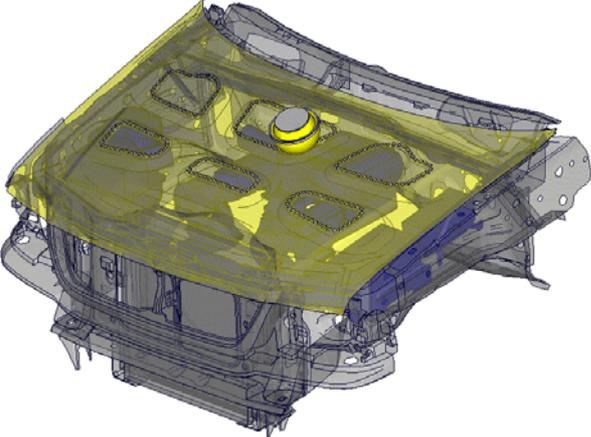
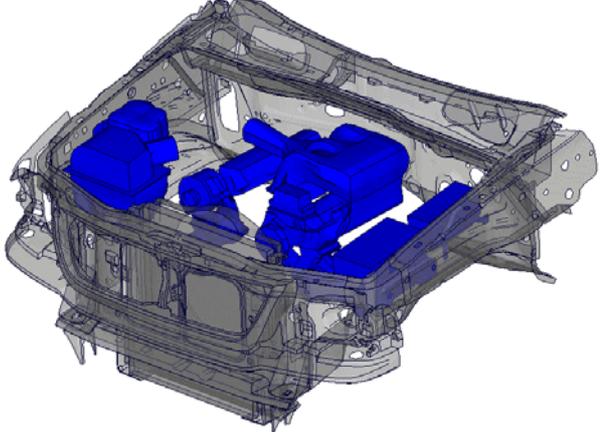
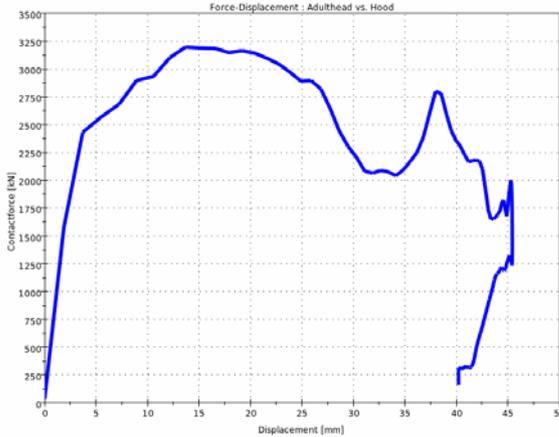
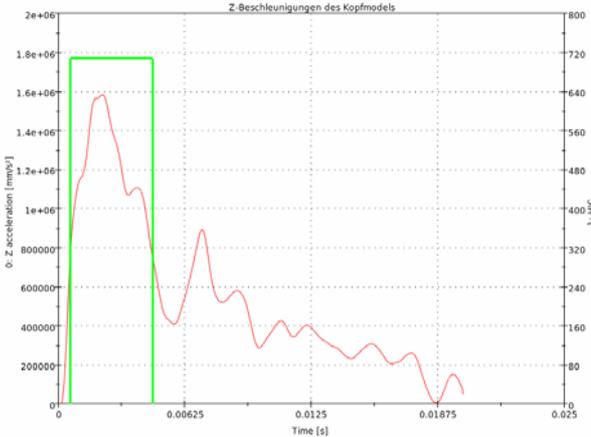
Das Optimierungsproblem für die Motorhaube setzt sich aus einer Kombination von verschiedenen Lastfällen zusammen. Für die Einbeziehung der Lastfälle in die Optimierung wurden gegenläufige Systemantworten bezüglich der Last und der, für diesen isoliert betrachteten Lastfall, optimalen Struktur gewählt, um das Optimierungsproblem zu erschweren und um den realen Entwicklungsprozess mit gerade diesen gegenläufigen Tendenzen in der Strukturauslegung nahe zu kommen.

