

# Methoden und Prozesse zur Kostensenkung - Ein Status der Wandlungen im Fahrzeugentwicklungsprozess durch CAE-Methoden

Norbert Schulte-Frankenfeld, Mathias Brass, Andrea Pieck

Wilhelm Karmann GmbH, Osnabrück, Deutschland

## **Abstract:**

The use of simulations now means that extensive savings can be made in the design and development processes in the automotive industry.

Preventive and error-controlling effects to increase the efficiency and improvement of design quality and safety by the increased use of simulations are unmistakably evident. These are, however, difficult to quantify. The benefit of this improvement in processes has a decisive effect on the entire development processes.

The biggest savings are achieved by the removal of a whole series of prototypes and by the shortening of the development time.

Although the investment in testing in the development processes has been slightly reduced in part or has been increased in certain areas due to continuously increased requirements, considerable savings can be shown and quantified here by the use of simulations.

The direct product cost-optimization is a new and very promising use of simulations. On the basis of a multidisciplinary optimization and the use of a suitable cost-function a comprehensive loadcase cost-optimization in combination with the functional performance design can be fulfilled. This numerical process can run fully automatically.

The high numerical effort in addition to the accompanying complex CAE-process will, however, delay a rapid conversion as standard methods in the design and development processes.

An integration of the cost-functions in the present CAE-programmes is possible without too much trouble. This should be carried out in the short term in order to include cost aspects more closely in the development process. These functions should apply not only to the complex optimization process but also to the individual calculations of simple design modifications.

## **Keywords:**

Automotive development process, savings in effort and time, reduction in testing, reduction in costs, product cost-optimization, multidisciplinary optimization, MDO, cost-function, cost awareness, Karmann

Kostenreduktion durch virtuelle Entwicklung, direkte Kostenoptimierung, multidisziplinäre Optimierung, Kostenbewusstsein, Kostenfunktion, Produktkostenoptimierung, Karmann

## Einführung

Nach einem kurzen Überblick über die Entwicklung und Anwendung der Simulationstechniken, den daraus resultierenden Änderungen im automobilen Entwicklungsprozess und einigen Beispielen erreichter Kostenreduktionen durch Simulationseinsatz soll eine neue Simulationsanwendung – die direkte Kostenoptimierung mit CAE-Simulationen - vorgestellt werden.

Die grundlegenden Simulationstechniken zur Strukturauslegung in der Automobilindustrie haben sich in den letzten Jahren zu einem prognosesicheren und leistungsfähigen Auslegungstool entwickelt. Konnten anfangs nur einzelne Versuche durch Simulationen substituiert werden, so entfallen heute ganze Prototypenbaureihen in den Entwicklungsprojekten. Die dadurch erzielten Zeit- und Kosteneinsparungen sind immens.

Die Weiterentwicklung der Simulationsmethoden konzentrierte sich in der Vergangenheit im Wesentlichen auf die funktionale Auslegung in den einzelnen Disziplinen. Die fortschreitende Optimierung der Methoden und der CAE-Prozesse und die damit verbundene Reduzierung der Versuchsumfänge und der Entwicklungszeiten führte zu einer Reduzierung der Einmalkosten (Entwicklungskosten und Investitionen).

Die aktuellen Trends der multidisziplinären Optimierung zeigen weitere Potentiale für eine effektivere, disziplinenübergreifende Funktionsauslegung auf.

Eine direkte Kostenoptimierung der Produktkosten mit CAE-Simulationen wurde bisher jedoch wenig betrachtet.

Bei Karmann wurde auf Basis einer multidisziplinären Optimierung eine Methode zur direkten Produktkostenoptimierung entwickelt. In einem Pilotprojekt wurde diese Methode mit Erfolg angewendet.

Die Integration einer Kostenfunktion in die herkömmlichen FEM-Programme ist auch für Einzelvariantenberechnungen mit geringem Aufwand möglich und kann künftig zu ganz neuen Betrachtungen und Möglichkeiten der Kostenreduzierung führen.

## 1 Entwicklung der Simulationsmethoden

Der Einsatz von CAE-Simulationen hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt. Waren die Anwendungen in den 60er und 70er Jahren weitgehend durch „Nachrechnen“ und dem Bemühen der Berechnungsingenieure um Akzeptanz geprägt, so erfolgt heute die Fahrzeugauslegung weitgehend auf Basis prognosesicherer Berechnungsvorhersagen.

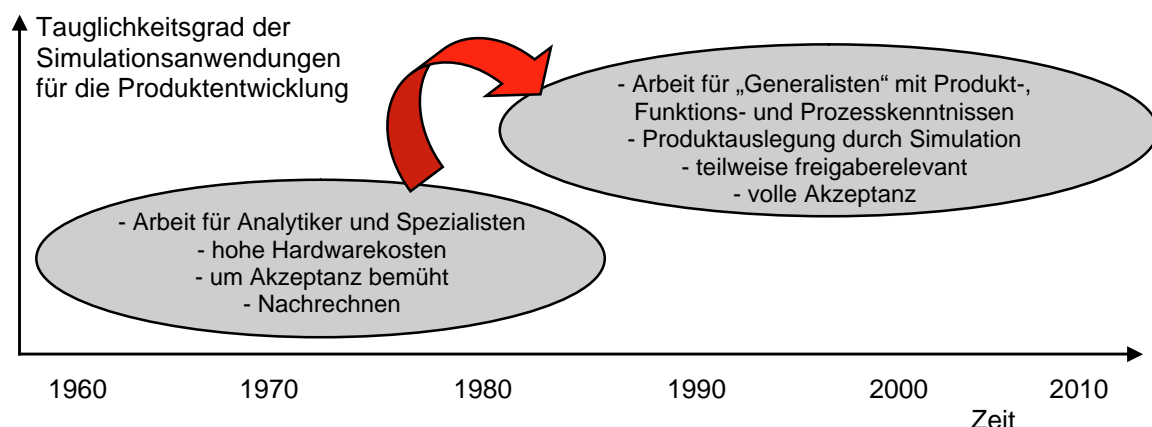


Bild 1: Charakterisierung der Simulationsanwendungen im Wandel der Zeit

Die Berechnungsmethoden haben sich in der Anwendungstiefe – immer detailliertere und komplexere Berechnungsmodelle, die ständig an Prognosesicherheit und detaillierten Aussageumfang zugenommen haben - und Anwendungsbreite – immer mehr Anwendungsgebiete wurden bis zur

Anwendungstauglichkeit im Automobilentwicklungsprozess erschlossen - kontinuierlich weiterentwickelt.

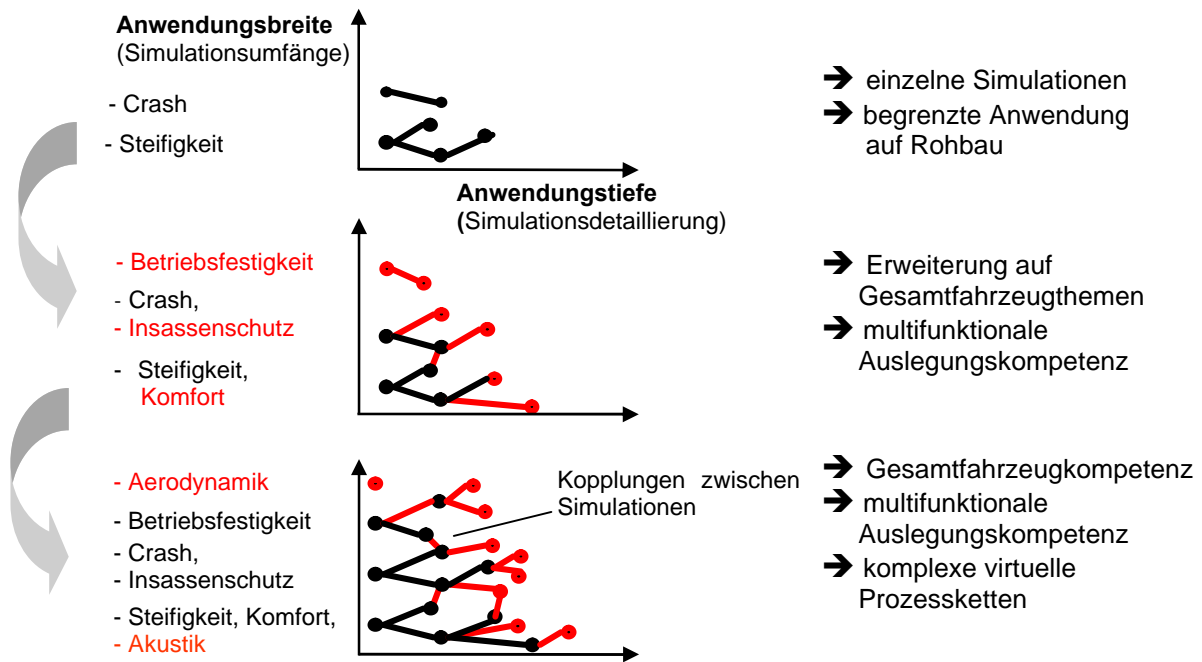


Bild 2: Kontinuierliche Weiterentwicklung der Simulationsanwendungen in der Anwendungsbreite und Anwendungstiefe

Die Berechnungsmethoden fanden mit einfachen Mehrkörpersimulationen, Steifigkeits- und Schwingungsberechnungen den Einzug in die Automobilentwicklung. Ab Ende der 80er Jahre ermöglichte die Beherrschung prognosesicherer Crashberechnungen die dimensionierende Auslegung des gesamten Fahrzeugaufbaus. Schnell etablierte sich diese Anwendung in den Entwicklungsabteilungen der Fahrzeughersteller und konnte frühzeitig den Konstruktionsprozess zur Ausgestaltung einer Rohkarosserie beeinflussen. Eine weitere Ausweitung der Simulationsmethoden erfolgte durch die virtuelle Auslegung und Optimierung von Rückhaltesystemen.

