

Optimierung von Strukturen unter Benutzung einfacher CAO- und SKO-Strategien in MSCN4W

Marc Quint

Ingenieurbüro für Tragwerksplanung, Reutlingen

marc.quint@xperteez.de bzw. www.xperteez.de

Zusammenfassung

Am Beispiel von einigen ausgewählten Konstruktionen werden vergleichende Berechnungen unter Benutzung von Schalen- und Hexaeder-Elementen durchgeführt. Diese werden mit der "Methode des biologischen Wachstums" (CAO – Computer Aided Optimization – Form-Optimierung) bzgl. der Reduktion der Spannungsspitzen optimiert und verglichen.

Anhand von Beispielen der einschlägigen Literatur werden Berechnungen der CAO und SKO (Soft Kill Option - Topologie-Optimierung) mit MSCN4W durchgeführt und Möglichkeiten der Rückführung der Ergebnisse zur Ursprungs-Geometrie aufgezeigt.

Zur Programmierung der erforderlichen Evaluierungsfunktionen und des Iterationsablaufes wird die in MSCN4W implementierte *API BASIC Scripting Language* verwendet. Diese stellt über allgemeine auch in VB enthaltene Funktionen insbesondere Funktionen und Subroutinen zur Verfügung, welche den Zugriff und die Manipulation von nahezu alle Ein- und Ausgabewerten von MSCN4W erlaubt.

Überblick

Die Begriffe Form- bzw. Gestalts- (shape-optimization) und Topologie-Optimierung sind derzeit die wohl beliebtesten Begriffe für neue umwälzende Technologien im Bereich der Finite-Element-Anwendungen.

Das Thema als solches ist schon recht alt und man hat sich bereits vor längerer Zeit mit Optimierungsmöglichkeiten von Strukturen beschäftigt. Seit ca. 20 Jahren sind Wissenschaftler bereits auf der Suche nach Möglichkeiten Material und damit Kosten zu sparen bzw. vorhandene Ressourcen besser zu nutzen.

Teilt man diese nun in zwei Klassen ein, so kann man die Technologien grundsätzlich in Parameter-Methoden und solche die über empirische Ansätze funktionieren unterscheiden.

Letztere erfreuen sich immer mehr Beliebtheit bei Programmierern und Praktikern, da Sie grundsätzlich einfacher und anschaulicher anzuwenden sind. Die Festlegung der Parameter bzw. Optimierungsvariablen, deren Abhängigkeiten und die Definition des Optimierungskriteriums sind bei praktischen Aufgabenstellungen unhandlich und zu schwer zu definieren.

Voraussetzend sei der interessierte Praktiker darauf hingewiesen, daß es zwar mathematisch i.d.R. ein einziges globales Optimum gibt, dieses jedoch unter praktischen Gesichtspunkten nicht erforderlich bzw. gewünscht ist. Weichen die realen Bedingungen von den im Optimierungsprozeß angesetzten ab, können sich durch das „Ausknutschen“ aller Reserven sogar sehr gefährliche Konstruktionen ergeben.

Die Ergebnisse der im folgenden vorgestellten Verfahren stellen eine Grundlage dar, die dem Ingenieur bzw. Konstrukteur eine Hilfe in der Suche nach einem verbesserten Design sein soll. Es verbleibt immer noch die Bewertung durch weitere Bemessungskriterien und die Beachtung der Möglichkeiten bei der Herstellung (z.B. Drehteile, Gußteile o.ä.) .

Vor nunmehr 10 Jahren veröffentlichte der Autor Prof. Claus Mattheck einen Artikel ‚Engineering Components Grow like Trees‘ und in der Folge weitere Artikel und das Buch ‚DESIGN IN DER NATUR – Der Baum als Lehrmeister‘ (/1/) auf welches sich der folgende Beitrag unter Verwendung des Programms MSC.Nastran for Windows (V.4.5) bezieht.

Wie der Titel schon vermuten läßt, leitet der Autor sehr anschaulich die Herleitung sowohl der Form- sowie der Topologie-Optimierung vom Wachstum bzw. der Wundheilung von Bäumen ab.

Im Fall der Formoptimierung stellt er dar, daß diese *schweigenden Riesen in grüner Freiheit* sich bemühen Spannungskonzentrationen z.B. an der Einleitungsstelle der Beanspruchung eines Astes in den Stamm oder eine Verletzung der Oberschicht (Cambium) durch angepaßtes Wachstum zu verringern. Er stellt hier das von ihm sogenannte *Axiom der konstanten Spannungen* dar. Dieses sagt aus, daß der Baum versucht die Beanspruchungen aller Fasern möglichst konstant und auf einem der Beanspruchung nach möglichst niedrigem Niveau zu halten.

Die Topologie-Optimierung wiederum leitet er davon ab, daß in der Natur die Faulpelze – dies sind für ihn diejenigen Bereiche die sich nur unwesentlich am Lastabtrag beteiligen –

immer schwächer (weicher) werden wohingegen die fleissigen Bereiche an Stärke gewinnen. Analogien zu Knochen- oder Muschelstrukturen o.ä. geben hier Vergleichsmöglichkeiten.