Die Lastfälle sind in die drei Kategorien NVH / Festigkeit / Crash unterteilt (verg. Bild 6). Für die Kategorien gelten folgende Beschreibungen:

**NVH:** Eigenfrequenzanalyse  
**Festigkeit:** Beulsteifigkeitsanalyse  
**Crash:** Kopfaufschlag an einer Position / 35km/h

#### Initialwerte:

Knotenverschiebung (Beulsteifigkeit):	0,56mm
1. Eigenmode:	24,2Hz
Masse:	19,67kg
Intrusion (Head):	46mm
HIC (Head):	709

 <p>A 3D model of a red motor hood. A black arrow labeled '100N' points downwards to a square area on the top surface. The sides of this square are labeled '80mm'.</p>	 <p>A 3D model of a grey motor hood. A box labeled 'Lagerungspunkte' (Support points) has red arrows pointing to several locations on the inner surface of the hood, indicating where it is supported.</p>
<p>Aufgeprägte Flächenlast auf Motorhaubenoberfläche</p>	<p>Lagerungsrandbedingungen für diesen Lastfall</p>
 <p>An ISO view of the motor hood assembly. The hood is highlighted in a yellow semi-transparent state, showing its position relative to the rest of the engine compartment.</p>	 <p>A 3D model of the engine compartment. Several components are highlighted in blue, representing contact parts located underneath the motor hood.</p>
<p>ISO-Ansicht – DYNA Modell</p>	<p>Kontaktbauteile unterhalb der Motorhaube</p>
 <p>Force-Displacement : Adulthead vs. Hood</p> <p>A line graph showing Force [N] on the y-axis (0 to 3500) and Displacement [mm] on the x-axis (0 to 50). The blue curve rises to a peak of approximately 3200 N at 15 mm displacement, then fluctuates and ends at about 2000 N at 45 mm displacement.</p>	 <p>Z-Beschleunigungen des Kopfmodells</p> <p>A line graph showing Z-acceleration [mm/s<sup>2</sup>] on the left y-axis (0 to 2e+06) and Time [s] on the x-axis (0 to 0.025). A red curve shows a sharp initial peak of about 1.6e+06 mm/s<sup>2</sup> at 0.0025s, followed by smaller oscillations. A green box highlights the initial peak.</p>
<p>Kraft-Weg-Verlauf des Kopfmittelpunktes in der Ausgangsvariante</p>	<p>Beschleunigungswert des Kopf-mittelpunktes in der Ausgangsvariante</p>