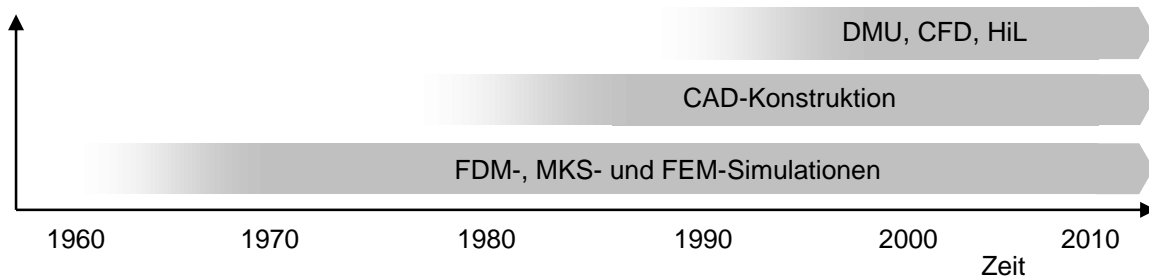


Bild 3: Einzug der virtuellen Entwicklungstools in den automobilen Entwicklungsprozess

Heute ist eine Fahrzeugentwicklung unter den gegebenen Zeit- und Kostenrahmenbedingungen durch die ständig zugenommenen funktionalen und gesetzlichen Anforderungen und eine dadurch bedingte Zunahme von Zielkonflikten ohne massiven Simulationseinsatz nicht mehr möglich. Beispiele hierfür sind sicherlich die Zunahme der Lastfallfülle im Sicherheitsbereich: Rückhaltesystemauslegung gemäß FMVSS 208 für den amerikanischen Markt sowie europäische Anforderungen nach Gesetz- und Rating-Verfahren, unterschiedliche Anforderungen für den Fußgängerschutz in Europa und Japan sowie Anforderungen zum Schutz bei Kopfaufprallsituationen im Fahrzeuginnenraum.

Aktuell erschließen sich dem Automobilentwicklungsprozess durch Weiterentwicklungen im Hardware- und Softwarebereich zunehmend Simulationsanwendungen in der Aerodynamik, EMV und Lackierprozessen, um weitere Lücken im virtuellen Entwicklungsprozess zu schließen.

## 2 Die Anwendung der Simulationsmethoden im Entwicklungsprozess

Derzeit werden die Simulationsmethoden vorwiegend in verschiedenen Entwicklungsdisziplinen getrennt eingesetzt. Obwohl in der Vergangenheit Optimierungsmethoden für Einzeldisziplinen und stark oder schwach gekoppelte Simulationsanwendungen in Co-Simulationen durchaus erfolgreich angewandt wurden, bleiben diese Methoden jedoch auf schmale Gebiete begrenzt und liefern somit für eine Gesamtfahrzeugauslegung nur ein lastfallspezifisches Suboptimum, bei dem Zielkonflikte mit Anforderungen aus anderen Disziplinen nicht berücksichtigt und gelöst werden. Der Entwicklungsprozess zur Definition und Optimierung eines Gesamtfahrzeuges basiert daher bisher im Wesentlichen auf menschliche Zusammenarbeit und Abstimmung durch SE-Arbeit in verschiedenen Entwicklungsteams. Eine systematische Verknüpfung verschiedener Disziplinen – und damit die Grundlage für eine übergreifende Optimierung - auf Basis numerischer Simulationsmethoden befindet sich gerade erst in den Anfängen.

Als viel versprechende Methode sind hier die Ansätze der **Multidisziplinären Optimierung (MDO)** zu sehen. Auf Basis verschiedener Simulationsverfahren, die sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt haben, können physikalisch unterschiedliche Disziplinen mathematisch in einen Modell gekoppelt und damit funktionsübergreifend optimiert werden.

Mit dieser Simulationsmethode können Fahrzeugstrukturen, beginnend mit einer Startkonfiguration, bzgl. einer Zielgröße (z. B. Gewicht) unter Einhaltung verschiedenster Anforderungen ausgelegt werden. Dabei werden während der Optimierungsiteration sich widersprechende Anforderungen beachtet, Anfangsverletzungen verschiedener Anforderungen in den Zielbereich geführt und die Zielgröße minimiert [1].

Aufgrund der hohen numerischen Aufwände haben sich diese Methoden jedoch im Entwicklungsprozess noch nicht etabliert.

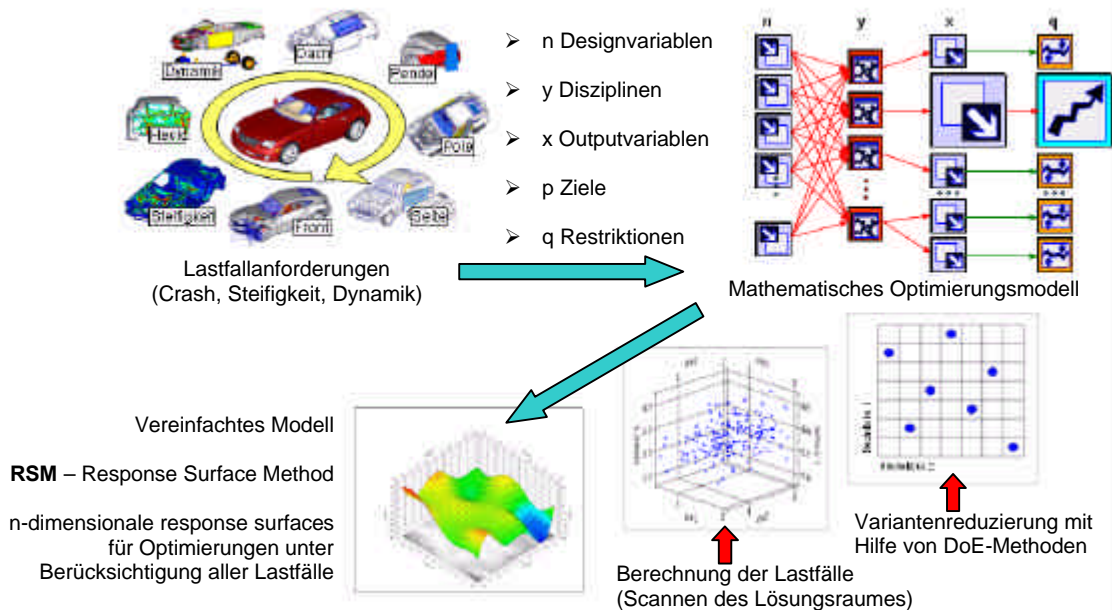


Bild 4: Multidisziplinärer Auslegungsprozess [1]

Bisher standen bei numerischen Optimierungsanwendungen in der Automobilindustrie vorwiegend funktionale Fahrzeugeigenschaften im Vordergrund. Eine Gewichtsoptimierung entspricht hierbei durch reduzierten Materialaufwand einer **indirekten Kostenoptimierung**.

Bei der MDO besteht jedoch durch Formulierung einer geeigneten Kostenfunktion die Möglichkeit disziplinenübergreifend eine **direkte Kostenoptimierung** für eine Fahrzeugstruktur durchzuführen. Ziel dieser Anwendung ist die direkte Kostenminimierung einer Fahrzeugstruktur durch gezielte Variation der Designparameter.

Eine Pilotuntersuchung hierzu wurde bei Karmann erfolgreich durchgeführt (Kapitel 5).

