

Virtual Prototyping: Formoptimierung dynamisch beanspruchter Bauteile auf Betriebsfestigkeit

Pascal Häußler, Albert Albers

Universität Karlsruhe (TH)

Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau (mkl), Karlsruhe

Dirk Vieker

TRW Automotive, Engineering Center Düsseldorf, Düsseldorf

Kurzfassung

Die Komplexität moderner Produktentwicklungsprozesse ist häufig im Wachstum begriffen, gleichzeitig besteht die Forderung nach immer kürzeren Entwicklungszeiten. Um dies zu gewährleisten und eine hohe Produktqualität sicher zu stellen sind durchgängige virtuelle Entwicklungsverfahren notwendig. Insbesondere bei Leichtbauprodukten spielen Optimierungs- und Berechnungsmethoden heute eine wesentliche Rolle. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes „ELANO“ wurde ein neues Verfahren zur virtuellen Designfindung und betriebsfestigkeitsgerechten Auslegung von dynamisch beanspruchten Bauteilen entwickelt. Ausgehend von einer Beschreibung der Motivation wird in diesem Artikel die neue Methodik beschrieben und an einem Beispiel aus dem Automotive Bereich demonstriert.

1 Motivation

Hoher Kostendruck und verkürzte Entwicklungszeiten, vor allen Dingen im Automotive-Sektor, werden auf die Zulieferindustrien herunter gebrochen, wobei diese zunehmend Modul- und Systemverantwortung übertragen bekommen. Gerade im Bereich der sicherheitsrelevanten Produktgruppen ergeben sich für den Zulieferer aufgrund der gestiegenen Komplexität der Systeme neue Herausforderungen. Die enge Verzahnung zwischen mechanischen und elektronischen Komponenten zu komplexen mechatronischen Einheiten beherrscht daher momentan das Innovationspotenzial in der Automobiltechnik. Obwohl die Produktentwicklung bereits heute weitgehend von CAx-Techniken begleitet wird, sind diese in vielen Fällen noch Insellösungen und werden nicht hinreichend konsequent und systematisch in den Produktentwicklungsprozess integriert. Ein Potenzial zur Effizienzsteigerung über den gesamten Prozesszyklus ist durchaus vorhanden. Des Weiteren ergeben sich aufgrund der Systembetrachtung weitere Anforderungen an die CAE-Methodik, da physikalische Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systemkomponenten bisher oft nicht berücksichtigt werden. Eine durchgängigere, virtuelle Produktentwicklung kann hier zur Steigerung des Produktwissens in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses beitragen.

Bei der Auslegung von dynamisch beanspruchten Leichtbau-Komponenten in mechanischen Systemen im Sinne einer Betriebsfestigkeitsrechnung spielen Werkstoffverhalten und Last-/Zeitverläufe eine entscheidende Rolle, da sie einen wesentlichen Einfluss auf das Versagensverhalten haben. In der Praxis bedeutet dies, dass bei Auslegungsberechnungen nicht mit rein statischen Belastungsfällen und einer ausschließlichen Betrachtung der auftretenden Spannungen gearbeitet werden kann. Materialparameter wie SN-Kurven werden typischerweise durch Versuche gewonnen, Last-/Zeitverläufe durch Test und Versuch und/oder Mehrkörperdynamik-Simulation.

Die Veränderung der Bauteilgestalt und damit seiner Eigenschaften wie Steifigkeit, Trägheitstensor und Eigenfrequenzen kann im Allgemeinen auch die Gesamtdynamik des mechanischen Systems verändern. Dies wiederum beeinflusst die am Bauteil entstehenden Last-/Zeitgeschichten. Um diese permanente Wechselwirkung zwischen Bauteil und System zu berücksichtigen muss die Strukturoptimierung die Systembetrachtung mit einbeziehen. Am Institut für

Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau wird deshalb seit Jahren an einer Kopplung von Mehrkörperdynamik und Strukturoptimierung gearbeitet [1][2][3].

