

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen („reviewten“) Fachaufsatz.

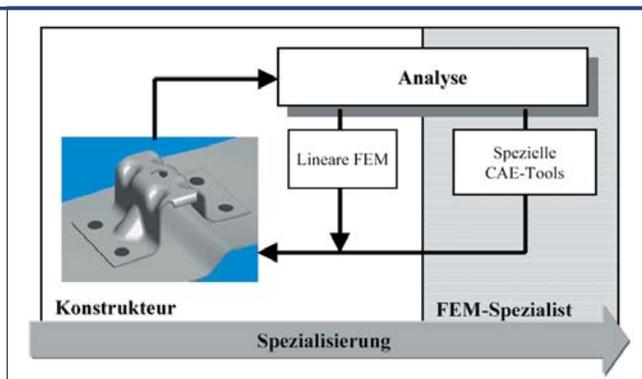
A. Schumacher, R. Hierold, P. Binde

# Finite-Element-Berechnung am Konstruktionsarbeitsplatz – Konzept und Realisierung

## *FEM-Calculation at the Designer Workstation – Concept and Realization*

**Inhalt** In diesem Beitrag wird ein Projekt zur konstruktionsbegleitenden Berechnung vorgestellt, das mit 40 Fahrzeugkonstruktoren durchgeführt wurde. Die Idee ist, dass die Konstrukteure ihre Komponenten selber rechnen, wenn es den Aufwand von einem Tag nicht überschreitet. Die Vorteile der Berechnungen am Konstruktionsarbeitsplatz sind vielschichtig: Die Berechnung erfolgt quasi zeitgleich mit der Konstruktion, so dass eine Identifikation von Problempunkten in einer frühen Phase möglich ist; Varianten sind sehr leicht zu vergleichen. Zudem werden Konstrukteure für Belange der Berechnung sensibilisiert.

**Abstract** In this article it is introduced a project that enabled 40 designers of the automotive sector in doing finite-element calculations in their daily work. The idea is, that the designers themselves analyse their components, provided that the expenditure doesn't pass over a day. The advantages of calculations done by designers are significant: Calculations are performed quasi simultaneously to the design process, so in a early phase problems are identified. Comparisons of variants are very easy. In addition the designers become sensitive for calculations and their requirements.



**Bild 1**

Integration der Finite-Elemente-Berechnung am Konstruktionsarbeitsplatz in den Entwicklungsprozess

Es ist leicht ersichtlich, dass Berechnungen am Konstruktionsarbeitsplatz damit nur einen kleinen Teil der vielen unterschiedlichen Berechnungen einer Fahrzeugentwicklung ausmachen. In Bild 2 sind die unterschiedlichen Disziplinen und Forderungen an die Berechnung aufgeführt. Berechnungen am Konstruktionsarbeitsplatz sollen sich auf die Fälle beschränken, in denen die Verlagerung wirkliche Vorteile bringt.

In diesem Beitrag wird ein bereits durchgeführtes Pilotprojekt mit 40 Konstrukteuren

## 1 Einleitung

Im Entwicklungsprozess von Fahrzeugen oder anderen komplexen technischen Produkten sind Konstruktion, Berechnung und Versuch meist organisatorisch getrennt. Damit ist auch zwischen Konstruktion und Berechnung der Kommunikationsaufwand sehr hoch. Zudem erfolgt die Datenübergabe mit nicht immer perfekten Schnittstellen. Vor allem dann ist der Zeitaufwand enorm, wenn mehrere Entwicklungsschleifen notwendig sind. In einigen Fällen ist es sehr sinnvoll, dass die Berechnungen bereits am Konstruktionsarbeitsplatz durchgeführt werden: Damit lassen sich Änderungen in der Konstruktion sehr schnell zumindest grob bewerten (A-B-Vergleich).

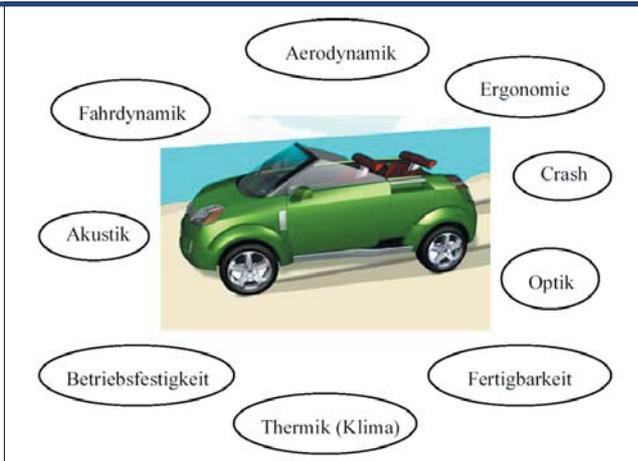
Die Möglichkeiten innerhalb der gängigen CAD-Systeme haben sich in den letzten Jahren deutlich verbessert. In den CAD-Systemen existieren zumindest für die lineare Finite-Elemente-Berechnung (FEM) ausgereifte Pre- und Postprozessoren sowie Schnittstellen zu anerkannten Finite-Element-Programmen (siehe unter anderem [1]).