### 3 Wandlungen im Entwicklungsprozess

Die zunehmende Durchdringung des Entwicklungsprozesses mit Simulationenethoden hat in den letzten Jahren zu entscheidenden Prozessveränderungen geführt. Waren früher für eine Beschaffungsfreigabe für Werkzeuge (B-Freigabe) Versuche mit Prototypen (PT) unbedingt erforderlich, so erfolgt heute die Freigabe weitgehend ohne Prototypen auf Basis von Simulationsergebnissen. Die Meilensteine „B-Freigabe“ und „Verfügbarkeit erster Versuchsergebnisse mit Prototypen“ haben im Produktentstehungsprozess (PEP) ihre Reihenfolge getauscht.

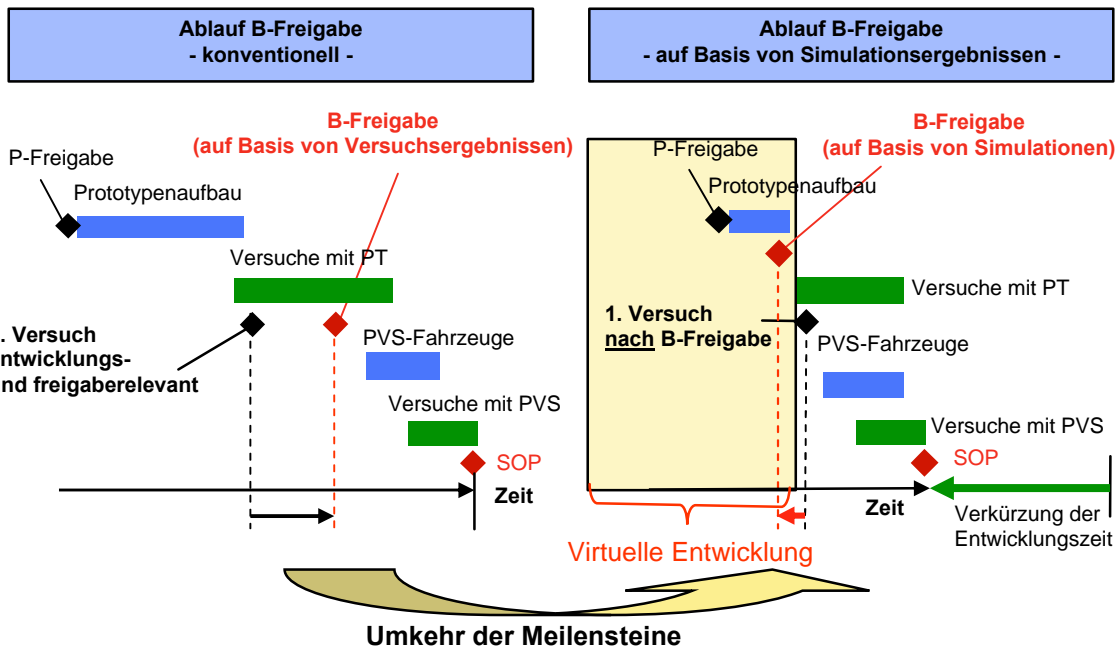


Bild 5: Umkehr wesentlicher Projektmeilensteine durch den Einsatz virtueller Methoden

Durch die virtuelle Entwicklung bis zur B-Freigabe konnten ganze Prototypen-Baustufen (BS) eingespart und somit die Entwicklungszeit deutlich reduziert werden.

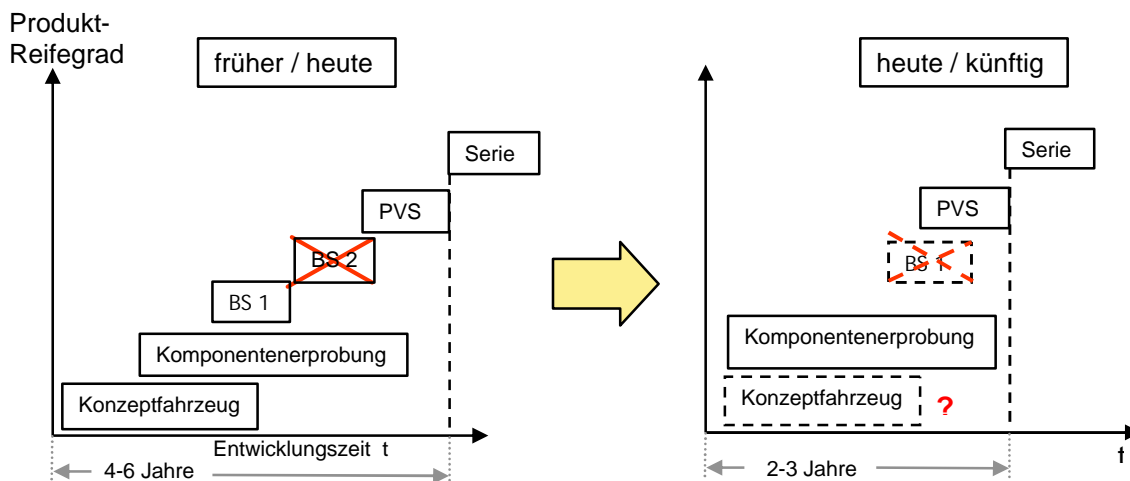


Bild 6: Reduzierung von Prototypen-Baustufen (BS)

Sah der frühere Entwicklungsprozess noch den Bau von Konzeptfahrzeugen, Komponentenerprobungen und den Aufbau von 2-3 Baustufen unterschiedlicher Prototypenreihen vor, so wird heute diskutiert, ob der Aufbau eines Konzeptfahrzeuges oder einer Prototypen-Baustufe nötig ist. Diese Entscheidung hängt jedoch auch stark von der Art des Entwicklungsprojektes ab. Handelt es sich um eine komplette Neuentwicklung mit hohem Innovationsgrad, so sind auch heute noch Prototypen zur Entwicklungsabsicherung nötig. Handelt es sich jedoch um eine Derivatentwicklung auf Basis eines existierenden Fahrzeuges, so kann auf den Aufbau von Prototypen verzichtet werden. Die

ersten Versuche an realen Fahrzeugen werden dann an Produktionsvorserienfahrzeugen (PVS) durchgeführt. Die Bedeutung von Komponentenversuchen nimmt jedoch eher zu, da eine rein virtuelle Entwicklung auch in absehbarer Zeit nicht möglich ist.

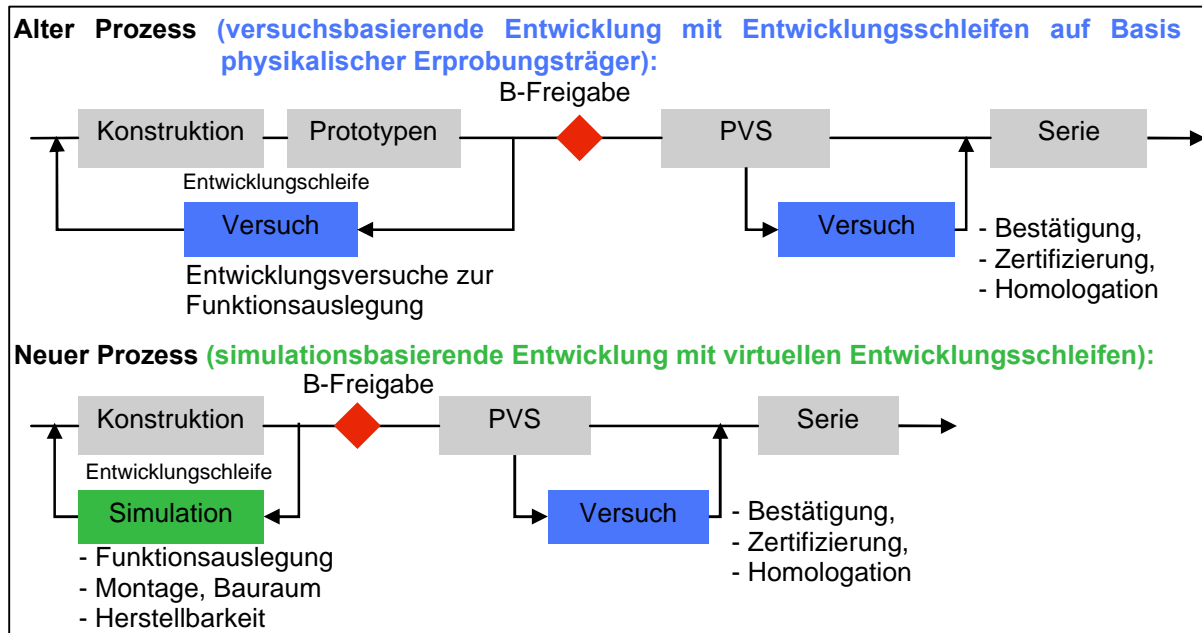


Bild 7: Versuchs- und simulationsbasierender Entwicklungsprozess

#### 4 Beispiele erreichter Kostenreduktionen durch Simulationseinsatz

Kostenreduzierungen bei Fahrzeugen können grob in zwei Oberkategorien eingeteilt werden.