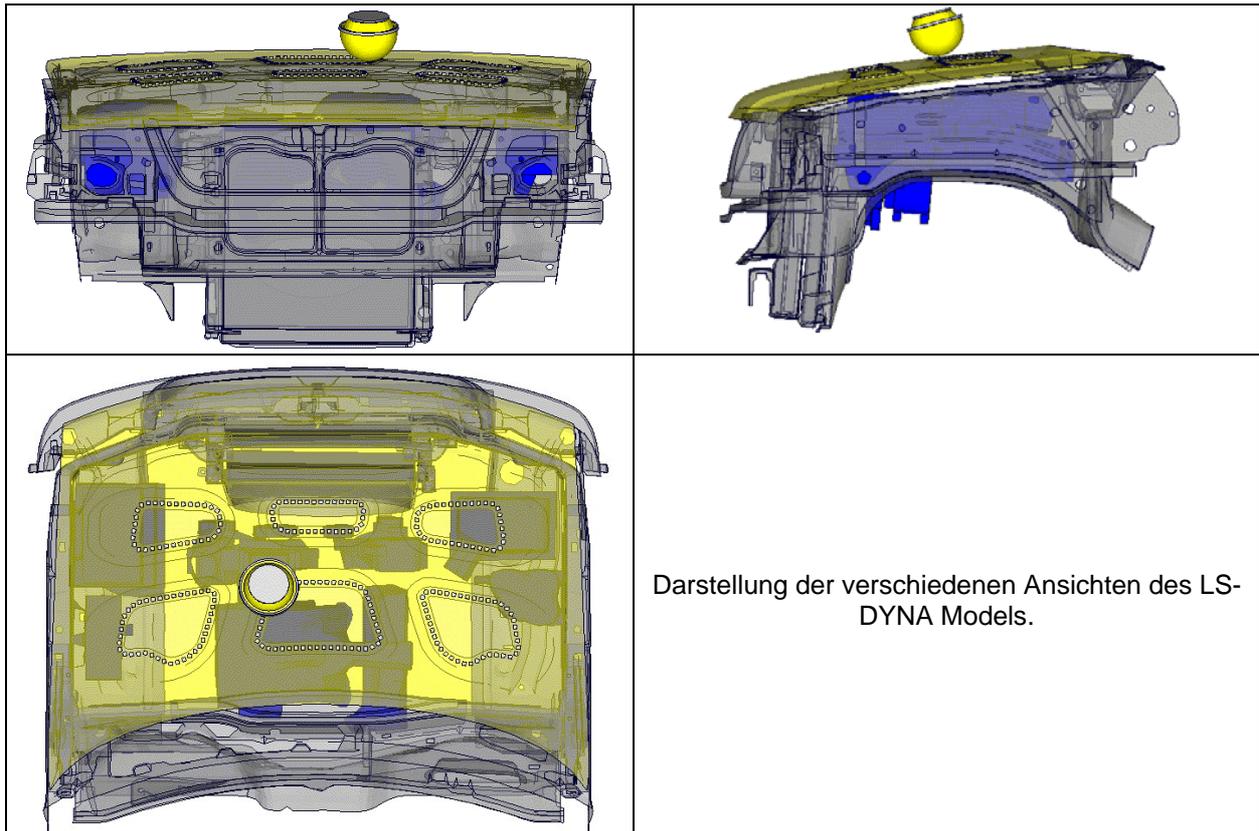


Bild 6 / Beschreibung des statischen Lastfalls und der definierten Randbedingungen für die Beulsteifigkeitsanalyse und des Kopfaufschlags mit definierten Randbedingungen

**3.5 Definiton der NASTRAN Modelle**

Die einzelnen Schritte in der Optimus-Prozesskette (s. Bild 7) laufen sequentiell ab, da die Berechnungen lokal auf einer HP Workstation xw8200 durchgeführt werden. Das Auslesen der Systemantworten erfolgt zum einen, durch ANIMATOR und zum anderen durch das unmittelbare Auslesen einer NASTRAN-Output-Datei.

Als Systemantworten wurden für die Eigenfrequenzanalyse der 1. Eigenmode definiert, die Masse der Motorhaube und für die Beulsteifigkeitsanalyse die Verschiebung eines Knotens im Kraftangriffsbereich.