In vielen Entwicklungsprozessen moderner technischer Produkte werden heute bereits einzelne Analysemodelle für Mehrkörperdynamik, Festigkeitsrechnung (FEM) oder Lebensdaueranalyse erstellt. Eine Kombination dieser Modelle und Kopplung mit der Strukturoptimierung erlaubt einen durchgängigen Design- und Auslegungsprozess für dynamisch beanspruchte Bauteile.

2 Ein neuer Optimierungsprozess

Die im Rahmen von ELAnO entwickelte neue Methode zur Formoptimierung kombiniert Finite Elemente Methode (FEM), Mehrkörperdynamik-Simulation (MKS) und Lebensdaueranalyse um Schädigungsverteilungen für dynamisch beanspruchte Bauteile in mechanischen Systemen auf einer rein virtuellen Basis zu ermitteln. Diese Schädigungsverteilungen werden dann als Eingangsgröße für den Optimierungsalgorithmus in TOSCA.Shape verwendet. In einem iterativen, automatisierten Verfahren werden so die einzelnen Analyse-Methoden mehrfach durchlaufen. In jeder Iteration des Optimierungsprozesses wird zunächst mittels FEM eine modale Repräsentation des Bauteils erzeugt (Component Mode Synthesis). Dies ist notwendig, um das Bauteil als elastischen Körper im MKS zu repräsentieren. Im Anschluss folgt eine neue Dynamik Simulation (MKS) um neue Last-/Zeitverläufe am Bauteil zu ermitteln. Diese werden benötigt für eine im letzten Schritt durchgeführte Lebensdaueranalyse. Abbildung 1 verdeutlicht dieses Schema:

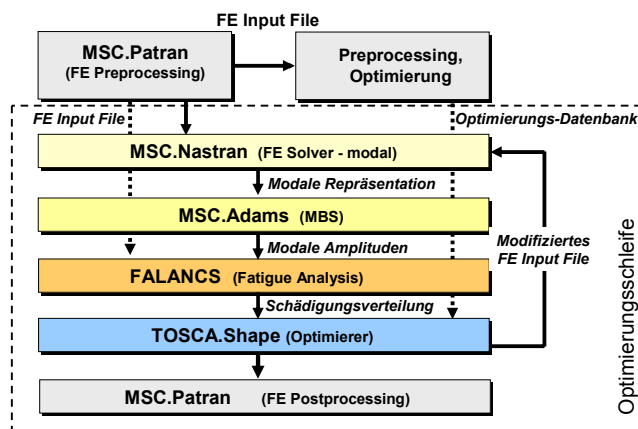


Abbildung 1: Prozessschritte zur rechnergestützten Optimierung von Bauteilen im Hinblick auf Betriebsfestigkeit

Die Lebensdaueranalyse erfolgt auf Basis von Spannungs-/Zeitverläufen, die durch eine gewichtete Superposition der modalen Spannungstensoren aus der FEM berechnet werden. Aus der dynamischen MKS-Analyse werden Zeitreihen der einzelnen modalen Amplituden $q_k(t)$ gewonnen. Sie beinhalten die Zeitabhängigkeit der Spannungsverteilung auf dem Bauteil, die für die Lebensdaueranalyse relevant ist.

Die inkrementelle Formvariation, die durch den Optimierungsalgorithmus herbeigeführt wird innerhalb jeder Iteration, wird durch die Schädigungsverteilung auf der Bauteiloberfläche bestimmt. Die Optimierung erfolgt also direkt auf die Zielgröße „Lebensdauer“ und damit auf Betriebsfestigkeit.

Die Methode wurde zunächst am mkl an akademischen Beispielen erprobt und validiert. Der Optimierungsprozess zeigte sich hierbei als stets stabil und es konnten bei den untersuchten Beispielen sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Die Überprüfung der Praxistauglichkeit insbesondere im auch Hinblick auf Aufwand für Modellierung und Datenmanagement erfolgte in Zusammenarbeit mit TRW Automotive am Beispiel eines PKW-Querlenkers, da für den Fahrwerksbereich bereits weit reichende Erfahrungen bezüglich virtuellen Auslegeverfahren vorliegen.