- Zum Einen sind es betriebswirtschaftliche Kosten, die direkt die Herstellung eines Fahrzeuges betreffen,
- zum Anderen sind es volkswirtschaftliche und konsumentenrelevante Kosten, die sich während des Fahrzeugbetriebes im Gebrauch einstellen.

Kostenarten		Beiträge zur Kostenreduzierung durch Simulationseinsatz
Herstellkosten	Einmalkosten (Entwicklungskosten und Investitionen)	Präventive Kostenvermeidung <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vermeidung von Entwicklungsfehlern</li> <li>- Erhöhung der Entwicklungsqualität</li> <li>- Verbesserte Entscheidungsfindung</li> <li>- robuste Auslegung</li> <li>- Reduzierung von Änderungsmaßnahmen und Änderungskosten (Werkzeugkosten)</li> </ul>
		Reduzierung von Entwicklungsversuchen
		Verkürzung der Entwicklungszeit
	Produktkosten (Kosten pro Fahrzeug)	Steigerung der Entwicklungseffizienz und Produktqualität <ul style="list-style-type: none"> <li>- Versuchsdurchführung und -analyse</li> <li>- zielgerichtete Konstruktion</li> </ul>
Gewichtsoptimierung Optimierung der Materialauswahl		
Kosten durch Fahrzeugnutzung	Treibstoffkosten	$c_w$ -Wert-Optimierung und Wirkungsgradverbesserung (Motoroptimierung)
	Reparaturkosten	Reparaturgerechte Auslegung durch Low-Speed-Crashsimulation und Pendelschlagsimulationen
	Lebensdauer	Vermeidung von Dauerschäden und Bauteilausfällen
	Unfallfolgekosten	Verminderung der Unfallfolgekosten durch verbesserte Struktur- und Rückhaltesystemauslegung

Tabelle 1: Kostenarten und Beispiele für Kostenreduzierungen durch Simulationseinsatz

## 4.1 Herstellkosten

### 4.1.1 Einmalkosten (Entwicklungskosten und Investitionen)

#### 4.1.1.1 Präventive Kostenvermeidung

#### Fehlervermeidung, verbessertes Systemverständnis, Erhöhung der Entwicklungsqualität

Während des Entwicklungsprozesses bis zur Freigabe von Serienbetriebsmitteln werden zahlreiche Designstände und Konstruktionsentwürfe durch Variantenrechnungen bzgl. der Herstellbarkeit und der Funktionserfüllung bewertet.

Dadurch ergibt sich bis zum Freigabetermin ein kontinuierlicher, iterativer Verbesserungsprozess.

Die Visualisierung des Systemverhaltens (Strömungs- und Schwingungsverhalten, Temperatur- und Feldverteilung, Deformationsverhalten und Kinematiken, etc.) ermöglicht ein tieferes Systemverständnis und macht nötige Design- oder Konstruktionsänderungen offensichtlich.

Die Durchführung stochastischer Simulationen erlaubt die Berücksichtigung von Streuungen und Toleranzen und ermöglicht somit eine robuste Auslegung [2].

Durch die geschilderten Prozesse werden Entwicklungsfehler frühzeitig erkannt und unnötige Arbeiten vermieden. Die Entwicklungsgüte und -qualität wird entscheidend angehoben. Das Fahrzeug hat zu einem früheren Zeitpunkt einen wesentlich höheren Reifegrad.

Dadurch werden Versuche mit negativen Ergebnissen und kostenintensive Änderungen an Werkzeugen vermieden.

#### Projektentscheidungen

Die Verfügbarkeit von Simulationsergebnissen zur Erfüllung der wichtigsten an einem Fahrzeug gestellten Anforderungen auf Basis eines einheitlichen Design- und Konstruktionsstandes im frühen Entwicklungsstadium gibt den Entscheidungsträgern eine fundierte und sichere Entscheidungsbasis [3].

Das Frontloading durch den frühen Einsatz von Simulationsmethoden führt zu mehr Kenntnissen über die Produkteigenschaften, zu einem Zeitpunkt, in dem wesentliche Entscheidungen zur Produktdefinition getroffen werden müssen. Durch die höhere Entwicklungssicherheit können Fehlentscheidungen mit weitreichenden Kostenkonsequenzen vermieden werden.

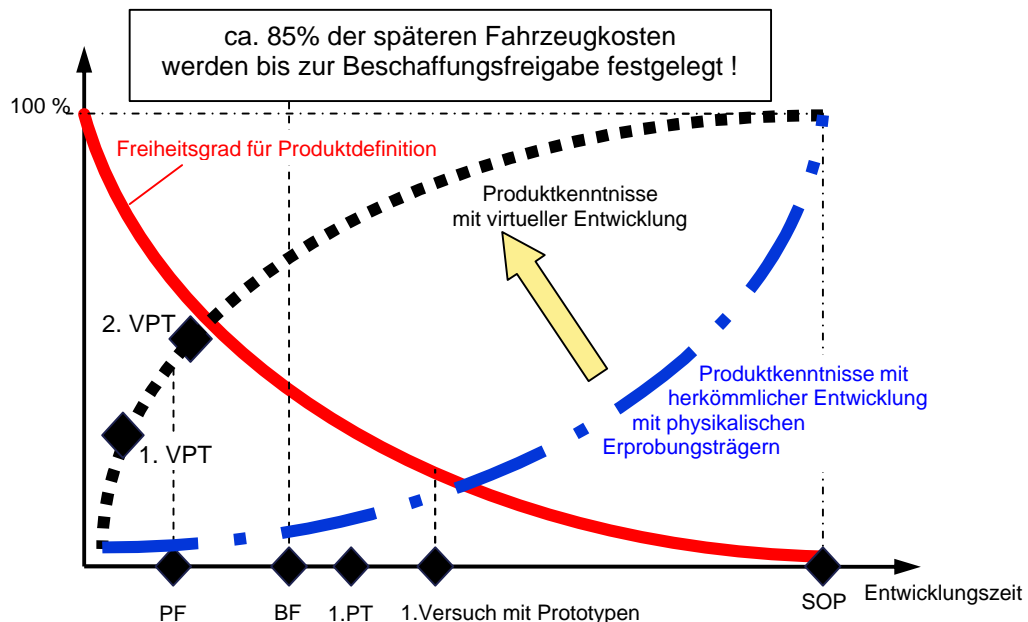


Bild 8: Höherer Produktkenntnisstand zu einem frühen Zeitpunkt durch virtuellen Entwicklung

- PF – Planungs- oder Prototypenfreigabe
- BF – Beschaffungsfreigabe (Freigabe zur Erstellung der Serienfahrzeuge)
- PT – Prototyp
- VPT – virtueller „Prototyp“
- SOP – Start of Production



## 4.1.1.2 Reduzierung von Entwicklungsversuchen

**Frontschutz-Rückhaltesystemauslegung**

Mit in Kraft treten der neuen Regulierungen für das US-Gesetz FMVSS 208 ab September 2006 haben sich hier die Entwicklungsanforderungen sprunghaft erhöht. Zusätzlich zu den bisherigen Lastfällen für einem 50% Mann sind Lastfälle für eine 5% Frau gegurtet (aktiv), ungegurtet (passiv) und für einen Offsetaufprall auf eine deformierbare Barriere hinzugekommen. Weiterhin wurden zusätzlich die Insassenkriterien erweitert und verschärft und ‚Out of Position‘-Lastfälle (OoP) eingeführt. Dies führt zu einer deutlichen Zunahme der Lastfälle die zeitgleich bei der Auslegung für eine weltweite Zulassung der Fahrzeuge berücksichtigt werden müssen:

1996: 12 Lastfälle	2006: 26 Lastfälle
FMVSS208, 0°, starr, aktiv, 48 km/h, 50% m, Fahrer	FMVSS208, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 50% m, Fahrer
FMVSS208, 0°, starr, passiv, 48 km/h, 50% m, Fahrer (Schlitten)	FMVSS208, 0°, starr, passiv, 40 km/h, 50% m, Fahrer
FMVSS208, +30°, starr, aktiv, 48 km/h, 50% m, Fahrer	FMVSS208, +30°, starr, passiv, 40 km/h, 50% m, Fahrer
FMVSS208, -30°, starr, aktiv, 48 km/h, 50% m, Fahrer	FMVSS208, -30°, starr, passiv, 40 km/h, 50% m, Fahrer
FMVSS208, 0°, starr, aktiv, 48 km/h, 50% m, Beifahrer	FMVSS208, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 5% f, Fahrer
FMVSS208, 0°, starr, passiv, 48 km/h, 50% m, Beifahrer (Schlitten)	FMVSS208, 0°, starr, passiv, 40 km/h, 5% f, Fahrer
FMVSS208, +30°, starr, aktiv, 48 km/h, 50% m, Beifahrer	FMVSS208, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 40 km/h, 5%, Fahrer
FMVSS208, -30°, starr, aktiv, 48 km/h, 50% m, Beifahrer	FMVSS208, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 50% m, Beifahrer
US-NCAP, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 50% m, Fahrer	FMVSS208, 0°, starr, passiv, 40 km/h, 50% m, Beifahrer
US-NCAP, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 50% m, Beifahrer	FMVSS208, +30°, starr, passiv, 40 km/h, 50% m, Beifahrer
ECE-R94, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 56 km/h, 50% m, Fahrer	FMVSS208, -30°, starr, passiv, 40 km/h, 50% m, Beifahrer
ECE-R94, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 56 km/h, 50% m, Beifahrer	FMVSS208, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 5% f, Beifahrer
	FMVSS208, 0°, starr, passiv, 40 km/h, 5% f, Beifahrer
	FMVSS208, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 40 km/h, 5%, Beifahrer
	OoP-Anforderungen Fahrerseite 5% f
	OoP-Anforderungen Beifahrerseite 1Y Kind, 3Y Kind, 6Y Kind
	US-NCAP, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 50% m, Fahrer
	US-NCAP, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 50% m, Beifahrer
	ECE-R94, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 56 km/h, 50% m, Fahrer
	ECE-R94, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 56 km/h, 50% m, Beifahrer
	Euro-NCAP, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 64 km/h, 50% m, Fahrer
	Euro-NCAP, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 64 km/h, 50% m, Beifahrer
	Japan-NCAP, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 50% m, Fahrer
	Japan-NCAP, 0°, starr, aktiv, 56 km/h, 50% m, Beifahrer
	IIHS, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 64 km/h, 50% m, Fahrer
	IIHS, 0°, 40% Offset, def., aktiv, 64 km/h, 50% m, Beifahrer

Tabelle 2: Entwicklung der Lastfälle für die Frontschutz-Rückhaltesystemauslegung

Für die Auslegung eines Rückhaltesystems bedeutet dies einen erheblichen Mehraufwand.

- Gurtkraftbegrenzer
- Gurtstraffer
- Airbagausströmöffnung
- Airbag Massenstrom
- Airbag Form
- Airbag Volumen
- Crashpuls
- Dummy Position x
- Dummy Position z
- Zündzeitpunkt Airbag
- Zündzeitpunkt Gurtstraffer
- Fußaufstandspunkt
- Sitzsteifigkeit
- Sitzlehnenneigung
- Lenkradverschiebung

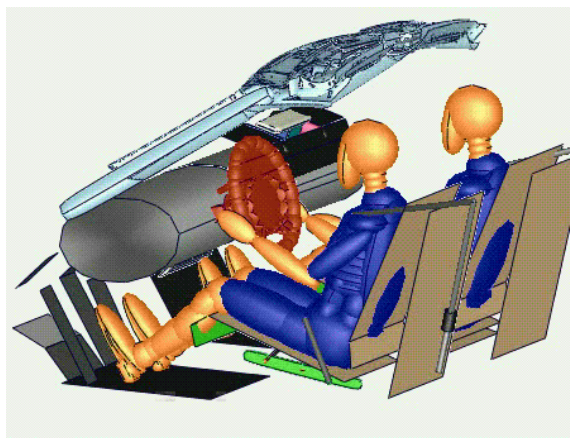


Bild 9: Einflussparameter bei der Auslegung des Rückhaltesystems

Berücksichtigt man bei den 15 Hauptauslegungsgrößen für das Rückhaltesystem jeweils 3 Variationsmöglichkeiten so kommt man auf  $3^{15} = 14$  Millionen Kombinationsmöglichkeiten. Betrachtet



man dann die 7 Auslegungslastfälle für die FMVSS 208-Anforderungen für nur eine Insassenseite so ergeben sich insgesamt 98 Millionen Lastfälle, die theoretisch bei der Auslegung betrachtet werden können.

Aus dieser Darstellung wird schnell ersichtlich, dass eine Systemauslegung nur noch durch massive Simulationsunterstützung möglich ist. Eine Einschränkung der Kombinationsmöglichkeiten ist durch Erfahrung und durch die Nutzung von DoE-Methoden (Design of Experiments) möglich. Zur Auslegung des Systems werden stochastische Simulationsmethoden zur Ermittlung von Korrelationen und Sensitivitäten herangezogen. Weiterhin bieten diese Methoden die Möglichkeit zur Optimierung und zu Robustheitsuntersuchungen.

Die Systemauslegung und die Definition der Einzelkomponenten kann bei dem Komplexitätsgrad nur noch durch zahlreiche Simulationsrechnungen erfolgen, bevor durch Komponentenversuche und Schlittenversuche das Komponenten- und Systemverhalten verifiziert und durch Detailoptimierungen festgelegt wird. Eine Rückhaltesystementwicklung basierend auf Versuchen wäre in heutigen Projekten aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich.

### Auslegung Kopfaufprallschutz gemäß FMVSS 201

Bei den Kopfaufprallanforderungen ergeben sich neben den ca. 17-20 gesetzlich definierten Aufprallpunkten zur sicheren Erfüllung der Gesetzesanforderungen eine Fülle von weiteren Aufprallpunkten, die zusätzlich abgesichert werden müssen. Bei einem geschlossenen Pkw können dies bis zu 40 Aufprallpunkte sein.

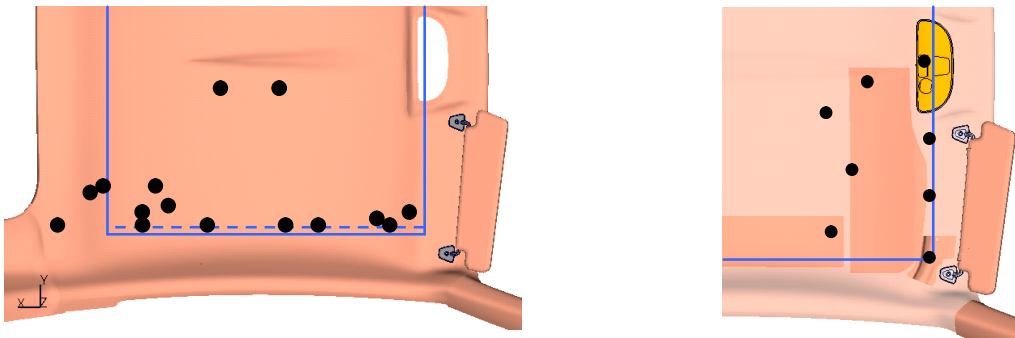


Bild 10: Beispiele für Aufprallpunkte im Fahrzeuginnenraum im Upper Roof-Bereich

Eine versuchsbasierende Entwicklung ist hier nicht mehr möglich. Die hohe Anzahl an Punkten würde einen immensen Versuchsaufwand bedeuten. Dies würde auch voraussetzen, dass eine genügend hohe Anzahl von serienähnlichen Prototypenbauteilen vorhanden ist.

Durch eine simulationsbasierende Entwicklung können sehr viele Punkte schon sehr früh im Projekt untersucht werden und das Design und die Innenverkleidung so ausgelegt werden, dass die Gesetzeserfüllung möglich ist. Unkritische Punkte unterhalb eines gewissen HIC-Wertes werden nur noch vereinzelt zur Verifizierung der Simulationsergebnisse abgeprüft (Bereich C in Bild 11). Für nur noch wenige Punkte mit kritischen Randbedingungen werden Absicherungs- bzw. Entwicklungsversuche eingeplant (Bereich A und B in Bild 11).

