

# Weitere Fortschritte in der Topologie und Formoptimierung unter Verwendung von MSC/ NASTRAN als Analysepaket

Ingo Raasch, BMW AG, München, VDI  
David F. Bella, CDH, Ingolstadt  
Ottmar Müller, FE-Design, Karlsruhe

## 1. Ausgangssituation

In der Fahrzeugentwicklung bei BMW wird schon seit langem Strukturoptimierung eingesetzt. Die Bauteildimensionierung mit Hilfe der mathematischen Optimierung unterstützt standardmäßig die Karosserieentwicklung und hat sich dort als ein unersetzliches Werkzeug in den immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen bewährt /1/.

Für die Komponentenentwicklung wurden schon sehr früh Optimierungsverfahren für die Formgestaltung entwickelt und erfolgreich eingesetzt /2,1/. Jedoch ist die Generierung der dazu notwendigen Formvektoren sehr zeitaufwendig, so daß diese Verfahren nicht die erhoffte Akzeptanz in der Aggregateentwicklung gefunden haben. Fortschritte wurden dadurch erzielt, daß die Formoptimierung in das CAD-System weitgehend integriert wurde, so daß die Formvektoren mit den Hilfsmitteln des CAD Systems erzeugt wurden. Diese Vorgehensweise verlangt aber eine CAD- Konstruktionsweise, die die Belange der Formparametrisierung gleich berücksichtigt. Eine konfliktfreie Parametrisierung für einen größeren Designraum ist wiederum nicht trivial und sehr zeitaufwendig, so daß die Akzeptanz dieser Vorgehensweise auch zu keinem größeren Durchbruch verhalf.

## 2. Optimalitätskriterien-Verfahren

Mathematische Optimierungsverfahren verlangen klare Definitionen von Designvariablen, Restriktionen und einer Zielfunktion. In der linearen Struktur-optimierung werden dann meist Gradientenverfahren verwendet, bei denen die notwendigen Ableitungen nach den Designvariablen teils analytisch und teils numerisch bestimmt werden. Diese, auch Sensitivitäten genannten Gradienten, sind bei der Formoptimierung in der Regel nur numerisch zu bestimmen, was wesentlich aufwendiger ist.

Optimalitätskriterien-Verfahren gehen davon aus, daß eine direkte Beziehung zwischen Designvariable und Zielfunktion besteht: z.B. die Querschnittsfläche eines Stabes, die Designvariable, ist umgekehrt proportional zu der auftretenden Spannung, der Zielfunktion. Diese Beziehung stimmt natürlich nur für ein statisch bestimmtes Tragwerk, sonst in der Näherung nur für kleine Änderungen des Querschnittes. Diese Vorgehensweise wurde schon früh in den „fully stress design“ Verfahren erfolgreich für fachwerksähnliche Tragwerke angewendet. Diese Verfahren haben den Vorteil, daß sie in der Regel sehr schnell konvergieren. Der Aufwand für die „Optimierung“ besteht pro Iteration aus einer Standardanalyse und einer kurzen Neuberechnung der Designvariablen. Da letzteres nicht sehr aufwendig ist, empfiehlt es sich, die „Optimierungs-

schleife" um ein Standard-analysepaket zu legen, um so am Software-Entwicklungsfortschritt der großen Pakete teilzuhaben.

Optimalitätsverfahren für die Formoptimierung wurden im Umfeld der Universität Karlsruhe entwickelt /3/ und in der Software MSC/CONSTRUCT realisiert /4/.

Für die Formoptimierung kann die Designvariablen-Zielfunktionsbeziehung vereinfacht so angegeben werden: An Stellen, an denen die lokalen Beanspruchungen in der Oberfläche hoch sind, wird die Oberflächenkrümmung reduziert, an Stellen, an denen die lokalen Beanspruchungen niedrig sind, wird die Oberflächenkrümmung erhöht. Diese Gesetzmäßigkeiten leiten sich aus Kerbspannungsüberlegungen von Neuber und Schnack her.

Für die Topologieoptimierung wird von einem homogen mit Material belegten Designraum ausgegangen. Zur Veranschaulichung der Lösungsfindung ist es hilfreich, wenn man sich vorstellt, daß dieser Designraum aus porösem Material besteht. Hohe Beanspruchungen werden reduziert, indem der Porenanteil verringert wird, wodurch die Dichte steigt. Orte niedriger Beanspruchung vergrößern ihren Porenanteil, wodurch die Dichte fällt. Damit entwickelt sich für einen bestimmten Masseneinsatz eine Struktur, die auch für Viellastbeanspruchung die maximale Steifigkeit aufweist.

### **3. MPP-Version von MSC/NASTRAN**

Im Rahmen des ESPRIT-Projekts EUROPORT1 der Europäischen Union wurden im HPCN Programm einige FEM Programme für Rechner umgestellt. Diese Rechner haben ein erheblich besseres Preis/Leistungsverhältnis als herkömmliche Rechner und schaffen den vergleichbaren Durchsatz dadurch, daß das Problem auf mehrere vernetzte Rechner mit eigenem Kernspeicher verteilt wird, um es gemeinsam zu lösen. Bei MSC/NASTRAN waren die Parallelisierungsanstrengungen auf die Standardlösungsalgorithmen für Statik und Eigenwertberechnung begrenzt. Die nicht parallelisierten Teile, einschließlich der Optimierung, laufen sequentiell auf dem "Master Node".