3 Beispiel: Design und Optimierung eines PKW Querlenkers

3.1 Einleitung

Bei TRW Automotive werden im Engineering Center Düsseldorf u. a. Fahrwerkskomponenten (Gelenke, Spurstangen, Lenker) entwickelt, deren konzeptionelle Auslegung auch durch CAE-Methoden unterstützt wird. Diese stellen jedoch nach wie vor nur Insellösungen dar und sind meist auf statische Lastfälle begrenzt. Auch die Strukturoptimierung hat noch nicht ihr vollständiges Potential ausgeschöpft.

Spricht man von einer durchgängigen virtuellen Entwicklung, müssten folgende Schritte erfolgen:

- Strukturmechanische Grundausslegung:
 - Topologieoptimierung basierend auf ausgewählten Lastfällen
- Funktionsabsicherung auf Betriebsfestigkeit
 - Lastdatenermittlung basierend auf MKS-Modellen, Stichwort „virtuelle Strasse“, siehe [4]
 - Ermittlung einer rechnerischen Schädigungsverteilung
 - Formoptimierung basierend auf den Schädigungsgrößen

Der in diesem Anwendungsbeispiel betrachtete PKW-Querlenker ist im Betrieb zeitlich veränderlichen Belastungen ausgesetzt. Das Frequenzspektrum der Anregungen liegt i. A. unterhalb der ersten Eigenfrequenz des Querlenkers. Des Weiteren sind die festigkeitsrelevanten Lastfälle bekannt. Aus diesen Gründen erscheint eine „konventionelle“ Optimierung basierend auf einigen einzelnen Lastfällen ohne Einbezug von Mehrkörperdynamik und Lebensdaueranalyse zunächst gerechtfertigt.

Eine jedoch weitestgehend noch nicht beachtete Thematik ist der Einfluss von aktiven Fahrdynamikregelsystemen, die je nach Straßen- und Fahrzeugzustand Lastpfade an Fahrwerkskomponenten beeinflussen können [5][6]. Durch die Kopplung der MKS-Systeme mit entsprechenden Regelkreisalgorithmen sind diese in Gesamtfahrzeugmodellen eingepflegt und daher in einem frühen Entwicklungsstadium vorhanden. Eine Integration der MKS-Analyse in den Berechnungsablauf erscheint unter diesen Gesichtspunkten daher sinnvoll, da bei diesen aktiven Systemen auch häufig vorhandene Lastkollektive von Vorgängerfahrzeugen nicht verwendet werden können.

3.2 Strukturmechanische Grundausslegung

Die strukturmechanische Grundausslegung des Querlenkers erfolgt mittels Topologieoptimierung. Hierfür sind unterschiedliche Vorgaben notwendig:

- Bauraumdefinition
- Geforderte Bauteil-Mindeststeifigkeiten
- Fertigungsrandbedingungen
- Festigkeitsrelevante Lastfälle
- Nichtlineare Grenzlasten
- Materialdaten

Abbildung 2 (a) zeigt das Finite Elemente Model des zur Verfügung stehenden Bauraumes. Die grünen Elemente bilden das Designgebiet, die roten Bereiche („frozen elements“) der Struktur sind unveränderlich. Die verwendeten Elastomerlager sind durch Federelemente mit nichtlinearen Kennlinien aus Versuchen modelliert. Als Randbedingungen dienen eine geforderte 80%ige Volumenreduktion im Bauraum, sowie eine vorgegebene Auszugsrichtung als Fertigungsrestriktion im Hinblick auf Entformbarkeit. Die nicht lineare FE Berechnung erfolgte mit ABAQUS.

Für die Optimierung des Bauteils liegen sechs kritische Lastfälle vor, inklusive eines Missbrauchslastfalles. Um eine zu starke Dominanz des Missbrauchslastfalles in der Optimierung zu vermeiden wurden die Lastfälle mittels Materialeigenschaften skaliert:

Betriebslastfälle	Controller Input = Lastfall / Material Streckgrenze
Missbrauchslastfall	Controller Input = Lastfall / Material Zugfestigkeit

Abbildung 2 (b) zeigt das Ergebnis der Topologieoptimierung nach 24 Iterationen. Ausgehend von diesem Designvorschlag wurde mittels CAD die Konstruktion des Querlenkers fertig gestellt (Abbildung 2 (c)).