Die nachfolgend beschriebenen iterativen Verfahren wurden in der Oberfläche des Modelers durch Einträge in der Datei *menu.esp* eingeführt. Es war so möglich, die verwendeten Routinen direkt aus der Pre- und Postprozessor-Oberfläche heraus aufzurufen.

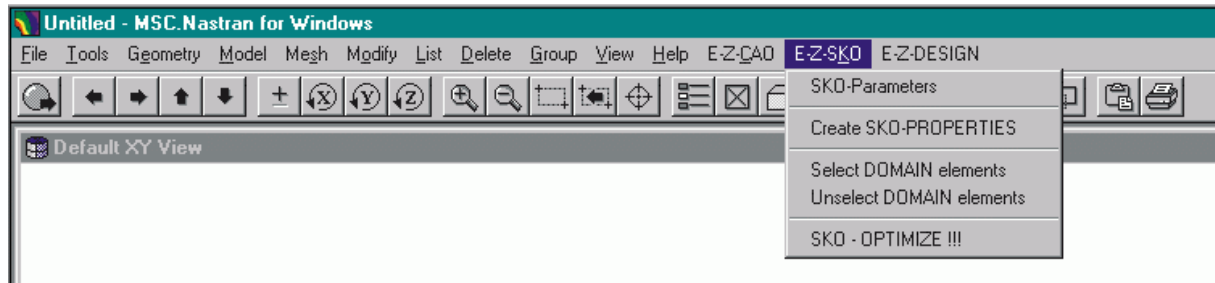


Bild 1: Ergänzung der Oberfläche von MSCN4W durch benutzerdefinierte Menüeinträge

Die dazugehörigen Einträge für das in Bild 1 gezeigte Menü lauten :

```
POPUP "E-Z-S&KO"  
BEGIN  
  MENUITEM "SKO-Parameters",      "D:\Mscn4w45\modeler\API\E_z_opt\SKO_parameter.bas"  
  MENUITEM SEPARATOR  
  MENUITEM "Create SKO-PROPERTIES",  "D:\Mscn4w45\modeler\API\E_z_opt\SKO_create_PROP.bas"  
  MENUITEM SEPARATOR  
  MENUITEM "Select DOMAIN elements",  "D:\Mscn4w45\modeler\API\E_z_opt\SKO_select_domain.bas"  
  MENUITEM "Unselect DOMAIN elements", "D:\Mscn4w45\modeler\API\E_z_opt\SKO_unselect_domain.bas"  
  MENUITEM SEPARATOR  
  MENUITEM "SKO - OPTIMIZE !!!",     "D:\Mscn4w45\modeler\API\E_z_opt\SKO_optimize.bas"  
END
```

Ein weiteres Beispiel hierzu ist im Verzeichnis `..\modeler\API` zu finden.

Die Programmroutinen wurden in der an Visual BASIC angelehnten Programmiersprache geschrieben und benutzen spezielle Zugriffs- und Manipulationsfunktionen die nahezu den gesamten Befehlsumfang des Pre- und Postprozessors umfassen.

Da diese Möglichkeiten erst mit Version 4.0 und insbesondere durch Erweiterungen und Überarbeitungen in Version 4.5 verfügbar geworden sind, konnten viele - aber leider noch nicht alle- Erforder-nisse programmiert werden.

Es ist aber schon jetzt ersichtlich, daß in absehbarer Zeit die noch verbleibenden Programmteile ergänzt werden und das manuelle Durchführen der Berechnungen mit dem NASTRAN Solver in der Pre-Prozessor-Oberfläche ebenfalls automatisiert werden kann. Dann ist ein nahezu automatischer Ablauf der Berechnung der vom Benutzer vorgegebenen Struktur mit den Randbedingungen möglich.

CAO – Computer Aided Optimization (Form-Optimierung)

In /1/ schreibt der Autor : „Der Gestaltoptimierung in der Natur gelingt nun das Unglaubliche und Wunderbare: *Natürliche und adaptiv gewachsene Kerben bewirken keine Kerbspannungen, solange sie bestimmungsgerecht belastet werden!* Sie lenken den Kraftfluß so angepaßt und weich um, daß keinerlei Spannungsüberhöhung auftritt.“

Für eine vollständige Herleitung der Vorgangsweise mit allen Hintergründen möchte der interessierte Leser sich das sehr lebhaft geschriebene Buch /1/ anschauen, hier sei zusammengefaßt folgendes Vorgehen beschrieben :