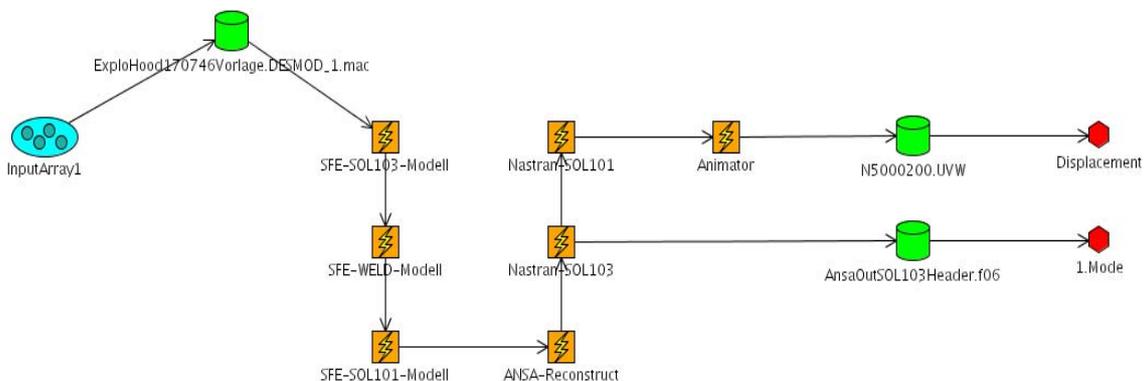


Bild 7 / Optimus-Prozesskette für NASTRAN Lastfälle

### 3.6 Definition des LS-DYNA Modells

Das LS-DYNA Berechnungsmodell besteht nur aus einem Lastfall und wird durch den in Bild 8 abgebildeten Workflow beschrieben. Um die Auswertung zu stabilisieren wurde für die Erfassung der notwendigen Systemantworten mit LS-PrePost vorgenommen. Die geordnete und vereinfachte Ergebnisdarstellung ist für die Archivierung der Ergebnisse gut geeignet und reduziert zugleich das Datenvolumen. Als repräsentatives Ergebnis der LS-DYNA Berechnung wurde der nach 70/156/EEC vorgegebene HIC-Richtwert verwendet. Diese Auswertegröße wird durch weitere Restriktionsgrößen ergänzt. So werden ebenfalls Kontaktkräfte zwischen der Motorhaubenverstärkung und den darunter angeordneten Aggregaten registriert. Diese sollen nach Vorgabe gleich Null sein, selbst dann, wenn der HIC-Grenzwert im Kontaktfall immer noch unterschritten wird.

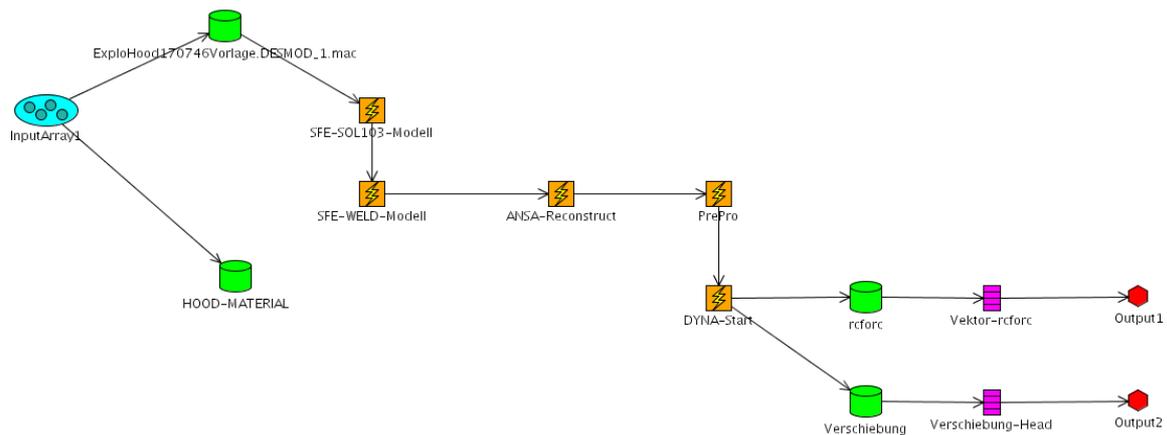


Bild 8 / Prozesskette für die LS-DYNA Berechnung

## 4 Optimierungsprozess

### 4.1 Gründe für eine Optimierung

Der lohnenswerte Einsatz der Optimierung begründet sich im Vorwege aus der Annahme, dass die Ingenieurserfahrung nicht mehr gesichert eine Aussage über bestimmte Systemantworten und Verhaltensweisen geben kann, vorausgesetzt es wurden alle Anstrengungen aus dem Abschnitt 3.3 zuvor erfolglos angewendet. Somit wird mit einer automatisierten Methode der Modellierungsaufwand selbständig organisiert und durch geeignete Methoden das Systemverhalten analysiert. Nutzwert der Analyse hängt dann vom Berechnungsumfang und der Interpretationsfähigkeit des Anwenders ab.