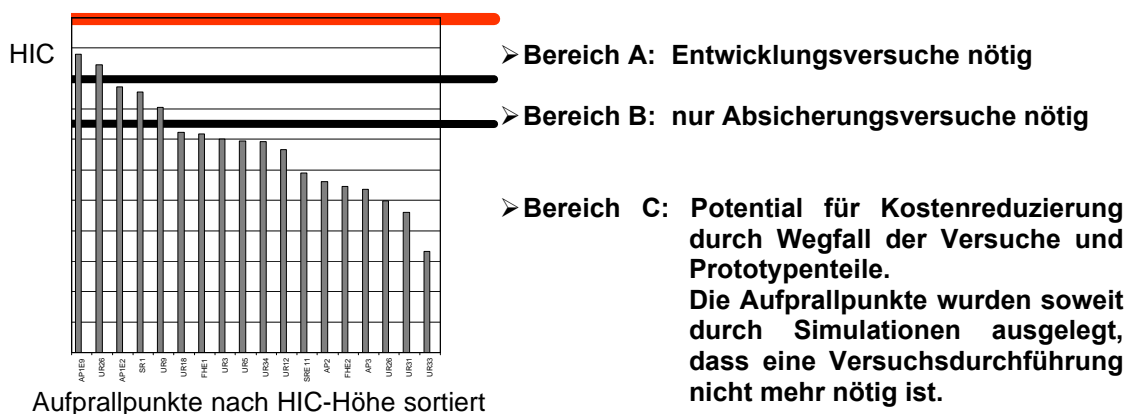


Bild 11: Minimierung des Versuchsaufwandes durch virtuelle Auslegung

Mit dieser Vorgehensweise kann der Versuchsaufwand erheblich reduziert werden. Die grössten Kosteneinsparungen werden jedoch durch die Einsparung der nicht mehr notwendigen Prototypenbauteile und dem deutlich früheren Vorliegen der Ergebnisse erzielt.

### Auslegung Fußgängerschutz

Seit 2005 müssen in Europa und Japan für die Zulassung neu entwickelter Fahrzeugtypen auch Anforderungen für den Fußgängerschutz erfüllt werden. Durch unterschiedliche Gesetzesanforderungen für Europa und Japan sowie EuroNCAP-Anforderungen ergeben sich im Aufprallbereich für die unterschiedlichen Kopfpaktoren bis zu 200 Aufprallpunkte, die gewisse Grenzwerte für den HIC-Wert nicht überschreiten dürfen. Diese aufwendige Absicherung des Frontbereiches muß für jeden neuen Design- oder Konstruktionsstand und für unterschiedliche Packagekonfigurationen im Motorraum durchgeführt werden.

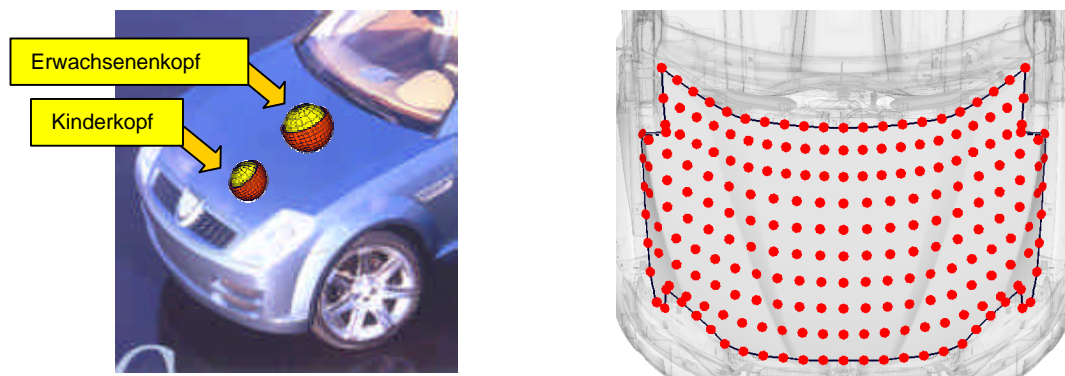


Bild 12: a) Lastfall Fußgängerschutz-Kopfaufprall b) ca. 200 abzusichernde Aufprallpunkte auf einer Fronthaube

Auch hier ist leicht ersichtlich, dass eine Entwicklung bei den gegebenen Zeit- und Kostenrahmenbedingungen nur noch mit entsprechenden Simulationsmethoden möglich ist. Eine vergleichende Kostenrechnung für Versuche und Prototypenaufbauten, die ohne Simulationseinsatz nötig wären, gegenüber einer weitgehend virtuell durchgeführten Entwicklung ergibt auch hier immense Kosteneinsparungen für eine virtuellen Entwicklung.

Zur Veranschaulichung der Einspareffekte durch Simulationseinsatz wird beispielhaft eine vereinfachte Aufwandsabschätzung mit groben Annahmen aufgestellt:

Für die gesamte Entwicklung werden nur 3 Konstruktions- bzw. Designstände untersucht

2 Motor-/Getriebevarianten für das Fahrzeug (Motorraumpackage)

200 Aufprallpunkte erfordern ca. 50 Prototypen-Frontklappen

Der Versuchsaufwand für dieses Szenario beträgt damit ca.  $3 \times 2 \times 200 = 1200$  Kopfaufprallversuche auf die Fronthaube und  $3 \times 2 \times 50 = 300$  Fronthauben als Prototypenbauteile.

In einer realen Entwicklung ist von einem noch höheren Aufwand auszugehen, da für kritische Punkte oft mehrere Schussversuche nötig sind, mehr als drei Konstruktionsstände und mehr als zwei Motorraumpackagestände betrachtet werden und die unterschiedlichen Gesetzesanforderungen für Japan und Europa und Ratinganforderungen für EuroNCAP zusätzliche Versuche erfordern.

Durch Simulationseinsatz können von den 200 abzusichernden Aufprallpunkten – ähnlich wie bei der Klassifizierung der Aufprallpunkte bei der Kopfaufprallbetrachtung - ca. 90% so ausgelegt und optimiert werden, das eine Versuchsabprüfung nicht mehr erforderlich ist.

Der Aufwand der nötigen Versuche und Prototypenbauteile reduziert sich also ebenfalls um ca. 90% !.

### **Auslegung der passiven Sicherheit**

In [7] wurden in einer Fallstudie die möglichen Kosteneinsparungen durch vermehrten Simulationseinsatz bei der Entwicklung der passiven Sicherheit zweier Fahrzeugtypen einer Baureihe untersucht. Es wird der Entwicklungsprozess für Fahrzeug A (Markteinführung 1995) und für Fahrzeug B (Markteinführung 2003) verglichen. Dabei werden die gesamten Entwicklungskosten – Versuchsfahrzeuge, Material, Personalkapazität, Kosten zur Simulations- und Versuchsdurchführung – berücksichtigt. Der Vergleich zeigt trotz deutlich höherer Anforderungen und einer Reihe von Produktinnovationen beim neueren Fahrzeug eine Kostenreduzierung der Entwicklungskosten von 19% auf. Bei einer theoretischen Betrachtung, bei der der Entwicklungsaufwand des älteren Fahrzeuges mit den neueren Methoden des Jahres 2003 bewertet wurde, ergeben sich sogar Kostenreduzierungen von 43% - allein durch die Fortschritte der virtuellen Produktentwicklung begründet.

Diese Aussagen bestätigen sich laut [7] auch für weiter durchgeführte Untersuchungen wie Missbrauchs- und Fahrdynamiksimulationen.

### **Auslegung von Fahrdynamikeigenschaften**

„Fahrzeuge werden immer mehr individualisiert. Bestimmte Fahrzeugbaureihen bestehen mittlerweile aus bis zu 100 Varianten mit unterschiedlichen Motorisierungen, Getrieben, Fahrwerksabstimmungen und Regelsystemen.

Die vollständige Erprobung all dieser Varianten in den immer kürzer werdenden Entwicklungszeiträumen ist allein mit den klassischen Fahrversuch nicht mehr zu bewältigen“ [4].

Ist das Basisfahrzeug gut validiert, lassen sich die Varianten der unterschiedlichen Aufbauzustände schnell und gut bewerten.

Die Aufbauzeiten für ein Simulationsmodell beim Ändern der Fahrwerksabstimmung oder beim Einbau anderer Komponenten betragen nur wenige Minuten. Dadurch können sehr schnell Parametervariationen und zusätzliche Robustheitsuntersuchungen zur Auslegung von z. B. ESP-Reglern durchgeführt werden, die im Fahrversuch nur sehr zeitintensiv durchgeführt werden können.

Die aufgeführten Beispiele belegen sehr deutlich, dass die heute erreichte, hochwertige Fahrzeugtechnologie ohne Simulationseinsatz nur mit erheblich mehr Zeit- und Kostenaufwand erreichbar wäre. Die Simulationsmethoden sind im heutigen Entwicklungsprozess somit unverzichtbar geworden.

#### *4.1.1.3 Verkürzung der Entwicklungszeit*

Die Entwicklungszeiten für Fahrzeuge konnten in den letzten 10-15 Jahren von ca. 4-6 Jahren auf ca. 2-3 Jahre reduziert werden (Kapitel 3). Der Chrysler Crossfire [6], entwickelt von Karmann, oder der Fiat Bravo [5] sind Beispiele für Fahrzeuge, die unter 2 Jahren entwickelt wurden. Die Entwicklung erfolgte dabei weitgehend virtuell, beim Crossfire wurden keine Entwicklungsprototypen eingesetzt. Die Kostenreduktion durch den Entfall ganzer Prototypenbaustufen sowie die Verkürzung des Entwicklungszeitraumes um mehrere Jahre sind dabei immens und dürften sich mindestens im mehrstelligen Millionenbereich pro Entwicklungsprojekt bewegen.