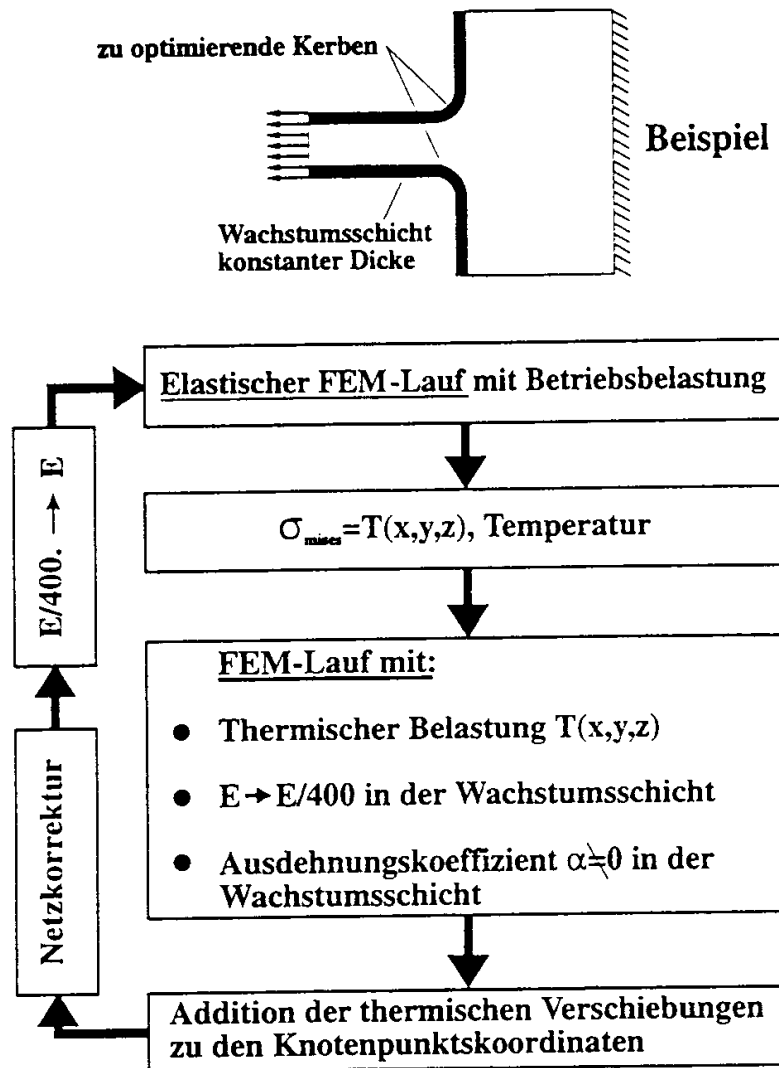


Bild 2 : Schematischer Ablauf der CAO-Formgestaltung nach /1/

Entgegen der Vorgehensweise in /1/ wird die „puddingweiche Oberschicht“ (Cambium) nicht durch Verringerung des E-Moduls unter Beibehaltung der Materialkennwerte im Restbereich realisiert, sondern durch die Festhaltung der betroffenen Verschiebungsfreiheitsgrade (PINNED : $t_x=t_y=t_z \neq 0$) und die Erwärmung des Cambiums durch die Temperatur welche sich i.d.R. durch die von Mises Spannung im Knoten oder der

Elementmitte ergibt. Von dieser wird noch der Grenzwert T_{ref} abgezogen, der berücksichtigt, daß sich nur die übermäßig beanspruchten Teile ausdehnen. Es ergibt sich somit ein Temperaturlastfall von $T = \sigma_{vonMises} - \sigma_{ref}$ in der freien Oberschicht.

Es ist zu beachten, daß die Referenztemperatur des Materials bei diesem Vorgehen zu Null gesetzt wird, da sich sonst die Angabe auf den absoluten thermischen Nullpunkt bezieht.

Der Parameter σ_{ref} kann als gewünschte maximale Spannung im betrachteten Bereich interpretiert werden.

Um den Erfahrungswert ‚400‘ zu berücksichtigen wird ein Faktor zur Überhöhung der aus dem Temperaturlastfall hervorgerufenen Verschiebung eingeführt. Diese Verschiebung (Update) wird wie in /1/ empfohlen als Lastfall mit Zwangsverschiebung aufgebracht, um die Elementgüte insbesondere im Cambium nicht durch zu große Verzerrungen zu verschlechtern.

Das Updaten der Knotenkoordinaten erfolgt durch ein geringfügig verändertes BASIC-Script *update.bas*, welches sich im Installationsumfang der API (Application Interface) von MSCN4W befindet.