Weil, wie oben erwähnt, Optimalitätskriterien-Verfahren nur einen Bruchteil der Rechenzeit beanspruchen und in der Regel Standardlösungsverfahren benutzen, kann zur Reduzierung der Rechenzeit für Topologie- und Formoptimierungen die parallele Version von MSC/NASTRAN (PMN) eingesetzt werden. Diese Kopplung war Ziel des von der Europäischen Union geförderten Projektes HIPOP (High Performance OPTimization).

### **4. Topologieoptimierung**

Der Designraum wird durch Finite Elemente abgebildet und gegebenenfalls mit der Reststruktur verbunden. Für die einzelnen Belastungen werden die Beanspruchungen in den Elementen des Designraumes ausgewertet, und auf Grund verschiedener Kriterien eine neue Dichte und ein neuer E-Modul festgelegt. Mit dem so veränderten Modell wird eine neue Analyse durchgeführt. Nach wenigen Iterationen konzentriert sich das Material mit hohem E-Modul und hoher Dichte in den Regionen, in denen Strukturelemente sein sollen. Dieses Verfahren sucht die steifste Struktur, die mit einem vorgegebenen Volumenanteil des Materials mit hohem E-Modul zu erreichen ist.

## 4.1 Vernetzung des Designraumes

Für einfache Topologiebeispiele ist die Vernetzung des Designraums mit kommerziellen Preprozessoren kein Problem, und es bieten sich hier die automatischen Tetramesher an, die Tetraeder mit Zwischenknoten verwenden. Doch in der Realität ist dieser Raum nicht einfach begrenzt, zumal wenn man vorhandene CAD-Flächen verwenden will. Dies führt häufig zu einer nicht konvergierenden Iteration über den einzigen Steuerparameter, die durchschnittliche Seitenlänge für die Dreiecksvernetzung der Oberfläche. In diesem Prozeß gibt es vier Stufen des (Miß)erfolges:

1. Der Vernetzer bricht ab, weil er das unter der Oberfläche liegende Volumen nicht schließen kann.
2. Die Qualitätskontrolle des Vernetzers beanstandet das Netz, und der Fix-Algorithmus kann die degenerierten Elemente nicht verbessern.
3. Der Vernetzer befindet das Netz für in Ordnung, doch MSC/NASTRAN findet degenerierte Elemente.
4. Der Vernetzer und MSC/NASTRAN akzeptieren das Netz.

Dieser Zustand ist nicht sehr befriedigend, da die Steuerungsmöglichkeiten kaum einen Bezug zum Problem haben.

Die Forderungen an den Designraumvernetzer unterscheiden sich von denen eines Komponentenvernetzers: während man bei der Komponente eine möglichst hohe Netzqualität an der Oberfläche verlangt, ist die Oberfläche für die Topologie-optimierung von geringer Bedeutung. Hier ist es wichtig, daß der gesamte Designraum mit konstanter Elementgüte abgebildet wird.

Bei Kollisionsuntersuchungen im CAD wird eine Technik verwendet, bei der die zu untersuchenden Bauteile mit Würfeln gleicher Größe ausgefüllt werden (Voxeltechnik). In Finiten Elementen ausgedrückt, ist dies ein ideales FEM-Netz. Die Software ist bereits vorhanden und im CAD-System eingebettet. Mit einer Zusatzfunktion der Voxeltechnik können die entsprechenden FEM-Volumenelemente und Knoten des Designraums ausgegeben werden. In einem Standard-Preprozessor wird das Volumenmodell mit der Reststruktur verbunden.

## 4.2 Beispiel Federbeindom

Diese Vorgehensweise soll am Beispiel eines Federbeindoms einer Rohkarosserie erläutert werden. Der Designraum (Fig.1) wird nach unten durch die Radhüllfläche und Bodenfreiheit begrenzt, nach außen durch die Seitenwand und den über dem Radhaus verlaufenden Stützträger, nach innen durch den Motorfreiraum und den Motorträger und schließlich nach hinten durch die Stirnwand. Die zu suchende Struktur darf nur 5% des Raumes ausfüllen. Um die Lasten einzuleiten und die Strukturrückwirkungen mit zu berücksichtigen, wird das Designraummodell mit einem Konzeptauslegungsmodell der Gesamtstruktur verbunden. Für die Steifigkeitsbelastungsfälle ist die Zielfunktion der möglichst steifen Struktur anwendbar. Für Festigkeitsbelastungen, wie sie aus der Zellenstabilität unter Massenträgheit herrühren, ist diese Zielfunktion nur bei statisch bestimmten Strukturen exakt. Hier ist weitere Entwicklungsarbeit notwendig. Die sich ändernde Massenträgheit des Designraumes ist in dieser Anwendung von untergeordnetem Einfluß. Fig. 2 zeigt das Gesamtmodell, der Designraum ist mit konstanten Hexaedern aus der Voxeltechnik und das restliche Konzeptauslegungsmodell mit Balken/

Schalenelementendargestellt.