### 4.2 Umfassender Workaround

Der Aufwand für den Optimierungsprozess soll sich nach Möglichkeit nur auf die anfänglichen Definitionsarbeiten beschränken und keine interaktiven Eingriffe während der Optimierung bedürfen. Dies hat zur Konsequenz, dass der aufgebaute Workflow alle Einzelschritte, wie die Steuerung von SFE CONCEPT oder die notwendige Modifikationen der Inputdecks, eigenständig und fehlertolerant ausgeführt. Eigentliche Hauptbedingung für das Funktionieren des Workflows ist die sogenannte Batchfähigkeit der beteiligten Programme, wie sie in diesem Fall von ANSA und SFE CONCEPT, sowie ANIMATOR und LS-PREPOST bereitgestellt wird. Die Schnittstellenkommunikation muss bislang durch eine Reihe von Modifikationen mit Hilfe von einfachen Shellskripten und kleineren Programmen unterstützt werden, was den Optimierungsablauf wiederum flexibilisiert.

### 4.3 Anwendung der Optimierung

Bezugnehmend auf die Struktur oder das Ziel, stellt sich die Frage der bevorzugten Optimierungsart. Für klassische Methoden, wie die Dimensionierung oder auch Skalierung von Werkstoff- und/oder Bauteileigenschaften können einfache Parameter- oder Dimensionsoptimierungen durchgeführt werden. Typisches Verhalten bei Gebrauch dieser Vorgehensweisen sind oftmals gut erkennbare

Tendenzen oder Korrelationen zwischen dem veränderten Designparameter und der ausgewerteten, meist gutmütig verlaufenden Systemantwort.

Um die in 1 erwähnten Unsicherheiten bezüglich einer beweisbaren Aussage über die Gründe des Strukturverhaltens zu kompensieren, wird im Vorwege eine Analyse der Struktur vorgenommen. Hierbei werden die Designvariablen in dem vorgegebenen Wertebereich uniform verteilt. Die Änderungen der Systemantworten werden in Bezug zu den Änderungen der Designvariablen gesetzt. Auf Basis der ermittelten Einflussfaktoren können bei einer ausreichend hohen Anzahl an durchgeführten Berechnungen neutrale, positive oder negative Tendenzen des Strukturverhaltens bezüglich der Designänderung identifiziert werden. Die eigentliche Hauptarbeit liegt in der anschließenden Bewertung der Korrelationsanalyse. Die Aussagekraft der Analyse hängt dabei stark von den gewählten Arten der Systemantwort ab. So können beispielsweise Schnittkräfte nur bedingt ein Ersatzmaß für das Deformationsverhalten sein und durchaus unbrauchbar werden, sobald Deformationen oder gar Eigenkontakte im Bereich der Schnittufer auftreten. Diese Phänomene müssen also ebenfalls identifiziert werden um die Verträglichkeit und Zulänglichkeit der Ergebnisse zu prüfen, bevor diese für die Korrelationsanalyse herangezogen werden.

Die zeitgleich angewandte Analyse der Kovarianzen besitzt ebenfalls einen schwer fassbaren Aussagecharakter. Die Auswirkung eines Variablenwertes auf die Wirkung einer anderen Variable bezüglich der Systemantwort hängt ebenfalls vom zeitlichen Ablauf der Deformation ab. So können beispielsweise die eigentlichen Deformationen immer wieder gleichen Charakter besitzen, aber die Kontaktflächen in ihrer Größe variieren und der Verlust durch Reibung bei gleichem(!) Reibkoeffizienten einen unterschiedlichen Beitrag leisten. Die entstehende Wechselwirkung zwischen Reibung und beispielsweise Wandstärkenänderung kann nicht eindeutig aufgelöst werden und ist im besonderem Fall sogar nur in einem bestimmten Wertebereich überhaupt erkennbar, oder es sind durch eine zeitlich unterschiedliche Verteilung der Wechselwirkungen zwischen beiden Parametern keine Tendenzen mehr ableitbar.