Die Idee der Berechnung am Konstruktionsarbeitsplatz ist in Bild 1 skizziert. Die Konstrukteure wurden im Rahmen des Projekts in die Lage versetzt, das Verhalten einzelner Komponenten des Fahrzeugs (vor allem Halter von Aggregaten) zu berechnen. Werden die Forderungen an die Berechnung komplexer (z.B. nicht-lineare Berechnung), erfolgt die Übergabe an die FEM-Spezialisten.

## Autoren

Dr.-Ing. Axel Schumacher,  
Dipl.-Ing. Roland Hierold  
Adam Opel AG, Internationales Technisches  
Entwicklungszentrum  
65423 Rüsselsheim  
Tel.: 061 42/7- 66 811 und - 64 853,  
Fax: 061 42/7- 78 457  
E-Mail: axel.schumacher@de.opel.com  
roland.hierold@de.opel.com

Dipl.-Ing. Peter Binde  
Dr. Wallner Simulation & Services  
Tannenring 41, 6  
5207 Wiesbaden  
Tel. : 061 27/9 83 83  
E-Mail: peter.binde@drwe.de



**Bild 2**

Forderungen an die Berechnung in der Fahrzeugentwicklung

Schnittkräfte, Lager, Lagerreaktionen, Materialeigenschaften.

- Mathematik: Vektoren, Trigonometrie.
- CAD, Parametrik: Voraussetzung ist der sichere Umgang mit dem verwendeten CAD-System, d.h. Master-Model-Concept, parametrischer Modell-Aufbau, Varianten, Baugruppen, teileübergreifende Beziehungen, Flächen-Aufbau.

Kenntnisse zur Theorie und Praxis der Finite-Element-Berechnung können nicht vorausgesetzt werden.

### 2.3 Möglichkeiten des eingesetzten CAD-Systems

Fast alle gängigen CAD-Systeme bieten heute die Möglichkeit einer integrierten Finite-Elemente-Analyse [1]. Unter einer einheitlichen Oberfläche sind Module für Standard-Berechnungen verfügbar. Außerdem ist die Leistungsfähigkeit der Soft- und Hardware heute so hoch, dass auch größere Berechnungen auf Arbeitsplatzrechnern erfolgen können.

Im Fall der Adam Opel AG wird das CAD-System Unigraphics [2] von EDS PLM Solutions eingesetzt, dessen Möglichkeiten im folgenden exemplarisch beschrieben werden.

#### 2.3.1 Eigenschaften des FE-Moduls

Das verwendete CAD-System Unigraphics enthält das FE-Modul „Scenario for Structures“. Die charakteristischen Eigenschaften des Moduls lassen sich folgendermaßen beschreiben:

- Lineare Struktur-, Modal- und Thermostransferanalyse,
- assoziatives FE-Modell auf Flächen und Volumen,

vorgestellt. Hierzu werden zunächst die Tätigkeitsfelder eines Konstrukteurs analysiert. In Kombination mit der Analyse des notwendigen Vorwissens wird ein Konzept für die Berechnung am Konstruktionsarbeitsplatz erstellt. Eingehend wird die konkrete Realisierung des Konzepts in der Organisation beschrieben. Zur Abschätzung von Aufwand und Nutzen werden praktische Beispiele aus der Fahrzeugentwicklung diskutiert.

## 2 Analyse der Umgebung

### 2.1 Tätigkeiten im Konstruktionsprozess

Beim gewählten Ansatz, den Konstrukteur mit Berechnungsaufgaben zu beauftragen, ist das Zusammenspiel mit seinen anderen Tätigkeiten zu betrachten. Die Frage ist: Ist der Ansatz eine Erleichterung oder eine zusätzliche Belastung?

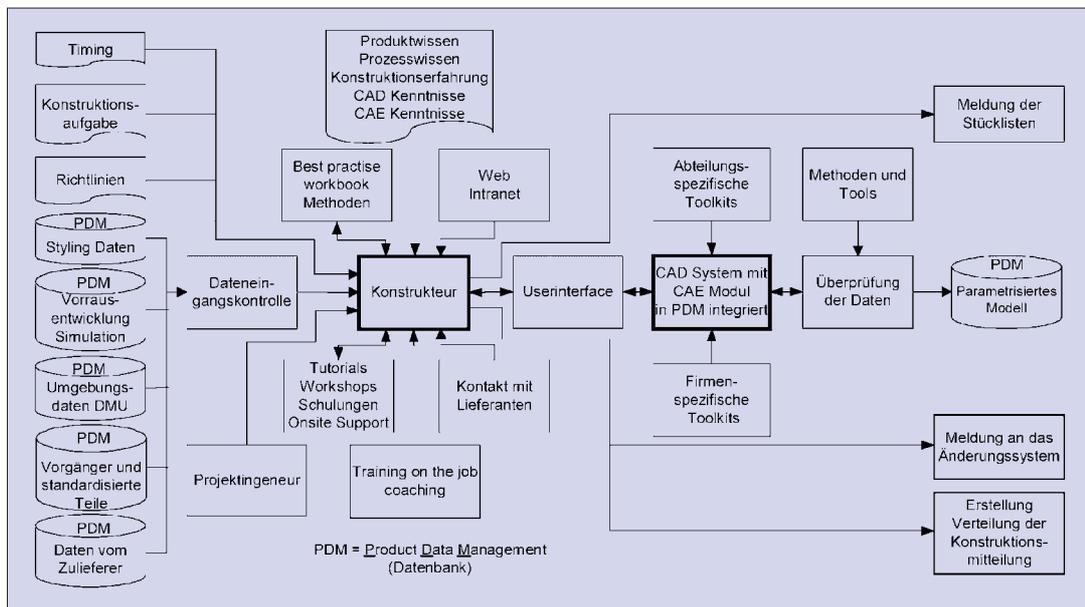
Bild 3 zeigt den Konstrukteur im Mittelpunkt des Konstruktionsprozesses. Er muss