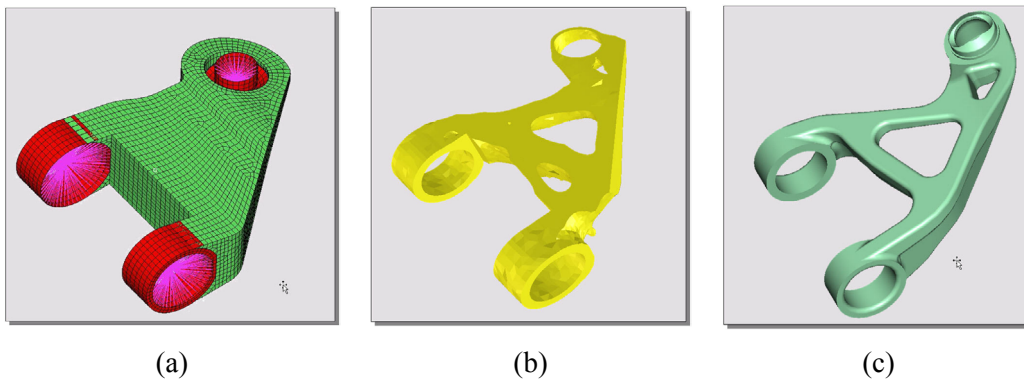


Abbildung 2: Topologieoptimierungsmodell und Ergebnisse

3.3 Gesamtfahrzeug MKS-Modell

Ein MKS-Gesamtfahrzeugmodell (Abbildung 3 (a)) dient als virtueller Prototyp und ermöglicht das „Abfahren“ unterschiedlicher, belastungsrelevanter Fahrmanöver. Der Querlenker wird mittels FEM basierter modaler Superposition im MKS als elastischer Körper repräsentiert (Abbildung 3 (b)).

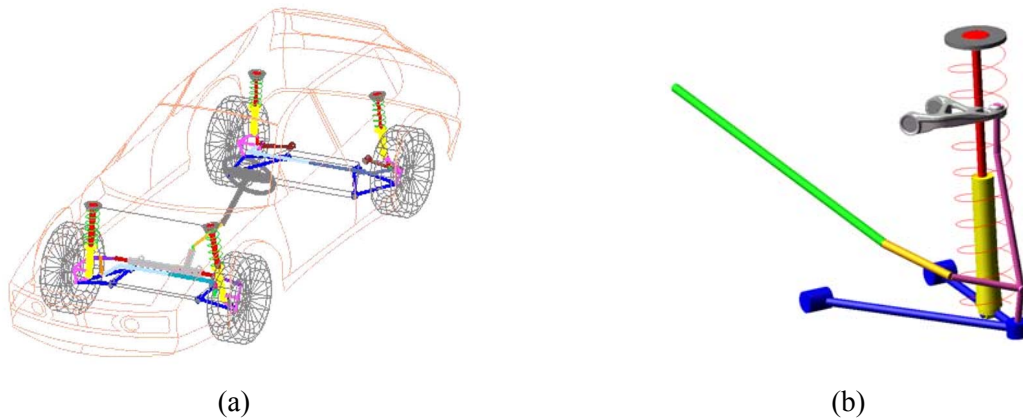


Abbildung 3: Gesamtfahrzeug MKS Modell (a) und Cornermodul mit elastischem Querlenker (b)

Jedes Fahrmanöver liefert einen Satz von Last-/Zeitverläufen für den Querlenker. Hierbei handelt es sich wie oben beschrieben um einen Satz Zeitreihen der modalen Amplituden $q_k(t)$. In der Lebensdaueranalyse werden diese Last-/Zeitverläufe entsprechend ihrer Häufigkeit gewichtet und kombiniert:

Bremsen in der Linkskurve	10%
Bremsen in der Rechtskurve	10%

Bremsen geradeaus	20%
Sinuslenken	50%

3.4 Lebensdaueranalyse

Innerhalb der Lebensdaueranalyse-Software FALANCS werden Spannungs-/Zeitverläufe auf der Bauteiloberfläche berechnet. Hierzu werden die in der FEM Analyse berechneten modalen Spannungstensoren in jedem Zeitschritt skaliert mit den aus der MKS Analyse gewonnenen Zeitreihen modaler Amplituden. Durch Superposition wird der resultierende Spannungs-/Zeitverlauf berechnet:

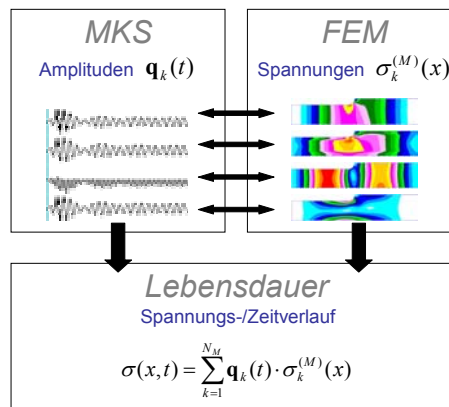


Abbildung 4: Spannungs-/Zeitreihen durch gewichtete modale Superposition

Aus lokalen Spannungs-/Zeitverläufen wird in FALANCS eine Bauteilschädigungsverteilung berechnet. Verwendet wird hier das Stress-Life Verfahren, da es sich um ein typisches High Cycle Fatigue (HCF) Szenario handelt. Die in FALANCS enthaltenen Strain-Life Verfahren können ebenfalls verwendet werden.

3.5 Formoptimierung

Die Formoptimierung mit TOSCA.Shape erfolgt auf Basis der Bauteilschädigungsverteilung. Die Grundlagen für diesen Ansatz wurden am mkl in vergangenen Forschungsarbeiten entwickelt [7][8]. Schädigungsverteilungen weisen im Allgemeinen einen Gradienten auf, der sich von Spannungsverteilungen stark unterscheidet. Die Ursache hierfür ist der nicht lineare Zusammenhang zwischen Spannungsamplitude und Lastspielzahl (SN-Kurve). Um eine Regleranpassung auf Seiten des Optimierers zu vermeiden wird die Schädigungsverteilung zunächst über das Materialgesetz zurückgerechnet auf eine Ersatz-Spannungsverteilung. Diese Spannungsverteilung entspricht der Schädigungsverteilung und beinhaltet damit die ganze Lastgeschichte, weist jedoch wieder einen für Spannungsverteilungen typischen Gradientenverlauf auf. Durch diese Rückrechnung kann ein und derselbe Regler in TOSCA.Shape verwendet werden, sowohl für die Optimierung auf Spannungen, als auch auf Schädigungen.

3.6 Ergebnisse

Die Optimierung wurde auf einer IBM xSeries 345 mit Intel Xeon CPU (2,8 GHz) und 2 Gb Hauptspeicher durchgeführt. Das Finite Element Modell des Querlenkers hat ungefähr 314.500 Freiheitsgrade. Nach 20 Iterationen lieferte die Lebensdaueranalyse keine Schädigung mehr, der Querlenker erreichte Dauerfestigkeit. Der gesamte Prozess (20 Iterationen) dauerte knapp acht Stunden. Abbildung 5 zeigt das Startmodell mit Schädigungsergebnissen. Eine Bauteilschädigung tritt an einer einzigen Stelle auf:

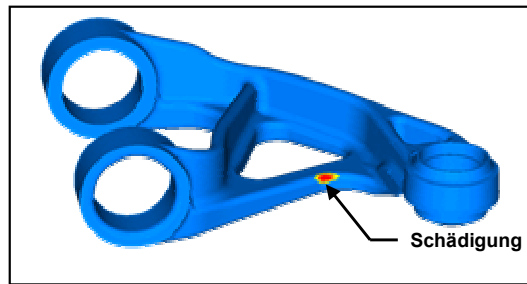


Abbildung 5: Schädigungsverteilung auf dem Startmodell

Abbildung 6 zeigt die Finite Elemente Netze von Startmodell (a) und optimiertem Modell (b) im Bereich der betriebsfestigkeitskritischen Region. Um die beiden Geometrien einfacher vergleichen zu können sind die Randkontouren der beiden Modelle in Abbildung 7 (a) zusammen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die wesentliche Formveränderung einer Verringerung der lokalen Oberflächenkrümmung entspricht. Der Optimierer erzielte diese Veränderung hauptsächlich durch ein Schrumpfen der Struktur im wenig beanspruchten Bereich rechts des Schädigungsgebietes. Das Gesamtgewicht des Querlenkers blieb nahezu konstant.