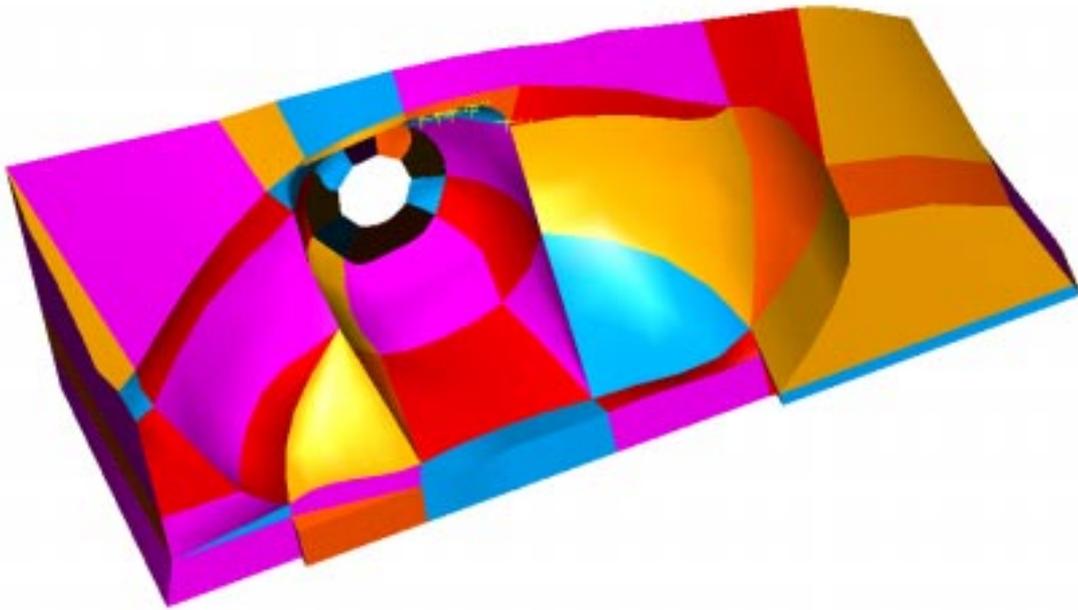


Fig.1: Designraum für Federbeinbindung

Die Auflösung des Designraumes in 75.000 Elemente ist als eher zu grob anzusehen. Es wurden 6 Belastungen unter 4 verschiedenen Randbedingungen betrachtet. Eine einzelne CPU einer IBM SP2 benötigte für eine Iteration für dieses Modell etwa 22 Stunden, mit einer 8 CPU-Maschine konnte die Durchsatzzeit auf etwa 7 Stunden reduziert werden. Nach 8 Iterationen stellt sich der in Fig. 3 und 4 dargestellte Strukturvorschlag dar. Neben der hinteren Radhausschale ist deutlich eine Abstützung der Federbeinaufnahme nach vorne zum Motorträger und nach hinten zum Knoten A-Säule-Windlauf zu erkennen. Außerdem hat die Verbindung senkrecht zum Motorträger eine breite Basis.

Das Optimierungsergebnis führt nicht direkt zu einem neuen Strukturvorschlag, sondern erfordert eine gewisse Interpretation. Sie wird bei zu grober Darstellung des Designraums zum "Kaffeersatzlesen".

Die erforderlichen Computerressourcen sind heute sicherlich nicht leicht darstellbar, aber z.B. an Wochenenden durchaus möglich. Nachdem die Performance der Standardanalyseanwendungen in den letzten Jahren deutliche Steigerungen erfuhr, werden auch in Zukunft die Rechenzeiten deutlich fallen.

Wichtig in diesem Stadium der Produktentwicklung ist aber, daß durch den Einsatz der Topologieoptimierung mit MSC/CONSTRUCT realitätsnahe und daher meist sehr gro-

ße Strukturen überhaupt optimiert werden können.