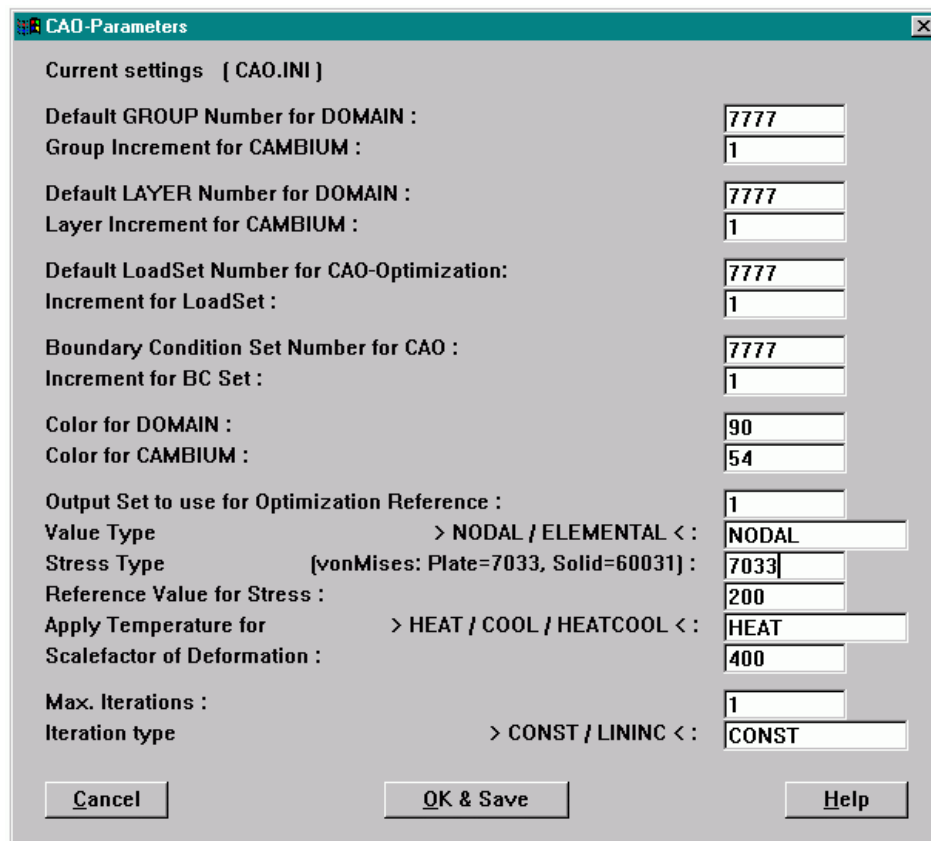


Bild 3 : Dialogbox mit Parametern der CAO-Optmierung

Bevor man die Bearbeitung einer Struktur vornimmt, stellt man mit dem in Bild 3 gezeigten Dialog die benötigten Steuerwerte ein. Diese umfassen Gruppen- und Layernummer, um die Darstellung zu unterstützen. Die für die Optimierung ausgewählten Elemente (Domain) werden anschließend ausgeblendet, sodaß selbst im 3D-Modell ein „Herunterschälen“ in die

Tiefe der zu optimierenden Bereiche möglich ist. Nach der Bestimmung dieses Optimierungsbereiches wählt man die Cambiumschicht aus der vorher bestimmten Domain aus. Nur für diese ausgewählten Elemente wird später eine Temperaturbelastung zum Wachstum bestimmt. Die restlichen Elemente bzw. Knoten der Domain werden im Zuge des Lastfalls *eingeprägte Verschiebungen* freigegeben und können so die Verzerrung des Cambiums im inneren der Struktur mitmachen, ohne das zu große Elementverzerrungen (vgl. Bild 5) entstehen.

Das System vor und nach der Auswahl von Domain und Cambium ist in Bild 4 dargestellt.