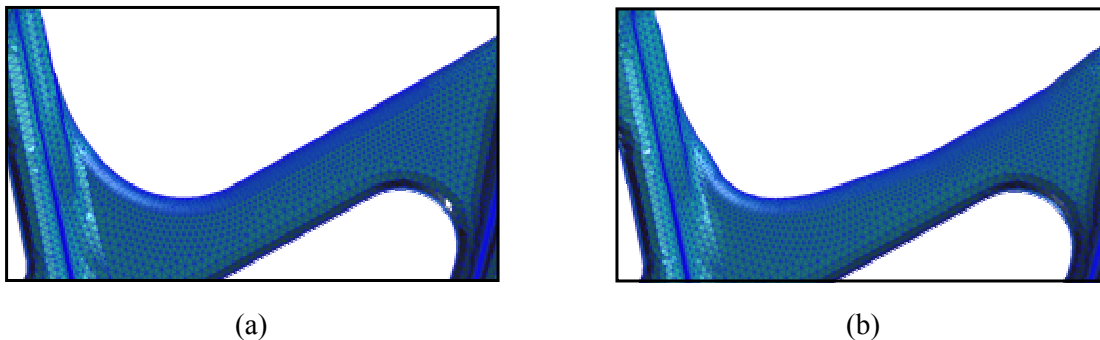


Abbildung 6: Finite-Elemente-Netz: Startmodell (a), optimiertes Modell (b)

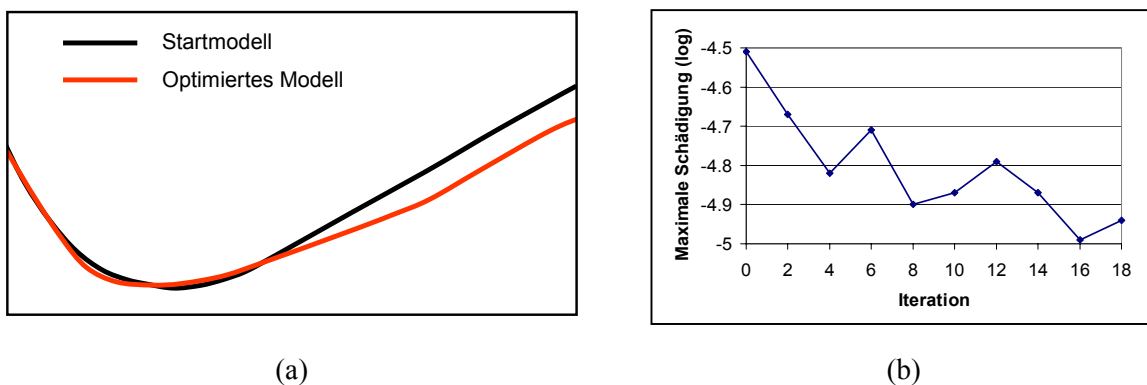


Abbildung 7: Vergleich der Randkontour (a) und maximale Schädigung vs. Iteration (b)

Der Optimierungsprozess verlief stabil, obwohl die Maximalschädigung im Modell nicht monoton abnimmt, wie in Abbildung 7 (b) zu erkennen ist. Das oszillatorische Verhalten der Maximalschädigung resultiert direkt aus Netzveränderungen durch den Optimierer. Eine Veränderung der Bauteiloberfläche kann zu neuen, kleinen lokalen „Kerben“ führen. Diese wiederum führen zu einer Spannungserhöhung und damit zu größeren Schädigungen in diesem Gebiet. Dadurch verändert sich auch hin und wieder der Ort der Maximalschädigung von Iteration zu Iteration. Um die Stabilität des Optimierungsprozesses zu gewährleisten ist es deshalb gegebenenfalls nötig, die maximal zulässige Knotenverschiebung pro Iteration zu beschränken um zu große Veränderungen zu vermeiden. Eine Glättung des Netzes im Designgebiet innerhalb jeder Iteration kann hier Abhilfe schaffen.