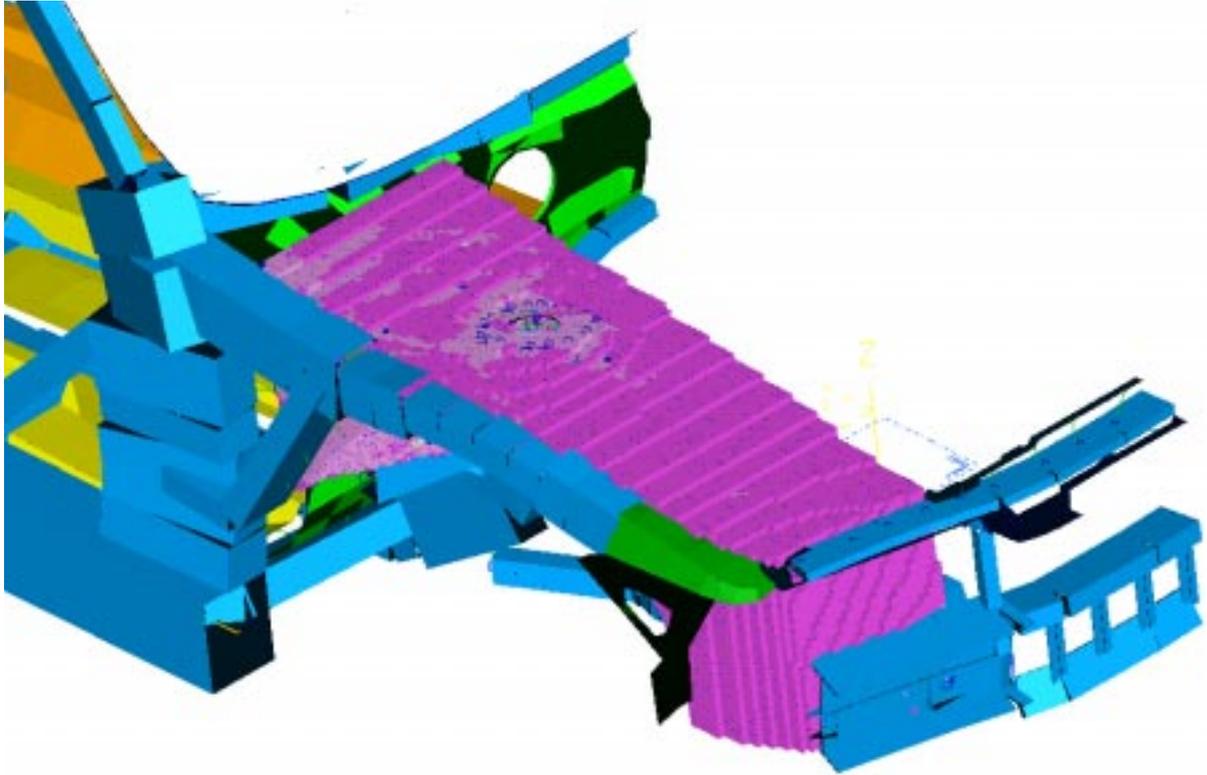


Fig.2: Gesamtmodell für Topologieoptimierung

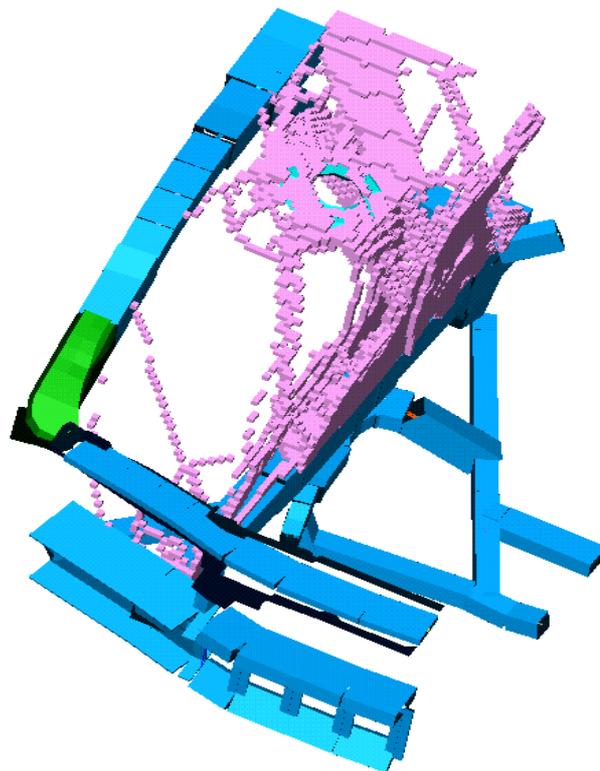


Fig.3: Ergebnis der Topologieoptimierung

## 5. Formoptimierung

Die Nutzung der Formoptimierung hat im Hause BMW schon eine lange Tradition. Die Anfänge gehen auf Zeiten zurück, in denen MSC/NASTRAN noch keine Optimierungsalgorithmen enthielt und es nur als Analyse Programm verwendet wurde /1/.