Unter Beachtung der oben genannten Problematiken wurden für das Ziel der Optimierung die Erhöhung der 1. Eigenfrequenz des Motorhaubenmodells gewählt. Die Randbedingungen wurden dabei so gewählt, dass die Eigenschaften des Ausgangssystem weiterhin erfüllt werden, bzw. den noch vorhandenen Spielraum auszunutzen.

#### 4.4 Designvariablen und weitere Faktoren

Für die Optimierung der Struktur sind geeignete Variablen zu definieren, welche soweit bekannt, direkten und sinnvollen Einfluss während der Optimierung besitzen, sofern diese sich trotz der in 4.3 genannten Probleme identifizieren ließen.

Obwohl sich der Einfluss von Variablen nun eben nur beschwerlich ermitteln lässt, so können wir mit der in Bild 9 gezeigten Einflusshierarchie pauschal für alle Optimierungen, die gewählten Parameter kategorisieren.

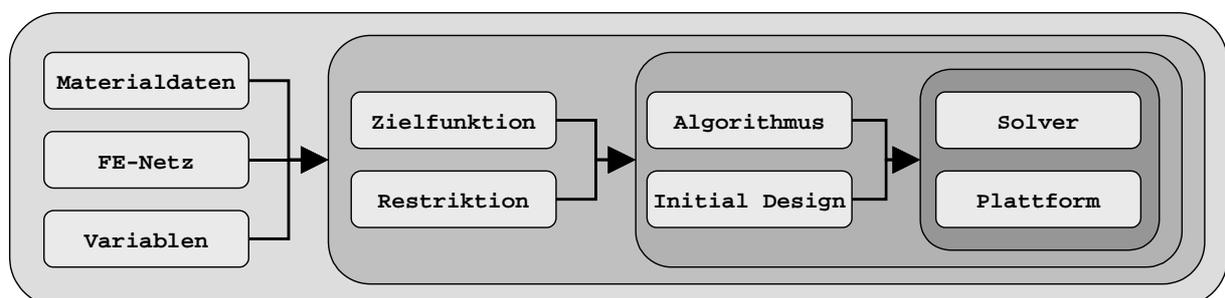


Bild 9 / Erfahrungsgemäße - hierarchisch geordnete - Einflussfaktoren auf die Optimierung der Gestalt von Strukturen

Selbstverständlich besitzt die in Bild 9 gezeigte Einflussabstufung nur eingeschränkte Gültigkeit, welche abhängig vom Gesamtverhalten des Systems und Optimierungsziel sich durchaus ändern kann. So sind die in Abschnitt 3.3 dargestellten Probleme der Modellvereinfachungen der untersten, allumfassenden Einflusshierarchie, zuzuordnen.

#### 4.5 Optimierungsverfahren

Aufgrund der zu erwartenden nichtlinearen Systemantworten des Modells wurde für die Optimierung zuerst eine DOE Methode angewendet um das Verhalten des Modells bezüglich seiner Tendenzen und Plausibilität hin zu prüfen. Im Falle von überwiegend fehlerfreien und plausiblen vorhandenen Berechnungsergebnissen kann anschließend ein frei wählbarer Algorithmus auf Basis eines Metamodells angewendet werden. Bei einer vorliegenden Konvergenz in einem lokalen Bereich kann dieser durch weitere Stützpunkte verfeinert werden. Dieses Vorgehen ähnelt der SRS-Methode von LS-OPT und gibt durch ein weiteres auflösen des Interessenbereiches Auskunft über eventuelle instabile, schmale Parameterbereiche. Schließlich soll die gefundene Struktur auch einer gewissen Streuung der Parameter robust entgegenwirken und nicht nur in einem stark eingegrenzten Bereich zutreffend reagieren.