4 Bewertung und Ausblick

Die bisherigen Arbeiten zeigen sehr gute Ergebnisse bei der Optimierung auf Betriebsfestigkeit. Die prinzipielle Koppelung und Integration der verwendeten Analysearten hat sich bewährt und großes technologisches Potential bewiesen. Gleichzeitig wird bei diesen ersten Erfahrungen jedoch auch deutlich, wie entscheidend die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen wie Materialparameter, Bauteileigenschaften, mechanisches System, äußere Anregungen und Betriebszustände etc. für eine erfolgreiche Anwendung der Methode in der Praxis ist. Darüber hinaus stellt die Verzahnung ganz unterschiedlicher numerischer Verfahren hohe Anforderungen an den Berechnungsingenieur. Teilmodelle müssen vollständig und validiert sein, eine große Menge an unterschiedlichen Informationen und Daten muss aufbereitet und prozessgerecht angepasst werden. Arbeitsprozesse und Ausbildung/Training müssen gegebenenfalls angepasst werden um das notwendige, umfangreiche Know-How für solche Design- und Auslegungsverfahren bereitzustellen. Strukturen und Kommunikationswege in Berechnungsabteilungen müssen eventuell verändert werden um eine durchgängige virtuelle Produktentwicklung zu ermöglichen.

Für den industriellen Einsatz sind noch weitere Arbeiten nötig, aber die aufgezeigten Ergebnisse lassen auf eine deutliche Effizienzsteigerung im CAE-Prozess schließen. Für einen Automobil-Zulieferer wie TRW Automotive ergeben sich auch Perspektiven im Hinblick auf Technikkompetenz und Innovationsfreudigkeit, die für den Automobilhersteller ein wichtiges Argument bei der Zusammenarbeit mit Systemzulieferern darstellen.

Literatur

- [1] Vieker, D.; Häußler, P.; Albers, A.
„Neue Konzepte für die virtuelle Produktentwicklung von Leichtbaustrukturen – Ansätze aus der Automobilzulieferindustrie“
Konstruktion, Springer VDI-Verlag, Oktober 2003, pp. 42-44
- [2] Emmrich, D.; Häußler, P.; Albers, A.
“Automated Structural Optimization of Flexible Components Using MSC.ADAMS/Flex and MSC.Nastran Sol200“
1st European MSC.ADAMS User Conference, London, 2002
- [3] Häußler, P.; Emmrich, D.; Ilzhöfer, B.; Albers, A.
“Automated Topology Optimization of Flexible Components in Hybrid Finite Element Multibody Systems using ADAMS/Flex and MSC.Construct“
ADAMS European User's Conference, Berchtesgaden, Germany, 2001
- [4] Kaps, L.; Lion, A.; Zhang, G.; Stolze, F.
“Ganzheitliche Analyse von Fahrzeugprototypen mit Hilfe von virtuellen Fahrzeugmodellen und virtuellen Prüfgeländen“
VDI Kongress „Berechnungen und Simulation im Fahrzeugbau“, Würzburg, 2002
- [5] Lepold, A.; Ammon, G.
“Beeinflussung des Lastpfades an einer Hinterachse mittels aktiver Fahrwerkskomponenten“
DVM-Tagung „Mechatronik und Betriebsfestigkeit“ 2003, Stuttgart
- [6] Traunbauer, J.; Thanner, G.; Unger, B.
“Betriebsfestigkeitsprüfung aktiver Fahrwerksysteme“
DVM-Tagung „Mechatronik und Betriebsfestigkeit“ 2003, Stuttgart
- [7] Ilzhöfer, B.; Häußler, P.; Müller, O.; Allinger, P.; Albers, A.
“Shape Optimization Based on Parameters from Life Time Prediction“
NAFEMS-Seminar: Betriebsfestigkeit, Lebensdauer, Wiesbaden, 2000
- [8] Ilzhöfer, B.; Häußler, P.; Müller, O.; Albers, A.; Allinger, P.
”Shape Optimisation Based On Lifetime Prediction Measures”
ICED 2001 International Conference on Engineering Design Glasgow, August 21-23, 2001