alle Forderungen an und alle Einflüsse auf das Produkt sammeln, abstimmen und termingerecht als Daten für den weiteren Entwicklungsprozess zur Verfügung stellen. Dazu gehören auch die Meldungen für die Stücklisten der Prototypen, die Beantragung der Teilenummern, das Einarbeiten von Änderungen, die Verteilung der Konstruktionsmitteilungen an die betroffenen Bereiche, die Freigabe der Daten und Zeichnungen und so weiter.

### 2.2 Wissensstand des Konstrukteurs

Das Konstrukteur-Spektrum im Unternehmen reicht vom technischen Zeichner bis zum Diplom-Ingenieur. Der jeweilige Wissensstand der einzelnen Personen ist entsprechend unterschiedlich. Allgemein sind jedoch folgende Kenntnisstände vorzusetzen:

- Technische Mechanik: Es werden Grundlagen vorausgesetzt, die in jeder technischen Ausbildung vermittelt werden. Kräfte, Spannungen, Momente, Kräftegleichgewicht,



**Bild 3**

Rolle des Konstrukteurs im Daten- und Informationsfluss des Konstruktionsprozesses

- Form-, Maß- und Belastungsvarianten generierbar,
- Möglichkeit zur integrierten Parameteroptimierung,
- Integration im verwendeten PDM-System iMAN [2],
- Schnittstelle zum FE/System MSC/NASTRAN [3] und
- Informationsaustausch zwischen Modelling, Mehrkörpersimulation und Finite-Element-Berechnung.

Wesentliche Voraussetzung ist die Verwendung des Finite-Elemente-Programms, welches auch in der Berechnungsabteilung verwendet wird:

- FE-Inputfiles sowie Ergebnisfiles können zwischen Konstrukteuren und Berechnungsingenieuren ausgetauscht werden;
- von den Berechnungsingenieuren erprobte Standard-Vorgehensweisen lassen sich leicht auf Konstrukteure übertragen;
- die Interpretation von Fehlermeldungen, Logfiles sowie die Konfiguration des Solvers sind bereits bekannt und
- die Akzeptanz der Berechnungsergebnisse ist hoch.

In Unigraphics kann der Konstrukteur verschiedene Szenarien erstellen, die unterschiedliche Lasten, Randbedingungen, Materialien, Wanddicken oder Geometrieparameter enthalten. Es ist auch möglich, in einem Szenario eine ganz neue Geometrie zu modellieren oder eine vorhandene Geometrie zu verändern. Alle Möglichkeiten der CAD-Modellierung stehen hierzu zur Verfügung. Lasten, Randbedingungen, Material sowie die Elementierung werden auf die Elemente „Face“, „Edge“, „Vertex“ oder „Solid“ aufgebracht und bleiben assoziativ mit ihnen verbunden. Damit bleibt bei einem Geometrie-Update die Information erhalten. Das ist Stand der Technik bei den gängigen integrierten CAD/FEM-Systemen (siehe [1]).

Die Integration der Berechnung in das CAD-System liefert folgende Vorteile:

- Einheitliche Benutzerführung,
- Möglichkeit zur Geometrievariation,
- Übergabe von Feature-Informationen des CAD-Systems an das FEM-System wie Schweißnähte, Gelenk-Verbindungen, Material-Informationen, Kräfte aus der Bewegungssimulation

In Bild 4 ist beispielhaft eine Sequenz beim integrierten Konstruieren und Berechnen mit dem Szenario-Konzept dargestellt.

### 2.3.2 Forderungen an die zugrundeliegende Geometrie

Wenn z.B. Wanddicken, Radien, Sickenzahlen oder sonstige geometrische Größen

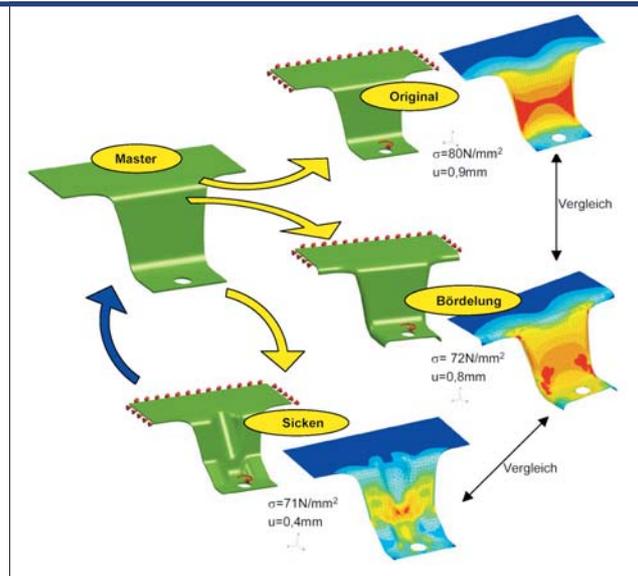


Bild 4

Beispielhafte Sequenz beim integrierten Konstruieren und Berechnen mit dem Szenario-Konzept