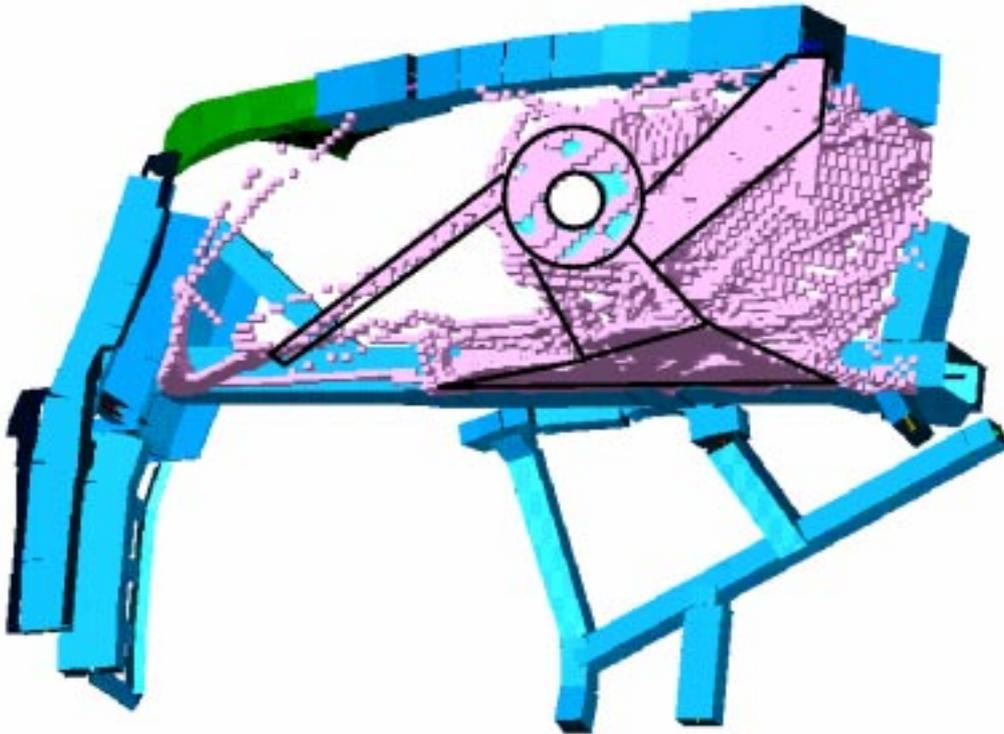


Fig.4: Topologieoptimierung; Ergebnisinterpretation

Die selbst entwickelten Verfahren wurden auch für etliche Komponenten im Motorenbereich sehr erfolgreich eingesetzt. Das Verfahren findet die optimale Form aus einer linearen Überlagerung von Formvektoren. Die Erzeugung der Formvektoren ist die eigentliche Schwierigkeit in der Anwendung. Sie müssen konstruktiven Gegebenheiten Rechnung tragen, aber auch Spannungen an den kritischen Stellen beeinflussen. Sie werden entweder mit Hilfe von Fortran-Programmen oder über Ersatzstrukturen erzeugt. Dabei wird über die zu verändernde Oberfläche eine Schalenstruktur gelegt. Deren Verformungen unter Lasten ergeben die Formvektoren an der Oberfläche. Anschließend wird die Oberflächenverformung auf das Innere des Netzes interpoliert. Um die Netzqualität möglichst lange zu bewahren, müssen die Formvektoren für das komplette FEM Netz erstellt werden.

### 5.1 Optimalitätskriterien versus mathematische Optimierung

Bei der mathematischen Optimierung ist der Skalierungsfaktor des Formvektors die Designvariable. Für jeden Vektor wird der Gradient nach den aktiven Restriktionen und der Zielfunktion, in der Regel numerisch, berechnet. Verwendet man zur numerischen Gradientenbestimmung ein zentrales Differenzenverfahren, so muß die Steifigkeitsmatrix zweimal erstellt werden. Bei Volumenmodellen entspricht dies ungefähr 50%

der Analysezeit.

Die Zielfunktion kann aus dem Gewicht und beliebigen Ergebnissen der Analyse zusammengesetzt werden.

Optimalitätskriterien-Verfahren arbeiten eigentlich nur mit einem Formvektor, den sie direkt aus den Analyseergebnissen in Form und Größe erstellen und in der nächsten Analyse überprüfen. Dahinter stehen Hypothesen wie: eine Struktur mit einer homogenen Beanspruchungsverteilung auf der Oberfläche ist auch eine maximal steife Struktur. Die Umsetzung der Analyseergebnisse in den Formvektor erfordert nur wenig Rechenzeit, so daß die Analyse den wesentlichen Anteil der Rechenleistung darstellt. Restriktionen, die definiert werden können, sind genaugenommen nur Abbruchkriterien für die Iteration. Das bedeutet, der Optimierungsprozess kann nur im zulässigen Bereich gestartet werden.

Ist die Zielfunktionsdefinition des Optimalitätskriterien-Verfahrens für die Aufgabenstellung ausreichend, ist dies das Verfahren der Wahl.

## **5.2 Automatische Formvektorerzeugung für mathematische Optimierung**

Wie oben schon dargelegt wurde, ist die Erzeugung von geeigneten Formvektoren kein triviales Unterfangen. Die Benutzung von Hilfsstrukturen kann es zwar unterstützen, aber verlangt ein hohes Verständnis strukturmechanischer Zusammenhänge. Daher wurde nach einem Weg gesucht, der die Generierung weitgehend automatisiert.