#### 5 Ergebnisse der Optimierung

An dieser Stelle müssen wir leider auf die 5. LS-Dyna Tagung verweisen. Eine Darstellung der Ergebnisse wird in elektronischer oder gedruckter Form vorliegen.

#### 6 Zusammenfassung

Optimierung, parametrisierte Modelle, Morphing und Parameteridentifikation sind aktuelle Schlagwörter die Einzug in den Sprachgebrauch des CAE Bereiches gefunden haben. Bedeutung, Verständnis und deren Anwendung sind jedoch alles andere als alltäglich. Der Schritt in die routinierte Nutzung neuer Möglichkeiten soll hier an einem Beispiel in Kurzform gezeigt werden. Die Abwandlung der dargestellten Vorgehensweisen oder deren Integration in andere Forschungsbereiche ist denkbar und sogar praktikabel. Eines haben diese Methoden als Leid jedoch gemeinsam; es bedarf Zeit diese neuen Techniken anzuwenden, aber noch mehr Zeit die eigene Trägheit und Standardprozesse zu überwinden.

Die Anwendung der Strukturoptimierung für Crashlastfälle und kombinierte Disziplinen ist gemeinsames Ziel der Entwicklungen, führt aber bislang zu den unterschiedlichsten Lösungsansätzen. Die Gründe für die allgemein vorhandene Zurückhaltung gegenüber diesem Thema sind meist praktischer Natur. So werden die zu berücksichtigenden Randbedingungen schnell komplexer so bald eine realitätsnahe Struktur, wie z.B. hinsichtlich der späteren Fertigungsprozesse und Packaging, definiert werden müssen. Der vorgeschaltete Konstruktionsprozess eines parametrisierten Flächenmodells wird somit, abgesehen von den notwendigen Berechnungskapazitäten, der zeitintensivste und fehlerbehaftete Teil.

Zudem wird die geometrische Änderung durch die maßgeblichen Faktoren Kosten und Herstellung stark eingeschränkt, wobei die Berücksichtigung der Herstellungsprozesse im Detail betrachtet sehr oft als Killerphrase wirkt. Gerade Systemlieferanten sind gezwungenermaßen stark kostengebunden, was oft mit einer Gradwanderung bei der Funktionserfüllung einhergeht. Etwas widerwillig muss damit erkannt werden, dass es oft die Kosten sind, die es zu minimieren gilt. Funktionsgrößen und weiteren Kriterien sind dabei nur als Restriktion zu verstehen. Darüber hinaus sind es aber auch die spezifischen Standardprozesse und die „kleinen“ Hindernisse der verwendeten Solver und Preprozessoren, die z.B. eine gleiche Nummerierung oder Flächenorientierung der Elemente nicht garantieren können und somit die Automatisierung verhindern oder erschweren.

Eine kontrollierende Erfahrung bei Anwendung von solchen Optimierungsabläufen ist ratsam, um die Vorgänge des Strukturverhaltens und deren Entwicklungstendenz mit einer manuellen systematischen Optimierung abzugleichen. Die Kontrolle vieler Berechnungsergebnisse auf deren Plausibilität und Korrektheit bleibt momentan noch notwendig, um der Optimierung ein gewisses Vertrauen zu geben. Was letztendlich bleibt, ist die bequeme Erstellung einer hohen Variantenvielfalt und die Reduzierung der manuellen Modellierungen der Strukturen. Ein geordnetes und unterstützendes Analysieren der Ergebnisse ist somit in jedem Falle jedoch möglich.