abzustimmen sind, so muss das CAD-Modell derart parametrisiert sein, dass die notwendigen Parametervariationen problemlos generiert werden können [4]. Falls die Parametrisierung der Geometrie zu unstrukturiert durchgeführt wurde oder importierte Daten aus Fremdsystemen verwendet werden, ist dies nicht möglich. In diesen Fällen kann die Berechnung zwar durchgeführt werden, es lassen sich aber keine Varianten auf automatische Weise vergleichen.

Eine weitere Forderung betrifft die Qualität der CAD-Geometrie speziell bei Blechteilen oder dünnwandigen, verrippten Geometrien. Von diesen Geometrien müssen Mittelflächen abgeleitet werden, damit sich diese mit Schalenelementen vernetzen lassen. Das Bilden der Mittelflächen ist oft problematisch, wenn Außen- oder Innenflächen Geometriefehler enthalten oder wenn zum Beispiel die Außenfläche Radien enthält, die Innenfläche jedoch nicht.

Besonders bei verrippten Geometrien, beispielsweise Kunststoffgehäusen, bestehen hohe Forderungen an die Qualität der Geometrie sowie des Feature-Aufbaus der Konstruktion.

### 2.3.3 Mindestforderungen an die Rechnerumgebung

Ein großes Problem für Finite-Elemente-Berechnungen war vor einigen Jahren das Vorhandensein ausreichender Hardware. Dieses Problem ist heute nicht mehr vorhanden, weil die Forderungen an Konstruktionsarbeitsplatz-Workstations für die Verwendung von DMU oder die schnelle Parameteraktualisierung wesentlich höher sind, als für die FE-Berechnung einzelner Komponenten und damit als gelöst gilt.

## 3 Konzept

### 3.1 Erwartungen an die Berechnung am Konstruktionsarbeitsplatz

Die frühe Simulation bedeutet zwar einen kleinen Mehraufwand zu Beginn, der sich aber darin niederschlägt, dass in späteren Phasen aufwändige Iterationszyklen nicht mehr notwendig sind. Gesprochen wird von „Predictive Engineering“ (Bild 5), wenn die Eigenschaften des Produkts schon in frühen Entwicklungsphasen bekannt sind. Auf diese Weise lässt sich der aufwändige Prototypenbau reduzieren. Im Idealfall dient der Prototyp nur noch als letzter Beweis für die schon durch Simulation vorhergesagten Eigenschaften des Produkts. Die Berechnung des Konstrukteurs hat folgende Vorteile:

- Schnelle FE-Analysen und Vergleiche sind möglich, da der Konstrukteur selbst den Modellaufbau am besten kennt,
- direkte Rückführung des Erlernten in die Produktentwicklung,
- Wegfall des Arbeitsaufwands für Auswärtsvergabe,
- Einbau der Simulationen in Präsentationen. Die Plausibilität des Konzepts wird auch da-

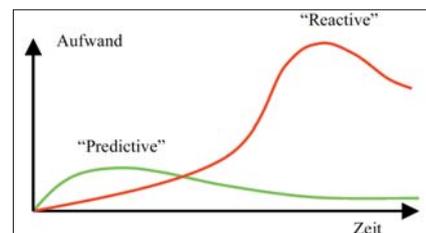
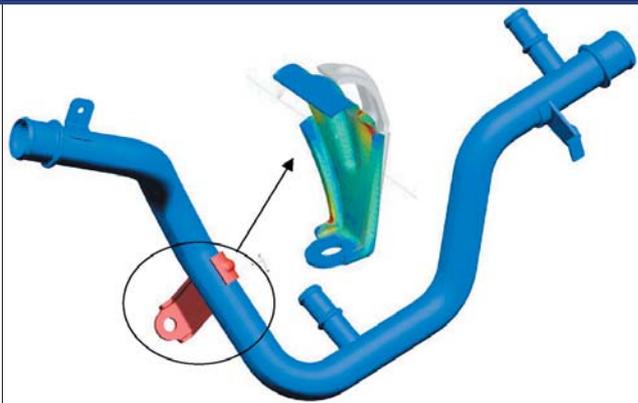


Bild 5

Reduzierung des Entwicklungsaufwands durch „Predictive Engineering“



**Bild 6**

Modalanalyse eines Kühlerrohrs mit Spannungsanalyse eines Halters

durch untermauert, dass der Konstrukteur im Gegensatz zum reinen Berechnungsingenieur am ehesten überblicken kann, in welche Richtung eine Konstruktion geändert werden kann. Überhaupt hat er meist das umfangreichste Wissen bezüglich der Forderungen an die Konstruktion. So kann er am schnellsten entscheiden, welche Variationen möglich und sinnvoll sind.