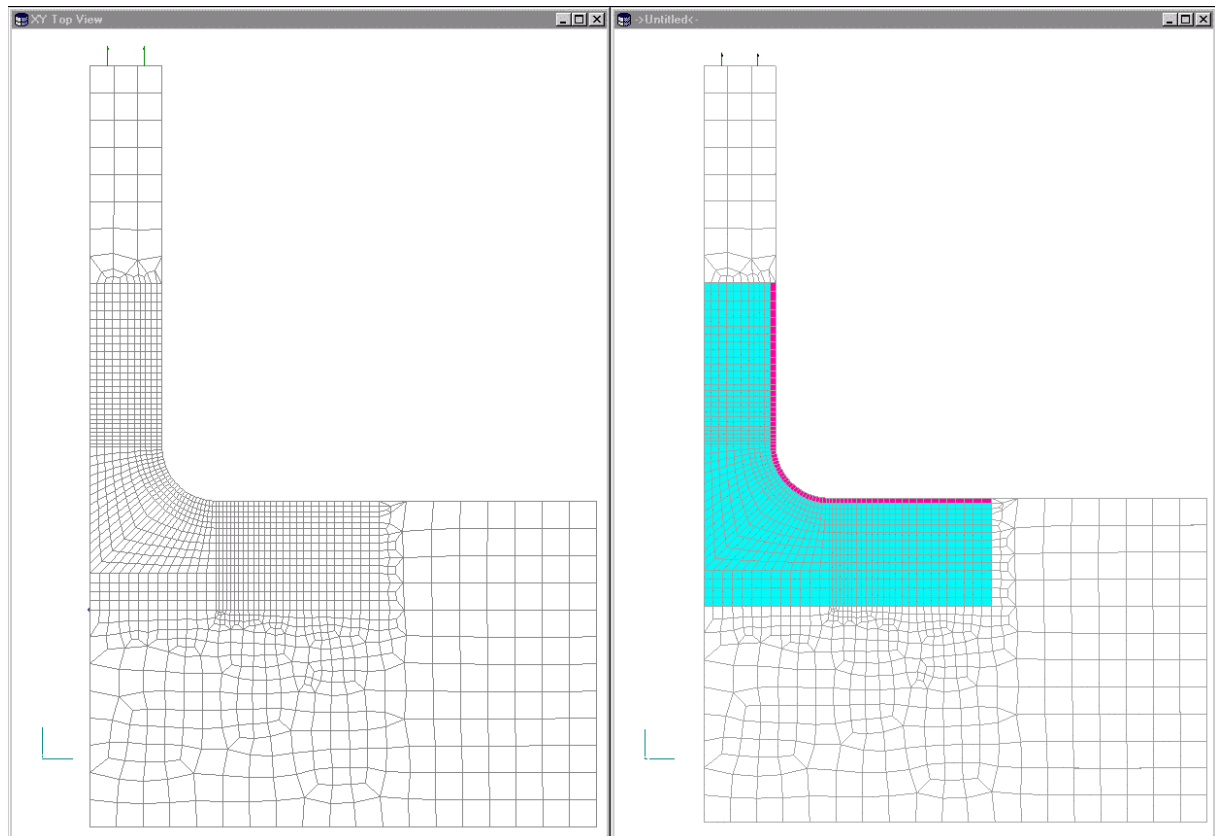


Bild 4 : System vor und nach der Wahl der Optimierungs-Domain und des Cambiums

Zusätzlich werden noch die Lagerungsbedingungen für den Fall der freien Oberfläche und den der eingepprägten Verschiebung definiert.

Anschließend kann der Iterationsprozeß der CAO-Optimierung gestartet werden. Die Schlüsselbefehle in der *API BASIC Scripting Language* lauten :

```
dummy = esp_LoadCreateSet ( loadset, "CAO-TEMPERATURE: " & iter )
```

- für das Erzeugen eines Load Sets für den Temperaturlastfall *loadset*

```
dummy = esp_LoadNodal ( 9, listIDn, 0, 0.0 )
```

```
dummy = esp_LoadNodal ( 9, listIDn1, 0, 0.0 )
```

- im Falle von Knotenlasten für das Belegen der Knoten der inneren Domain und Reststruktur mit der Temperatur 0.0 bzw.

```
dummy = esp_LoadElemental ( 43, listIDe, 0, 0.0 )
```

dummy = esp_LoadElemental (43, listIDe1, 0, 0.0)
 - im Falle von Elementlasten (hier : Elemental Temperature)

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß man in Vorbereitung einer Programmierung sich vorteilhafter Weise mit sogenannten *Linked Lists* beschäftigen sollte, um die Philosophie hinter den meisten esp-Funktionen (API) besser zu verstehen.