Die Teile der Oberfläche des Bauteils, die verändert werden dürfen, müssen definiert werden. Hier wird zur Definition ein Überzug mit Schalenelementen gewählt. Diese Hilfsstruktur kann mit geeigneten Rand- bzw. Kontinuitätsbeziehungen einer Modalanalyse unterzogen werden. Die sich daraus ergebenden Eigenvektoren können als Formvektoren verwendet werden. Die Gefahr dieser Vorgehensweise liegt in der Tatsache, daß man leicht viele Formvektoren erzeugen kann, die ihrerseits die Rechenzeit hochtreiben. Daher ist eine Abschätzung über die Relevanz der einzelnen Eigenvektoren und ihre Anzahl erforderlich.

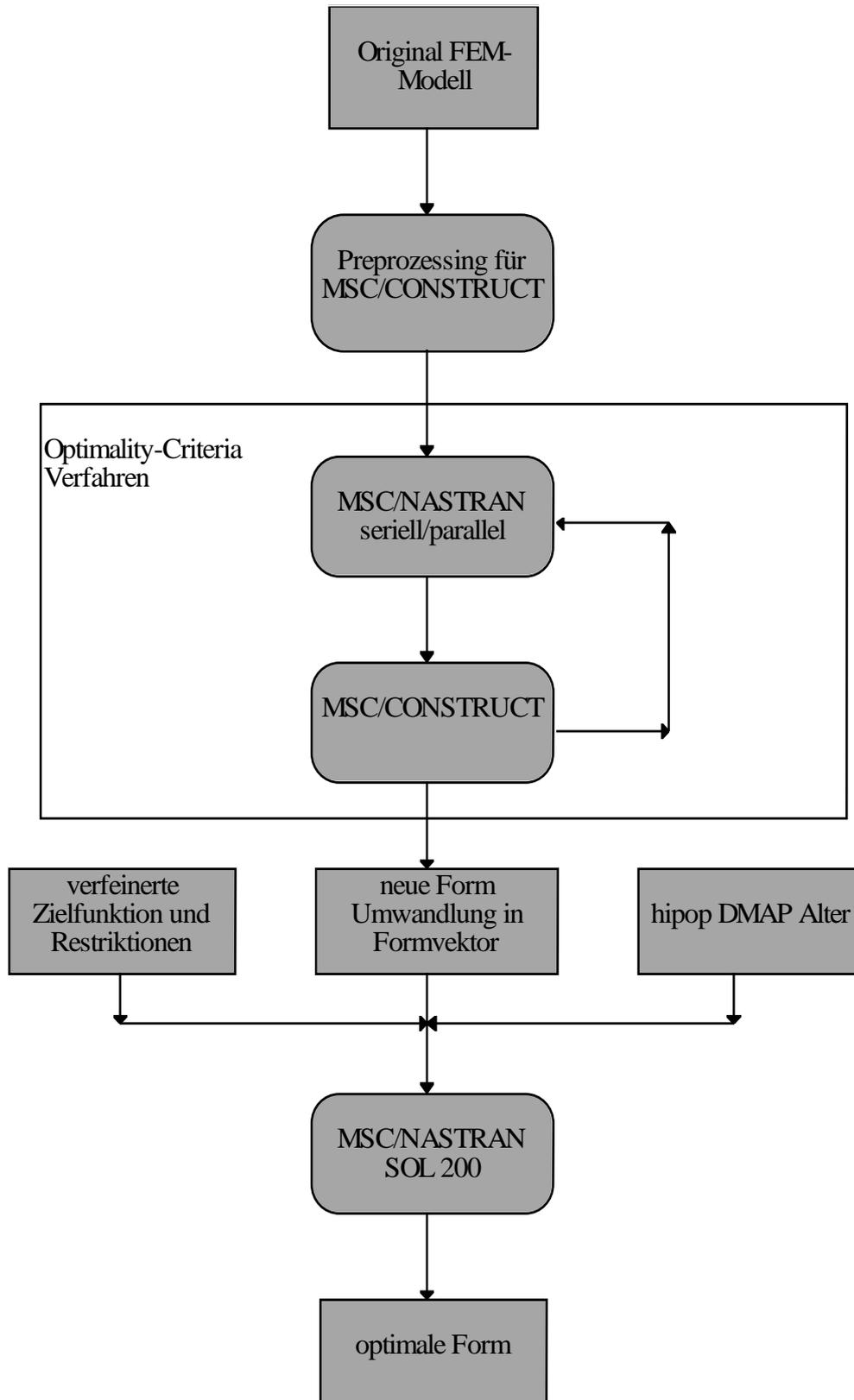
## **5.3 Kombination der Verfahren**

Das Optimalitätskriterien-Verfahren läßt sich in der Praxis einfach und schnell einsetzen, wenn die Zielfunktion einigermaßen anwendbar ist. In der Durchführung ist die Anforderung an Rechenleistung sehr gemäßigt. Mit der mathematischen Optimierung lassen sich Zielfunktion und Restriktionen der Aufgabenstellung angepaßter beschreiben, jedoch wird der Aufwand für Erzeugung der Formvektoren und die erforderliche Rechenleistung extrem hoch.