### 3.2 Akzeptabler Zeitaufwand für Berechnungen

Üblicherweise wird ein Konstrukteur nur einen kleinen Teil seiner Zeit damit verbringen, FE-Analysen selbst durchzuführen. Damit würde es ihm schwer fallen, mit einem komplexen Berechnungssystem umzugehen. Bedingung ist also, dass das System einfach zu bedienen ist.

Zur hohen Akzeptanz der Anwender ist es unserer Erfahrung nach erforderlich, dass der Zeitaufwand zur FE-Modell-Erstellung etwa eine Stunde nicht überschreitet. Voraussetzung hierfür ist eine hohe Qualität der zugrundeliegenden CAD-Geometrie.

Weiterhin muss auch das Berechnen in relativ kurzer Zeit erledigt sein. Auch hier gilt, dass Antwortzeiten von mehr als einer Stunde nicht akzeptabel sind.

Als Faustformel gilt unserer Meinung nach, dass eine konstruktionsbegleitende Berechnung mit allem was dazu gehört (mehrere Lastfälle, mehrere Variationen, Dokumentation, Diskussion) den Konstrukteur nicht länger als einen Tag beschäftigen soll. Aufwändigere Berechnungen sind eher von Berechnungsingenieuren durchzuführen.

### 3.3 Durchzuführende Berechnungstypen

Eine Beschränkung auf lineare FE-Berechnungen ist aus mehreren Gründen plausibel: Zum einen ist die Rechenzeit um ein Vielfaches geringer, zum anderen sind die Ergebnisse leichter zu interpretieren.

Außerdem sind die Eingaben und die Kontrollen für nichtlineare Berechnungen auch bei Standard-Aufgaben wie nichtlinearem Kontakt, nichtlinearem Material und nichtlinearem Geometrieverhalten zu komplex, so dass diese Berechnungen den reinen Berechnungsingenieuren vorbehalten bleiben.

Die eingesetzten Berechnungstypen beschränken sich auf Statikanalysen zur Ermittlung der Verformungen und zum Vergleich der Spannungen bei A-B-Vergleichen. Eventuell auftretende Beschleunigungen, z.B. bei Bordsteinüberfahrt, werden unter Zuhilfenahme von Erfahrungswerten berücksichtigt. Weiterhin werden Modalanalysen durchgeführt, um die Eigenschwing-Formen und -Frequenzen zu ermitteln.

## 4 Realisierung

Lange Zeit war der Umgang mit FE-Systemen den reinen Spezialisten vorbehalten. Das hatte zwei Gründe:

- Zum einen war der Aufwand bei der Erstellung des FE-Modells hoch und die Computer-Unterstützung nur klein, und
- zum anderen war großer theoretischer Wissens-Hintergrund notwendig, um die richtigen Eingaben zu machen und die Ergebnisse zu bewerten.

Der erste Grund ist heute aufgrund entsprechender Softwareunterstützung weitgehend nichtig. Am zweiten wurde auch gearbeitet. Beispielsweise führt die Technologie des adaptiven Vernetzens zu qualitativ hochwertigen Netzen ohne Eingriff des Anwenders. Weiterhin sind intelligente „Wizards“ in der Lage, den Anwender durch einen standardisierten Berechnungsprozess zu führen, Eingabefehler abzufangen und die Ergebnisse bis zu einem bestimmten Grad zu deuten.

Trotzdem sind eine Reihe von Kenntnissen unverzichtbar, wenn selbstständig und effektiv FE-Berechnungen durchgeführt werden sollen. Außer dem reinen Umgang mit dem System wurden in unseren Schulungen die folgenden Aspekte beleuchtet:

- Bedeutung des Spannungstensors sowie der Dehnungen und Verformungen,
- Vergleichsspannungskonzepte und Festigkeitsnachweis,
- Grenzen der linearen Theorie: Abgrenzung bezüglich a) nichtlinearem Kontakt, b) Material-Nichtlinearität, c) großer Verformungen und d) Zeit-Abhängigkeit,
- Genauigkeits- und Konvergenzverhalten finiter Elemente in Abhängigkeit der Elementgestalt,
- Einfluss von Singularitäten,
- Plausibilität / Fehlereinfluss von Randbedingungen und Lasten,
- Fehlereinfluss aufgrund idealisierter Materialeigenschaften und
- Geometrieidealisierung / Idealisierung bei Schalen- und Balkenelementen.

Für den effizienten Einsatz der Berechnung am Konstruktionsarbeitsplatz ist eine Schulung und die intensive Betreuung im laufenden Betrieb notwendig. Ein wesentliches Ziel ist die Verbesserung der Zusammenarbeit von Konstrukteuren und Berechnungsingenieuren. Die sinnvolle Aufteilung der Aufgabenstellung: „Das kann ich schneller erledigen“. „Das wirst Du besser können“.