ZUGGLASCHE MIT QUERSCHNITTSÄNDERUNG

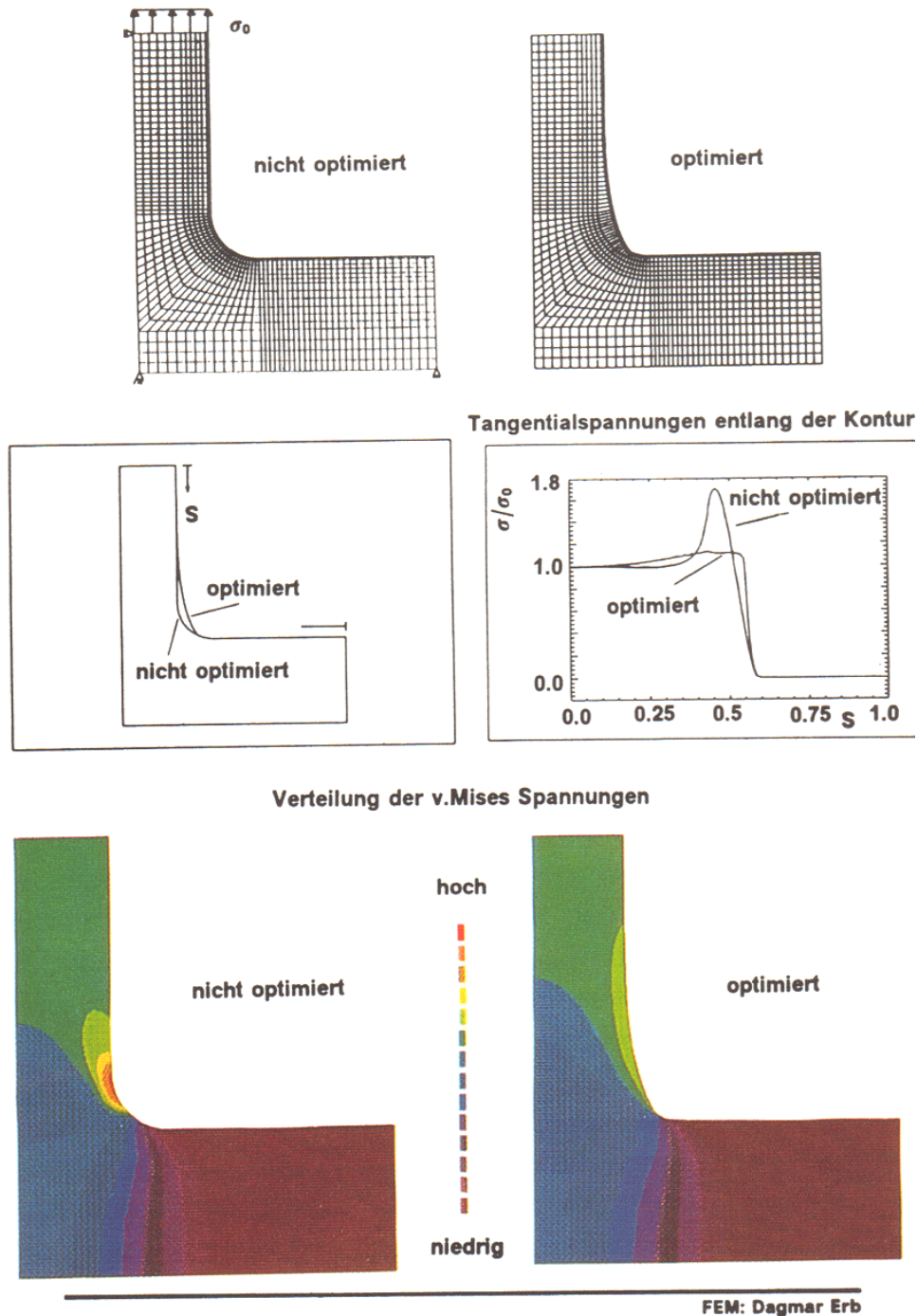


Bild 5 : Beispiel einer Zuglasche aus /1/

Vergleicht man nun das in Bild 5 dargestellte Ausgangssystem mit dem in Bild 6 dargestellten aus MSCN4W so kann man die gleiche Ausgangsverteilung erkennen.

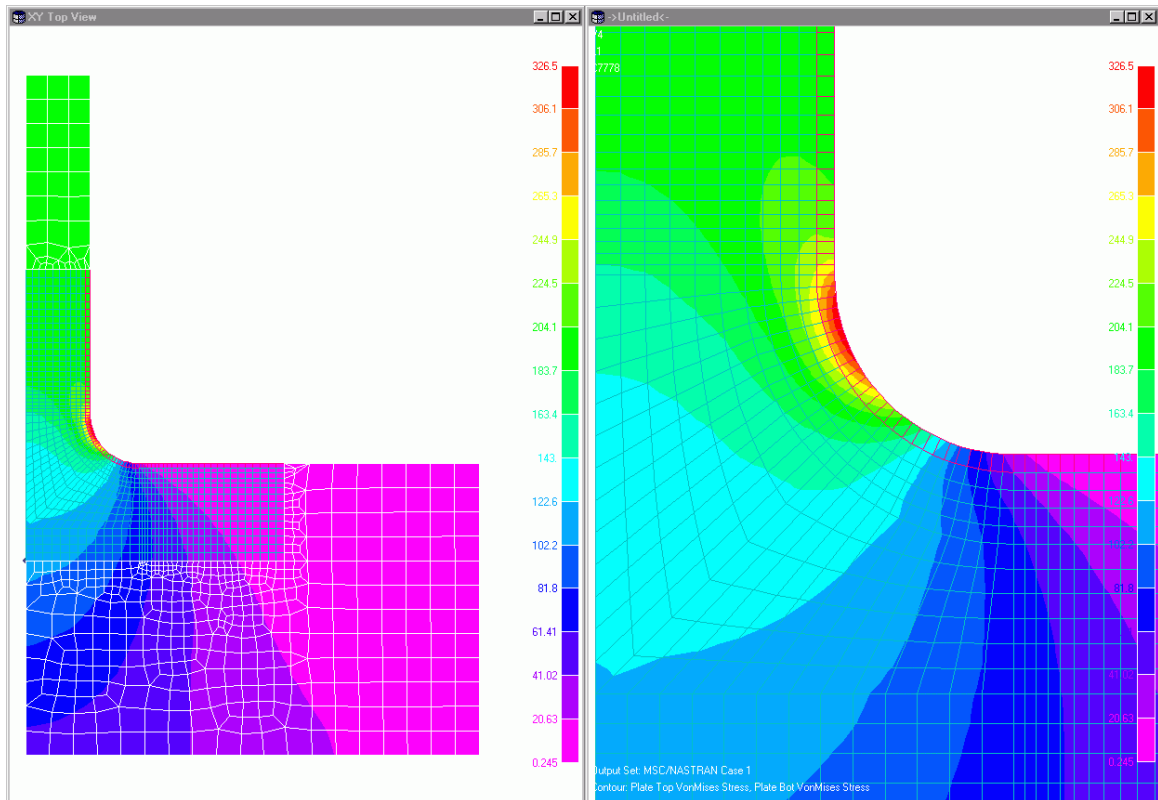


Bild 6 : Ausgangssystem aus MSCN4W (max. $\sigma_{\text{vonMises}} = 326,5 \text{ N/mm}^2$)