Da die Formoptimierung in der Regel auch stark nichtlinear ist, sind meist kleine Schrittweiten und viele Iterationen notwendig. Daher ist es naheliegend die beiden Verfahren zu kombinieren: Mit dem Optimalitätskriterien-Verfahren versucht man schnell in die Nähe des Optimums zu kommen. Transformiert man die damit gewonnene Formänderung in den Raum, den die Eigenvektoren der zu optimierenden Oberfläche bilden, erhält man eine Abschätzung, welche und wieviele der Eigenvektoren als Form-

vektoren in der anschließenden mathematischen Optimierung zu verwenden sind.

Fig. 5 zeigt den schematischen Ablauf dieser Vorgehensweise, die zum einen das Problem der Formvektoren löst und zum anderen die notwendigen Rechenleistungen erheblich reduziert und sie damit für eine breitere Anwendung attraktiv macht.



## 5.4 Beispiel Kurbelwellenteilstück

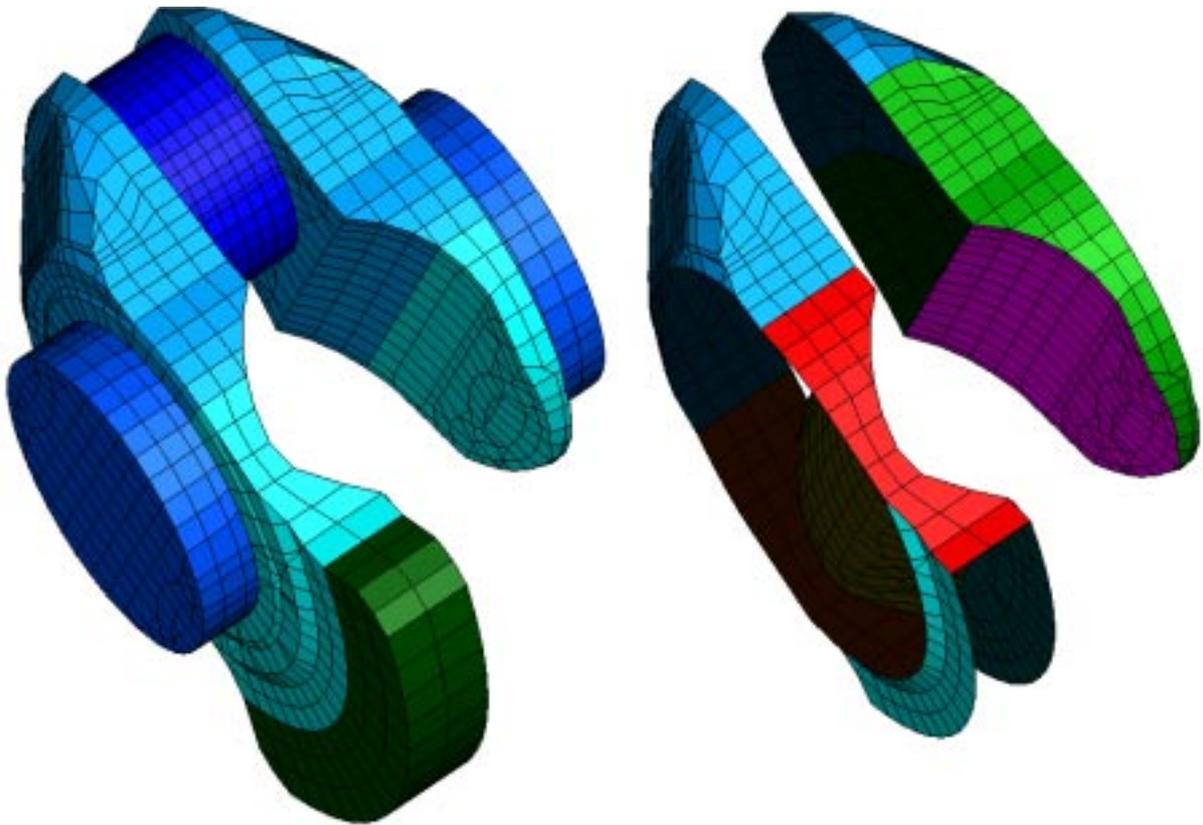


Fig.6 und 7.: FEM-Modell der Ausgangsstruktur / Designflächen als Schalenüberzug

Dieses Verfahren soll am Beispiel eines Kurbelwellenabschnittes demonstriert werden. Fig. 6 zeigt das FEM-Modell der Ausgangsstruktur, die sich stark an existierenden Kurbelwellen orientiert. Es ist das Gewicht zu minimieren unter Beibehaltung der statischen und dynamischen Steifigkeiten. Diese werden durch statische Verschiebungen und die untersten Eigenwerte kontrolliert.