### 4.1 Schulungsmaßnahme

Gute Erfahrungen wurden mit einer dreitägigen Schulung außerhalb der gewohnten Arbeitsumgebung gemacht. Dabei erwies es sich als sehr hilfreich, dass in einer Schulung mit 10 Teilnehmern unterschiedliche Konstruktionsbereiche zusammengelegt wurden: Möglichst zwei Mitarbeiter aus einer Arbeitsgruppe waren jeweils in einem Kurs, damit sie sich in der ersten Zeit nach der Schulung austauschen konnten. Folgende Konstruktionsbereiche sind integriert:

- Rohkarosserie,
- Türen und Klappen,
- Airbagsysteme,
- Fahrzeugintegration Brennstoffzelle,
- Elektrik,
- Elektronik,
- Thermal,
- Powertrain,
- Vorausentwicklung,
- Innenausstattung,
- Chassis konstruktion Abgassysteme,
- Chassis konstruktion Bremsen.

Folgender Schulungsplan wurde realisiert:

1. Tag

Block 1:

- Einführungsrunde (Wofür werden Berechnungen bei ihnen benötigt? Welche Berührungspunkte haben sie in der Vergangenheit mit Berechnungen gehabt? Was erwarten sie von dieser Schulung?),

- Grundlagen der Finite-Elemente-Berechnung (Vorgehensweise bei der Erstellung des FE-Modells, Eigenschaften eines Finiten Elements, Steifigkeitsmatrix, Lösung der Systemgleichung, Postprocessing),
- Visualisierung und Interpretation der Berechnungsergebnisse (Post-Processing), Verformungen, Spannungen,
- Einführung in die Handhabung der Berechnungsmöglichkeit im CAD-Programm Unigraphics.

### Block 2:

- Durchgängiges Beispiel (Gusshalter),
- Klassifizierung der unterschiedlichen Finite-Element Ansätze (Balkenelemente, Flächenelemente, Volumenelemente), Einsatzbereiche,
- Grundlagen im Umgang mit dem Berechnungsprogramm MSC/NASTRAN (File-Management, Fehlersuche usw.) und
- Untersuchungen am Balken (Einfluss des FE-Netzes, mechanischer Vergleich mit Handrechnung und ähnliches).

### 2. Tag

#### Block 3:

- Integriertes Konstruieren und Berechnen,
- Mid-surface-Funktionalität bei flächigen Bauteilen (Blechhalter) mit 2-D-Netz,
- Variation des Modells (zum Beispiel Geometrieparameter, Kerbe, Bohrung); Teilnehmer verwenden verschiedene Variationen,
- Eigenschwingungen (Berechnungsmöglichkeiten und Interpretation),
- weitere Beispiele, zum Beispiel Achsschenkel, Abgasanlage, Blechteile, Schwingungen und ähnliches sowie
- Möglichkeiten und Grenzen der Berechnung (zum Beispiel große/kleine Verformungen, elastisches/plastisches Materialverhalten, Zahlengläubigkeit).

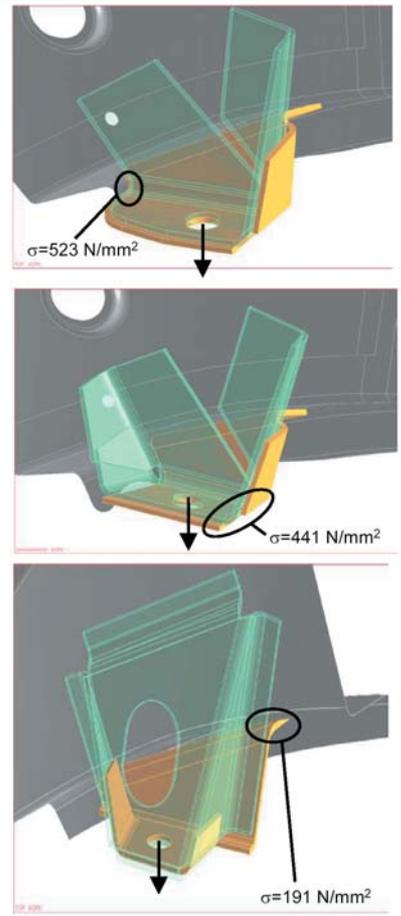
#### Block 4:

- Checken der Finite-Element-Netzgüte,
- Vernetzungsübungen vorhandener Bauteile,
- Vertiefung zu Randbedingungen, Nachbildung von Kontakten, Lasten und Lastfällen, Bezug zu Unigraphics,
- Verwendung von Materialdaten (Datenbanken usw.) sowie
- Verifikation am Gusshalter und am Blechteil.

### 3. Tag

#### Block 5:

- Überblick über Einsatzgebiete (Statik (Schweißpunkte), Dynamik (Schwingungen), Wärme, Strömung, N&V, Crash, Tiefziehsimulation, Kontaktrechnungen,
- Grundbegriffe der Strukturoptimierung,
- Strukturoptimierung in UG-Structures (Blechdickenoptimierung, Gestaltoptimierung) und



**Bild 7**

Neukonstruktion mit integrierter FE-Berechnung des Subframehalters

- Besprechung von Beispielen, die Kursteilnehmer mitbrachten.

#### Block 6:

- weiter mit der Besprechung von Beispielen, die Kursteilnehmer mitbrachten.