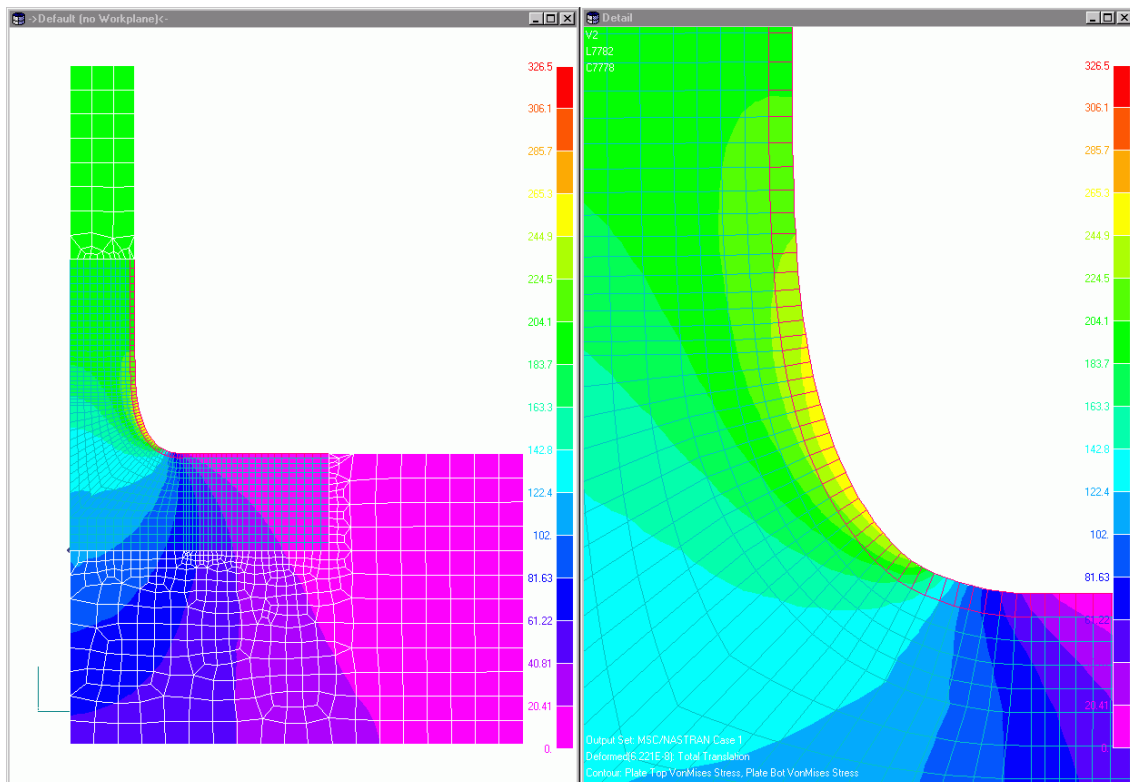


Bild 7 : Spannungsverteilung nach der 3. Iteration (max. $\sigma_{\text{vonMises}} = 261,3 \text{ N/mm}^2$)
 Bereits nach der 3. Iteration erhält man eine Spannungsreduktion von 20% gegenüber dem Ausgangssystem mit der halbkreisförmigen Ausrundung der Kerbe. Die Ähnlichkeit der erzielten verbesserten Form der Kerbe mit dem in /1/ erzielten Ergebnis ist augenfällig.

Die Spannungen ergeben sich wie folgt :

	VonMises Spannung	% vom Ausgangsz.	% zur vorh. Iteration
Ausgangszustand	326.5 N/mm ²	100.0	./.
1. Iteration	281.7 N/mm ²	86.3	13.7
2. Iteration	270.2 N/mm ²	82.8	4.1
3. Iteration	261.3 N/mm ²	80.0	3.3

Es fällt deutlich auf, daß der Algorithmus offensichtlich gut konvergiert. Es zeigt sich, daß eigentlich immer eine Verbesserung der maximalen Spannung am Strukturrand erzielt wird.

Selbst im Fall einer 90° Kerbe wurde das Ergebnis deutlich verbessert, aber es ergaben sich seltsam deformierte und damit unerwünschte Elemente im Bereich der Ecke. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, daß der Eckknoten nicht „weiß“ wohin er sich bewegen soll, da er von den umgebenden Elementen in alle Richtungen behindert wird.