Mit dem hier vorgestellten Beispiel wollen wir aber nicht nur negative Aspekte vorstellen und Warnhinweise aussprechen sondern auch einen Anstoß für die Erkennung der positiven Einsatzeigenschaften in dieser gezeigten oder ähnlicher Variation geben. Mit dem Beispiel der Motorhaube des Ford Explorer Modells, kann trotz genannter Probleme dargestellt werden, dass der Einsatz von SFE-CONCEPT über die Konzeptuntersuchungen hinaus vielversprechende Einsatzmöglichkeiten bereithält. Die vollständige Nutzung der CONCEPT Funktionen wie die

Bauteilbibliothek ermöglicht zudem auch einen einfacheren Austausch an Informationen zw. Konstruktion und Berechnung. Die vielseitig nutzbaren Ein- und Ausgabemöglichkeiten von CONCEPT machen es zu einem idealen Verbindungselement aller Konstruktions- und Berechnungsdisziplinen. Der in der Tat recht hohe Zeitaufwand für die Erstellung eines parametrischen FE-Modells für eine begrenzte Bauteilstruktur ist durchaus mit dessen Nutzen zu rechtfertigen.

Der Vorteil der parametrischen Strukturoptimierung gegenüber parameterfreien Methoden bei der Optimierung bestehender Strukturen, bzw. Strukturen in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, ist die Möglichkeit der Definition von Designvariablen. Dies ermöglicht dem Anwender, gezielt in einem Maße Einfluss auf den Optimierungsprozess zu nehmen, wie es bei parameterfreien Verfahren nicht der Fall ist. Der Einsatz von SFE CONCEPT in Verbindung mit Optimus und die Realisierung entsprechender Verbindungstechniken in den FE-Modellen versetzen den Anwender in die Lage, qualitativ hochwertige und verlässliche Optimierungsergebnisse zu liefern. Besonders für Optimierungsproblemen mit lineare Lastfällen, bzw. linearen Lastfallkombinationen, kann auf diesem Weg, auch bedingt durch die kürzeren Rechenzeiten im Vergleich zu nichtlinearen Problemstellungen, mit vertretbarem Ressourceneinsatz Lösungen gefunden werden.

## 7 Literature

- [1] LS-OPT online Handbuch für die Version 2.2, 2005,
- [2] Olschinka, C.: „Diplomarbeit: Studie zur Topologieoptimierung von Fahrzeugstrukturen hinsichtlich der Crashesicherheit“, 2005
- [3] Lobenwein, U.: „Diplomarbeit: Machbarkeitsstudie einer parametrischen Formoptimierung und Integration in den bestehenden CAE-Entwicklungsprozess“, 2006
- [4] Quadbeck, M.: „Einfluss der Materialdefinitionen in der Strukturoptimierung – EDAG interner Artikel, 2004
- [5] Quadbeck, M.: „Diplomarbeit: Optimierung von Crashkomponenten basierend auf parametrischen Entwurfsmodellen und assoziativen Berechnungsmodellen“, 2005
- [6] Quadbeck, M.: „Bamberg 2005“, 2005
- [7] SFE GmbH, SFE CONCEPT™ V3 Reference manual, 2005
- [8] Stuhec,U.; Zhou,S.;Shahidi,B.;Zimmer,H.;Prabhuwaingankar,M.: CAE Concept Design-a Key Enabler in Virtual Product Development: 11th International Conference on Human-Computer Interaction, Las Vegas, Nevada USA, July 22-27,2005
- [9] Hoppe, A.; Zimmer,H.; Widmann,U.; Papke,L.; et al: Multidisziplinäre Optimierung parametrischer Fahrzeugkomponenten: Entwicklungen im Karosseriebau, Hamburg, 4.- 5.Mai 2004: VDI Berichte 1833
- [10] Heiserer,D.; Zimmer,H.; Schäfer,M.; Holzheuer,Ch.;Kondziella,R.: Formoptimierung in der frühen Phase der Karosserieentwicklung: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Würzburg, 29.-30.September 2004: VDI Berichte 1846
- [11] Automobilentwurf durch Simulation und Optimierung; auto>opt Abschlussbericht [www.auto-opt.de] Juni 2005 ; gefördert vom BMBF Kz: 01 IR B01; Herausgeber: Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI
- [12] George Washington University