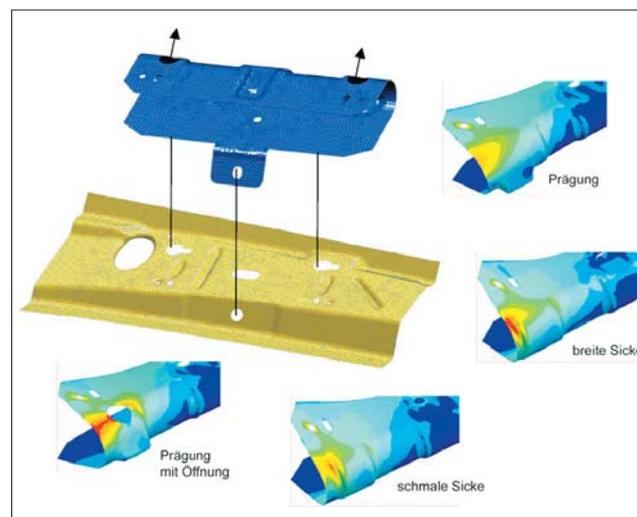
Mit Hilfe von Kursvalidierungen wurde von Kurs zu Kurs die Schulung verbessert. Das

Feedback war durchweg positiv. Die Teilnehmer sind meist am Ende der Schulung hoch motiviert.

### 4.2 Laufende Betreuung

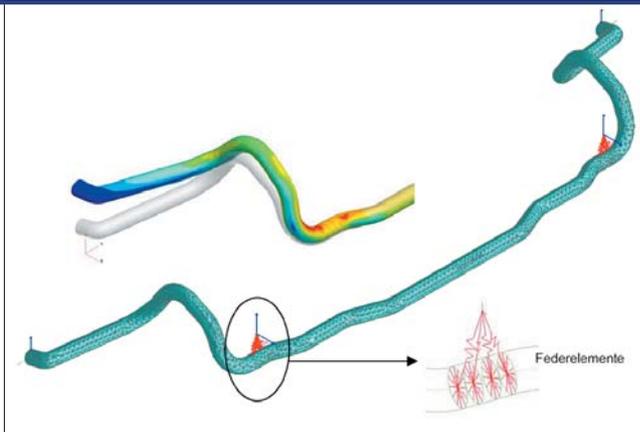
Die laufende Betreuung im Praxisbetrieb ist sehr wichtig. Zu groß ist die Gefahr, dass die unerfahrenen Einsteiger Ergebnisse falsch deuten, falsche Angaben machen oder gar keine Ergebnisse bekommen. Im vorliegenden Fall haben sich die folgenden Betreuung-Aktivitäten bewährt:

- Betreuung von Projekten: Konstrukteure sind meist Spezialisten für bestimmte Komponenten. Wenn der konstruktionsbegleitende Berechnungsprozess einmal funktioniert, ist es relativ leicht, ihn immer wieder auf ähnliche Konstruktionen anzuwenden, da er wie ein Schema eingesetzt werden kann. Daher ist es vielfach ausreichend, ein erstes Projekt umfangreich zu betreuen. Nachfolgende, ähnliche Projekte werden dann selbständig durchgeführt.
- Regelmäßige Workshops: Sehr gute Erfahrungen wurden mit monatlich vierstündigen Workshops gemacht. Neben Neuigkeiten des Systems ist das Wichtigste die Vorstellung und Diskussion von Projekten der Teilnehmer. Diskutiert werden sowohl abgeschlossene als auch laufende Projekte. Besonders hervorzuheben ist der anregende Effekt, der davon ausgeht: Wenn jemand eine Aufgabe vorstellt, die er mit FE-Berechnung lösen konnte, kommt oftmals ein anderer auf die Idee, dass er ähnliche Aufgaben hat, die bisher umständlicher gelöst werden mussten.
- Entwicklung von Methoden: Die entwickelten Methoden sind teils allgemein gehalten, teils auf die Belange des eigenen Unternehmens zugeschnitten. Die Methoden werden



**Bild 8**

Anpassungskonstruktion eines Kopf-Airbaghalters



**Bild 9**

**Anpassungskonstruktionen  
des Fahrzeug-Stabilisators**

im Intranet veröffentlicht und in Form von Manuals ausgehändigt. Die Manuals erwiesen sich als hilfreich, wenn Konstrukteure selbständig Berechnungen durchführen, da sie rezeptartig Vorgehensweisen erläutern. Beispiele sind: Umgang mit Blechteilen; Schweißnahtmodellierung; Anbindung von Baugruppen; Betrachtung welcher und Dokumentationsart der Ergebnisse; geeignete CAD-Geometrie Modellierung und wie werden Fehlermeldungen interpretiert.

### 4.3 Rückkopplung an die Softwareentwicklung

Aufgrund der intensiven Nutzung der Berechnungsmodule im CAD-System wurden umfangreiche Verbesserungsvorschläge mit den Softwareentwicklern diskutiert, die zum großen Teil in den nächstfolgenden Versionen von Unigraphics integriert wurden. Dabei wird unterschieden zwischen Forderungen von allgemeinem Interesse und speziell für das eigene Unternehmen durchgeführten Anpassungen, die finanziell beglichen werden. Die Vorschläge reichen von einfachen Handhabungsforderungen bis zu umfangreichen inhaltlichen Maßnahmen.