#### *4.1.1.4 Steigerung der Entwicklungseffizienz und Produktqualität*

### **Konstruktion**

Die grundlegende, dimensionierende Auslegung eines Fahrzeugkonzeptes kann in der frühen Projektphase mit CAE-Methoden erfolgen, ohne umfangreiche Konstruktionsstände zu erstellen. Durch die frühzeitige Simulationsbewertung verschiedener Konzepte und Entwürfe kann eine Vielzahl unterschiedlicher Herstell-, Fertigungs-, Material- und Fügekonzepte bewertet und kostenseitig optimiert werden. Nach Bewertung wird nur die zielführende Variante auskonstruiert und weiter verfolgt.

### **Versuch**

Das Systemverhalten ist durch Simulationen vor der Versuchsdurchführung weitgehend bekannt. Versuche können zielorientiert durchgeführt werden. Messaufnehmer werden dort platziert, wo die nötigen Informationen aus dem Versuch optimal ermittelt werden können. Beschädigungen am Messequipment durch unvorhergesehene Systemreaktionen werden vermieden, die Messbereiche der Messaufnehmer sind auf die Höhe der physikalischen Messgrößen optimal justiert.

Die Versuche sind dadurch wesentlich effizienter, weisen geringere Fehlerquoten auf und der Informationsgehalt der Versuche wird gesteigert.

Die Analyse und Interpretation der Versuchsergebnisse kann durch eine Synthese mit den Simulationsergebnissen schneller und effektiver erfolgen. Durch Simulationen können physikalische Größen ausgewertet werden, die messtechnisch nicht erfassbar sind oder wo durch die Messung das Ergebnis beeinflusst würde.

Simulationen können den Einfluss einzelner Parameter auf das Ergebnis objektiv aufzeigen, da die einzelnen Rechenläufe reproduzierbar und frei von Fertigungstoleranzen und Versuchsstreuungen sind.

Trotz verkürzter Entwicklungszeiten konnten so wesentliche Qualitätsmerkmale wie Leichtbaugüte, Komfort und Sicherheit der Fahrzeuge kontinuierlich gesteigert werden.

#### 4.1.2 Produktkosten

##### 4.1.2.1 Gewichtsoptimierung

Die Gewichtsoptimierung ist schon seit langem eine etablierte Simulationsanwendung. Die Reduzierung des Gewichtes bei Beibehaltung der funktionalen Eigenschaften führt durch die Materialeinsparungen zu einer Kostenreduzierung. Diese Methode ist sehr effektiv bei 3D-Freiformgeometrien, aber auch für Blechstrukturen führt die Blechdickenoptimierung zu deutlichen Gewichtseinsparungen.

## 4.2 Kosten durch Fahrzeugnutzung

Auf die Kostenreduzierungen, die sich erst beim Gebrauch eines Fahrzeuges einstellen und sich nicht unmittelbar im Herstellungsprozess niederschlagen, soll hier nur andeutungsweise eingegangen werden.

#### 4.2.1 Benzinverbrauch: Aerodynamik ( $c_w$ -Wert Optimierung), Motorenoptimierung

Die in den letzten Jahren gemachten deutlichen Fortschritte in der Aerodynamiksimulation ergeben ganz neue Möglichkeiten in der Formoptimierung in der frühen Entwurfsphase und bei der weiteren Detailoptimierung während des ganzen Entwicklungsprozesses.

#### 4.2.2 Reparaturkosten: Low-Speed-Crash, AZT-Crash

Auch im Bereich der Reparatur- und Versicherungseinstufungslastfälle sind die Anforderungen gestiegen und weitere Lastfälle hinzugekommen (IIHS-Rating). Dennoch sind die Fahrzeuge immer reparaturfreundlicher und unempfindlicher gegenüber leichten Kollisionen geworden.

#### 4.2.3 Lebensdauer: Betriebsfestigkeit

Zunehmend steifer werdende Karosserien und die komplex ausgebaute, virtuelle Prozesskette zur Betriebsfestigkeitsauslegung führen zu deutlich zuverlässigeren und langlebigeren Fahrzeugen.

#### 4.2.4 Verminderung der Unfallschwere für Insassen und Passanten: Fahrzeugsicherheit

Die Statistik der Unfallopfer und der Fahrzeugzulassungen zeigt beeindruckend die Erfolge der Fahrzeugsicherheitsentwicklung auf. Diese Erfolge basieren auch zu einem grossen Teil auf die Simulationsunterstützung zur Auslegung immer sicherer Fahrzeuge und immer komplexerer Rückhaltesysteme.

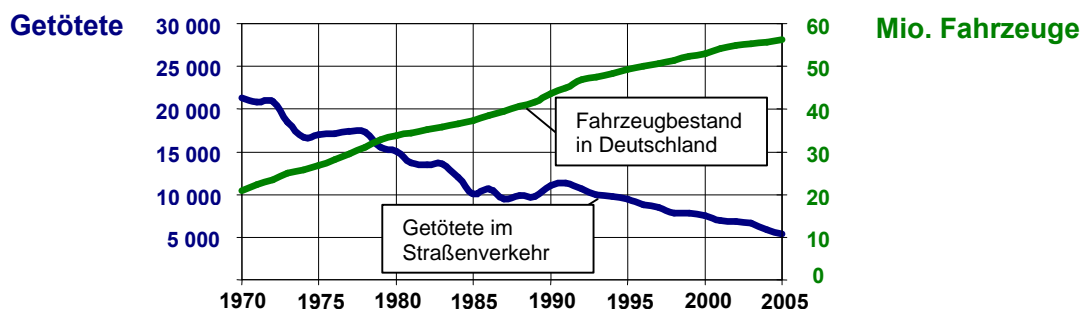


Bild 13: Unfallstatistik für Deutschland von 1970 bis 2005 /Quelle: Statistisches Bundesamt/

## 5 Direkte multidisziplinäre Kostenoptimierung (MDK)

Die multidisziplinäre Optimierung wurde bereits in Kapitel 2 als Simulationsmethode zur Auslegung einer Fahrzeugstruktur unter Berücksichtigung verschiedener Disziplinen und Lastfälle vorgestellt. Der wesentliche Fortschritt dieser Methode liegt in der mathematischen Kopplung und der gleichzeitigen Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen [1]. Dadurch werden Zielkonflikte bei der Auslegung automatisch gelöst und die Struktur bezüglich einer Zielgröße optimiert.

Bei der direkten multidisziplinären Kostenoptimierung werden die Produktkosten als Optimierungsziel definiert. Hierzu ist die Aufstellung einer Kostenfunktion  $K$  nötig, die die freien Auslegungsparameter zur Strukturauslegung beinhaltet. In einem Pilotprojekt bei Karmann wurde diese neue Simulationsanwendung für die kostenoptimierte Auslegung einer Fahrzeugstruktur in konventioneller Stahlblech-Schalenbauweise methodisch entwickelt und die Anwendbarkeit nachgewiesen.

Die laufenden Produktkosten eines Fahrzeuges setzen sich aus den Materialkosten und den Fertigungskosten für die jeweiligen Bauteile zusammen. Aufgrund der stark gestiegenen Stahlpreise beträgt der Materialkostenanteil ca. 60%-80% der Herstellkosten für ein Stahlblech-Umformteil. Als kostenbestimmender Faktor für eine Produktkostenoptimierung müssen daher die Materialkosten minimiert werden.

Als Designparameter für die Materialkostenoptimierung werden die Materialien, ihre Güten und die Wandstärken gewählt.

In die Kostenfunktion  $K$  gehen zusätzlich der Materialbasispreis und die Platinengröße, sowie einige Preiszuschläge in Abhängigkeit von der Platinenbreite bzw. der Coilbreite und der Blechstärke ein.

$$K = f(\text{Materialbasispreis, Material, Blechdicke, Platinengröße})$$

Auf Basis der multidisziplinären Optimierung wurde diese Kostenfunktion mit der SRSM-Methode (Successive Response Surface Method, Bild 4) für fünf unterschiedliche Crash-Lastfälle, einem statischen Steifigkeitslastfall und einer Modalanalyse mit dem Programmen LS-OPT, LS-DYNA und PERMAS optimiert.

Ausgangspunkt der Kostenoptimierung war ein Konstruktionsstand, der bereits alle funktionalen Anforderungen an die Struktur erfüllte. Durch die multidisziplinäre Kostenoptimierung (MDK) konnte eine Kostenreduzierung der Fahrzeugstruktur von ca. 12% durch Variation der Designparameter erzielt werden. Bild 14 zeigt die Änderung der Zielwerte für verschiedene Anforderungen.