Im ersten Schritt wurden mit MSC/CONSTRUCT nur die statischen Restriktionen beachtet, der zweite brachte die Struktur in den zulässigen Bereich im Bezug auf die dynamischen Restriktionen zurück. Fig. 7 stellt die zu optimierende Oberfläche als Schalenüberzug dar. Fig. 8 zeigt die Formänderung auf Grund der Optimalitätskriterien-Optimierung und Fig. 9 diejenige, die sich aus der nachfolgenden mathematischen Optimierung ergibt. Vergleicht man Fig. 8 und 9, so wird deutlich, daß die erste Optimierung in den meisten Regionen schon das Optimum findet, während der zweite Schritt nur noch eine Detailverbesserung bringt. Von der Gewichtserleichterung ergaben sich etwa 80% im ersten Schritt, während der zweite den Rest brachte. Das Ver-

hältnis des Rechenaufwandes für die beiden Schritte war etwa 1:8.

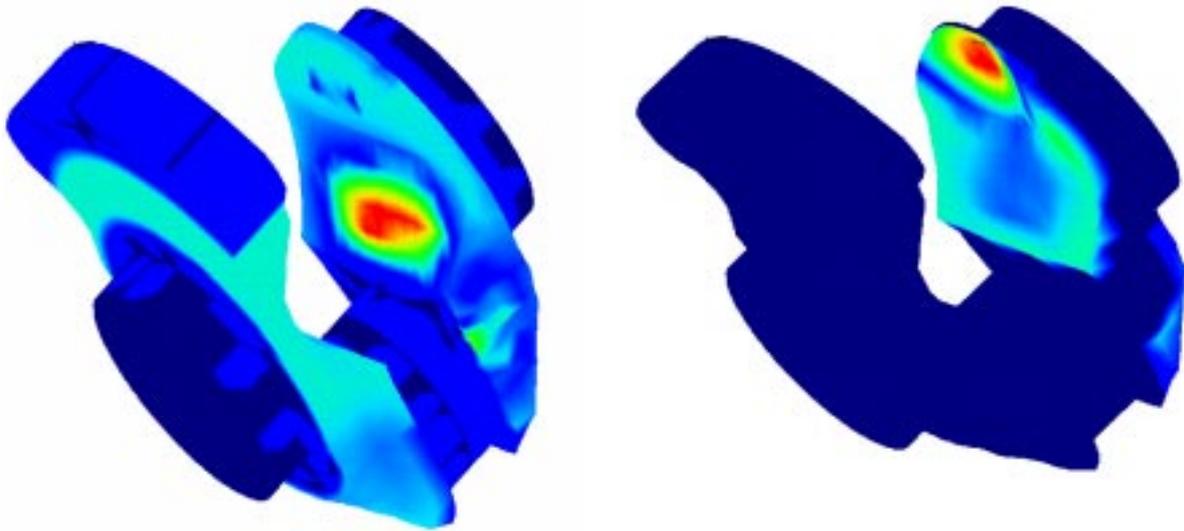


Fig.8 und 9.: Formänderungen durch die Optimalitäts- / mathematische Optimierung

## 6. Schlußfolgerungen

Optimalitätskriterien-Verfahren wie sie in MSC/CONSTRUCT für die Topologie- und Formoptimierung implementiert sind, können als effiziente Werkzeuge benutzt werden. Sowohl um in einem Designraum einen Vorschlag für eine optimale Topologie zu finden, als auch, um die Formoptimierung auf der Basis der mathematischen Optimierung dramatisch zu beschleunigen.

Für die Topologieoptimierung läßt sich das Problem der automatischen Vernetzung des Designraumes mit Volumenelementen mit der von CAD-Kollisionsuntersuchungen bekannten Voxeltechnik schnell und effektiv lösen. Die erforderliche Rechnerleistung für Anwendungen aus dem Bereich von Schalenstrukturen ist zwar nicht unmöglich, aber doch noch sehr hoch. Hier sind massiv parallele Rechner sicherlich von großem Nutzen, damit Durchsatz und Preis/Leistungsverhältnis vertretbar sind.

Bei der Formoptimierung ist eine Kombination aus Optimalitätskriterien-Verfahren, automatischer Formvektorenerzeugung und mathematischer Optimierung ein sehr effizienter Weg, der sich weitgehend automatisieren läßt.

Der Übergang zwischen den einzelnen Softwarekomponenten muß nahtlos erfolgen und diese müssen weitgehend in das CAD-System integriert werden.

## 7. Literaturhinweise

- /1/ Raasch, I.; *Structural Optimization with Solution 2001 in the Design Process*; MSC/NASTRAN World User's Conference, Lake Buena Vista, 1994
- /2/ Raasch, I.; Irrgang, A.; *Shape Optimization with MSC/NASTRAN*; MSC/NASTRAN European User's Conference, Rome, 1988
- /3/ Sauter, J.; *CAOSS oder die Suche nach der optimalen Bauteilform durch eine effiziente Gestaltoptimierungsstrategie*; XX. Internationaler Finite Element Congress, Baden-Baden, 1991
- /4/ Müller, O. et al.: *A New Approach for Sizing, Shape and Topology Optimization*; SAE Technical Paper Series No. 960814. International Congress & Exposition Detroit, Michigan, 1996

Danksagung:

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden von der Europäischen Union im Rahmen des HIPOP-Projektes (Projekt-Nr.: 24832) gefördert.