## 5 Abschätzung von Aufwand und Nutzen an durchgeführten Beispielen

### 5.1 Modalanalyse eines Kühlerrohrs mit Spannungsanalyse eines Halters

Diese Aufgabe ergab sich sehr kurzfristig: Der Halter eines Kühlerrohrs (Bild 6) brach im Fahrversuch. Das war nicht unmittelbar vorhersehbar, da der Halter in vorangegangenen Fahrzeugfamilien gute Dienste geleistet hat und als sogenannte „Carry-Over“-Komponente in unveränderter Form verwendet wurde. Unter Einsatz von Simulation war der Halter so zu verändern, dass kein Versagen mehr auftritt. Da dies nicht im Standardprozess vorgesehen ist, würde eine externe Be-

rechnung bis zu 6 Wochen dauern. Dabei wäre noch keine Variantenstudie durchgeführt worden. Das war ein idealer Einsatz für die Berechnung nach dem in diesem Beitrag vorgestellten Konzept. Der mit der Aufgabe betraute Konstruktionsingenieur hatte den Berechnungskurs besucht. Das war ausreichend, um die Berechnung selbst anzugehen. Im ersten Teil der Berechnung führte er eine Modalanalyse des Kühlerrohrs mit allen einwirkenden Einspannungen und Haltern durch. Daraus hat er die dazugehörigen Spannungen ermittelt. Basierend auf diesen Ergebnissen hat er den Halter im Anschraubbereich verändert.

### 5.2 Neukonstruktion mit integrierter FE-Berechnung des Subframehalters

Zum Testen einer neuen Vorderachse im Betrieb wird sie in einem Technik-Träger (Mule-Car) integriert. Hierzu ist ein möglichst preiswerter Blechhalter in Faltechnik zu konstruieren und auszulegen (Bild 7). Der mit der Aufgabe betraute Konstrukteur war Teilnehmer im Berechnungskurs und hat selbständig die dazugehörigen Finite-Element-Berechnungen durchgeführt. Er konnte damit in einer äußerst frühen Phase, nämlich unmittelbar nach der Modellierung, die Spannungen im Halter ermitteln. Der erste, sehr einfache Halter hatte weit höhere als die zulässigen Spannungswerte. Nur die Variante 3, die eine Abstützung oberhalb der aufzunehmenden Achse vorsieht, erfüllt die Forderungen und wurde in Kleinserie hergestellt.

### 5.3 Anpassungskonstruktion eines Kopf-Airbaghalters

Der Konstruktions-Ingenieur, der den beschriebenen FEM-Kurs besucht hatte, konnte selbständig verschiedene Varianten des Teils mit FEM berechnen (Bild 8). Die beste Variante wurde an die Berechnungsabteilung und den Versuch weitergegeben. Ein Vorteil dabei

war die Parametrisierung und Feature-Struktur der CAD-Geometrie, die ein einfaches Variantenbilden und Feinabstimmen der Maße ermöglicht. Bisher wurde der Halter nach der Konstruktion in der Berechnungsabteilung analysiert und im Prototypen-Versuch getestet. Jede Änderung der Konstruktion musste diese Prüfungen erneut durchlaufen, was erheblichen Zeit- und Kostenaufwand bedeutete. Mit den neuen Methoden kann ein voroptimiertes Modell übergeben werden, das meist den Forderungen genügt. Die Berechnungsabteilung führt letztendlich eine Simulation durch, in der das Bauteil bis weit in den plastischen Bereich hinein belastet wird. Der Versuch beweist schließlich die Ergebnisse der Berechnungen und wird nur ein Mal durchgeführt.

Die Elementgröße ist deshalb fein gewählt, weil damit eine automatische Schalenvernetzung leicht möglich ist.

### 5.4 Anpassungskonstruktionen des Fahrzeug-Stabilisators

Bild 9 zeigt die Untersuchung des Verformungsverhaltens eines Stabilisators einer Vorderachse. Die Erstellung des FE-Netzes ist sehr einfach, so dass der Konstrukteur zahlreiche Variationen modellieren und analysieren konnte, und basierend darauf Verbesserungen erzielte.

Die Lagerung auf Gummielementen wird mit Federelementen simuliert. Auf diese Weise werden unrealistische Spannungsspitzen vermieden.

## 6 Ausblick

Dieses Pilotprojekt hat uns motiviert, das Konzept in größerem Rahmen zu verwirklichen.

### Literatur

- |   |  |
|---|--|
| [1] Schnelle, K.-P.: <i>Finite-Element-Berechnung mit 3-D-CAD-Systemen – eine vergleichende Untersuchung</i> . Umdruck der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Frankfurt, 1990   | <i>Quick Reference Guide. The MacNeal-Schwendler Corporation, 815 Colorado Boulevard, Los Angeles, CA 90041; 2002</i>  |
| [2] N.N.: <i>UG Online Documentation. UniGraphics Solution Inc., 10824 Hope Street, Cypress, CA 90630 (see <a href="http://www.ugsolutions.com">http://www.ugsolutions.com</a>); 2002</i> | [4] Schumacher, A.: <i>Merkel M.; Hierold, R.: Parametrisierte CAD-Modelle als Basis für eine CAE-gesteuerte Komponententwicklung; VDI-Berichte Nr. 1701, 2002</i> |
| [3] N.N.: <i>MSC/NASTRAN</i>  |  |