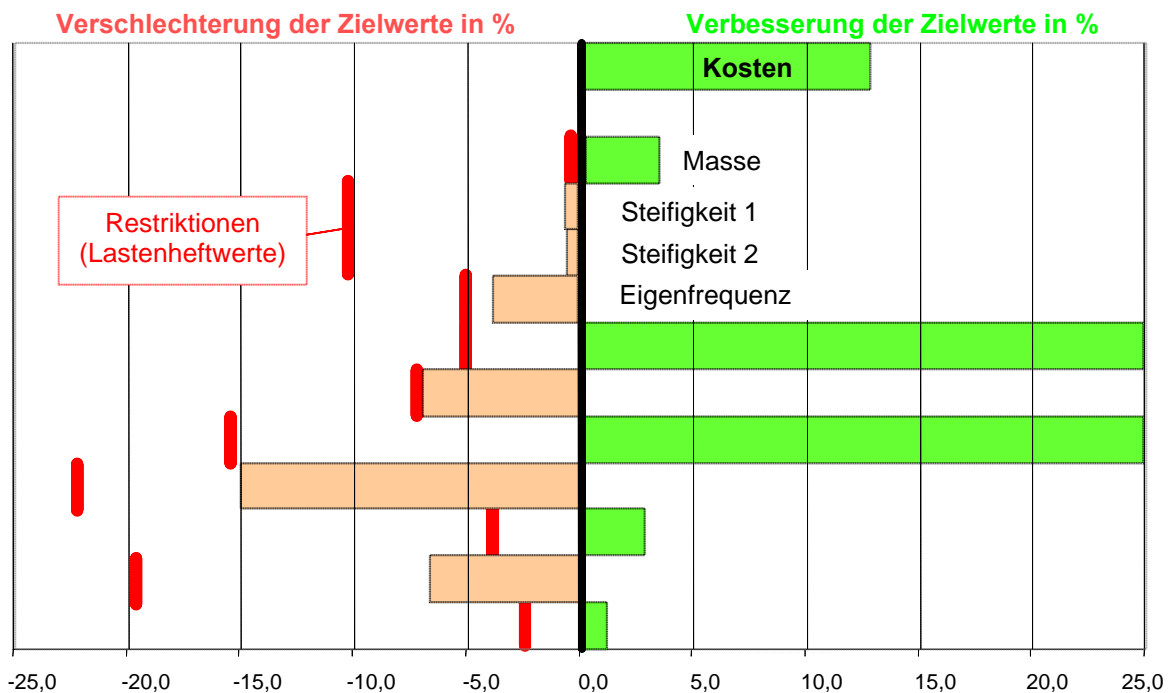


Bild 14: Veränderung der Zielwerte für die jeweiligen Auslegungslastfälle

Für die Optimierung wurden 7 Iterationen mit jeweils ca. 40 Rechenläufen pro Iteration durchgeführt. Dies ist trotz des guten Optimierungserfolges ein relativ hoher numerischer und zeitlicher Aufwand.

Bei den derzeitigen Hardware- und Softwaregegebenheiten führt dies dazu, dass diese erfolversprechende Anwendung nur für ausgewählte Projektstände angewendet werden kann.

## 6 Integration von Kostenfunktionen in CAE-Programmen

Für eine kostenorientierte Fahrzeugauslegung ist es wichtig, schnell und jederzeit die Kosten für geplante Konstruktionsausführungen beurteilen zu können. Im derzeitigen Entwicklungsprozess erfolgt die Kostenbeurteilung verschiedener Auslegungsvarianten getrennt von der funktionalen Auslegung und fließt somit zeitversetzt in den Entscheidungsprozess ein.

Mit einem einfachen Ansatz kann eine Kostenberechnung auch für Einzelvariantenberechnungen durchgeführt werden, ohne eine umfangreiche Optimierungsrechnung starten zu müssen:

Die kostenbestimmenden Parameter (Material, Wandstärke, Geometrie) für ein Bauteil liegen in CAE-Programmen in der Regel vor. Durch die Integration einer Kostenfunktion, wie sie bei der MDK aufgestellt wurde, in die CAE-Programme ist es ohne viel Aufwand möglich, die Materialkosten für die Bauteile zu berechnen und die Auswirkung der Kostenänderungen als Delta-Kosten in die Entscheidungsfindung als weitere Beurteilungsgröße neben den funktionalen Größen schnell mit einfließen zu lassen.

Damit erhält man für jede Variantenberechnung eine konstruktionsbegleitende Kostenkalkulation. Das Kostenbewusstsein wird dadurch gestärkt und die Produktkosten fließen frühzeitig als weiteres Auslegungskriterium direkt in die Entwicklung mit ein.

## 7 Zusammenfassung

Durch Simulationsanwendungen werden in vielen Bereichen des Entwicklungsprozesses massiv Kosten eingespart.

Präventive und fehlervermeidende Effekte sowie die Auswirkungen zur Erhöhung der Entwicklungseffizienz und Steigerung der Entwicklungsqualität und –sicherheit durch den erhöhten Simulationseinsatz sind eindeutig vorhanden, jedoch schwer zu quantifizieren. Der Gewinn dieser Prozessverbesserung wirkt sich auf den gesamten Entwicklungsprozess aus.

Die größten Kosteneinsparungen werden durch den Entfall ganzer Prototypenbaureihen und durch die Verkürzung der Entwicklungszeiten erzielt.

Obwohl sich die Versuchsaufwände in den Entwicklungsprojekten durch permanent steigende Anforderungen zum Teil nur geringfügig reduziert haben oder in bestimmten Bereichen sogar gestiegen sind, lassen sich hier eindeutig erhebliche Kostenreduzierungeffekte durch Simulationseinsatz aufzeigen und quantifizieren.

Die direkte Produktkostenoptimierung ist eine neue und viel versprechende Simulationsanwendung. Mit einer geeigneten Kostenfunktion kann auf Basis einer multidisziplinären Optimierung (MDO) lastfallübergreifend eine Kostenoptimierung zeitgleich mit der funktionalen Auslegung in einem automatischen, numerischen Verfahren erfolgen. Der hohe numerische Aufwand sowie der zugehörige, komplexe CAE-Prozess werden eine rasche Umsetzung als Standardmethode in den Entwicklungsprozessen jedoch verzögern.

Eine Integration von Kostenfunktionen in herkömmliche CAE-Programme ist jedoch ohne viel Aufwand möglich und sollte kurzfristig umgesetzt werden, um den Kostenaspekt auch bei Einzelvariantenrechnungen stärker in den Entwicklungsprozess einzubeziehen.



## 8 Literatur

- [1] Schulte-Frankenfeld, N.; Bahlmann, N.; Brass, M.; Pieck, A.; „Prozesse zur Auslegung und Optimierung von Fahrzeugstrukturen“; 5. LS-DYNA Forum 2006; 12.-13. Oktober 2006; Ulm
- [2] Willenborg, U.; Schulte-Frankenfeld, N.; „Stochastische Analyse in Crash Simulationen“; 2. Europäisches IBM CAE Symposium 2002; 5.-6. November 2002; Stuttgart
- [3] Schulte-Frankenfeld, N.; Böhner, R.; Hellmich, R.; Sandfort, M.; Klocke, A.; „Besondere Anforderungen zur Karosserieauslegung von Cabrio-Fahrzeugen zur Erfüllung hoher Sicherheitsanforderungen am Beispiel des neuen Audi A4-Cabriolets“; VDI-Tagung „Entwicklungen im Karosseriebau“; 7./8. Mai 2002; Hamburg
- [4] Bewersdorff, S.; Pfau, J.; Roeder, S.; „Simulation und Bewertung von Fahrdynamikeigenschaften im Grenzbereich“; ATZ/MTZ extra; Seite 56-59; Juni 2007; Audi/Tesis Dynaware
- [5] D' Aprile, F.; Mingrino, F.; Re Fiorentin, S. ; „Fiat Bravo: extensive and rigorous application of Virtual Simulation“; Virtual Vehicle Creation 2007; 19./20. Juni 2007; Stuttgart
- [6] Sandfort, M.: „Virtuelle Funktionsauslegung am Beispiel des Chrysler Crossfire“; VDI Tagung "Entwicklungen im Karosseriebau"; 5. Mai 2004; Hamburg
- [7] Deuschl, M.; „Gestaltung eines Prüffeldes für die Fahrwerksentwicklung unter Berücksichtigung der virtuellen Produktentwicklung“; Dissertation an der TU-München, 07.07.2006
- [8] Davideit, L.; „Application of numerical simulation and DoE methods for the development of vehicle interior in accordance with FMVSS 201“, Euro-PAM 6./7. Oktober 2005, Potsdam