Dies alles funktioniert selbstverständlich genauso für räumliche Systeme mit Solid-Elementen. Bild 8 zeigt dasselbe Beispiel an einem ¼ -System unter äquivalenter Beanspruchung.

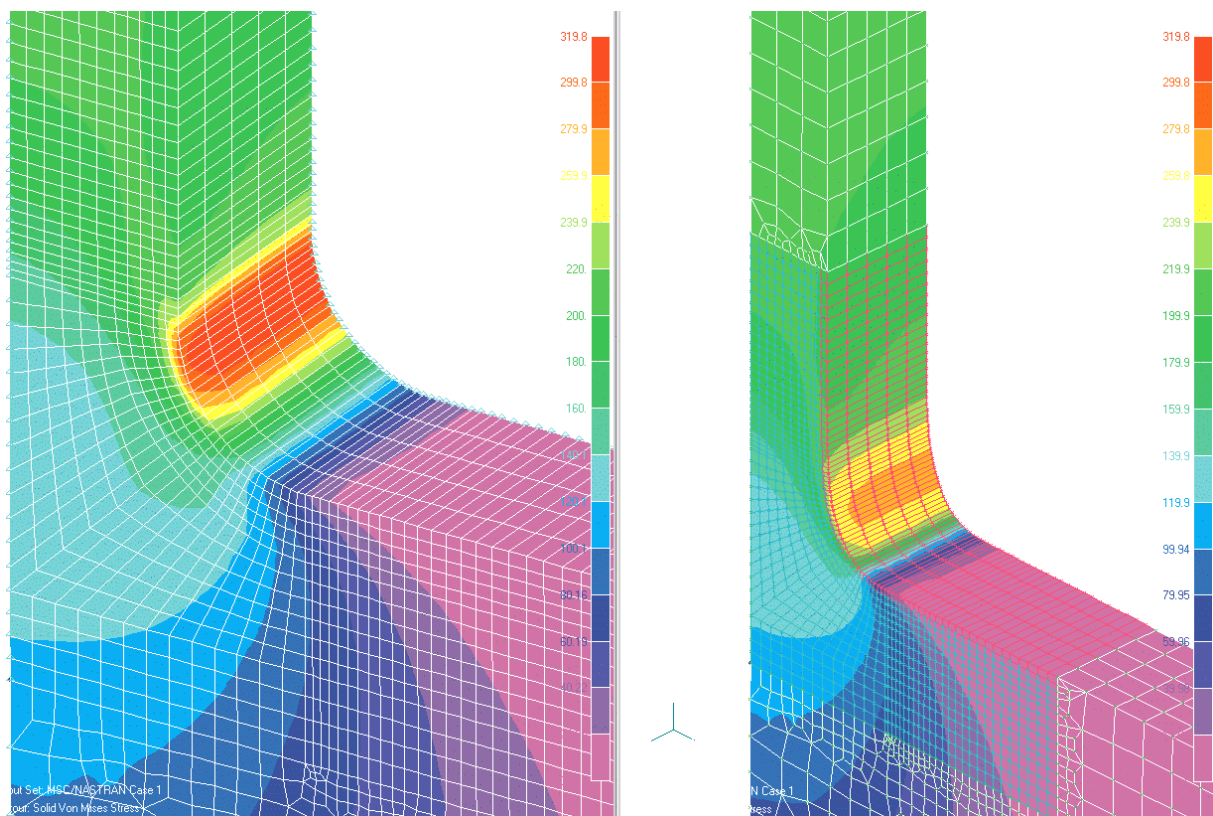


Bild 8 : Räumliches System im Ausgangszustand und nach 2 Iterationen

Im Fall der räumlichen Struktur nimmt die Spannung nach 2 Iterationen ebenfalls bereits um 16.8 % von 319.8 N/mm² auf nur noch 266.0 N/mm² ab.

Bezüglich der programmtechnischen Umsetzung sei noch auf einige wichtige Funktionen hingewiesen :

`dummy = esp_OutpConvElemToNodal (setID, vectorID, ID, calc_mode, value)`
- wird für die Erzeugung eines Ergebnisvektors mit Knotenspannungen benötigt. Diese werden aus den Elementspannungen berechnet und können, wie sonst in MSCN4W auch, gemittelt und nach min./max. bestimmt werden

`dummy = esp_OutpGetData (setID, vectorID, ID, value)`
- ermittelt die Spannung des Knotens/Elements ID im Ergebnisvektor vectorID

Wichtig ist auch noch zu beachten, daß im Falle eingepprägter Verformungen in Richtung der vorgegebenen Komponenten Festhaltungen erzeugt werden müssen. Dies bedeutet, daß ein Knoten welcher z.B. eine Verschiebung in x-Richtung erfährt eine Halterung bzgl. tx erhalten muß.

Die Veränderung des Berechnungsalgorithmus dahingehend, daß nur die freien Knoten der Cambium-Oberschicht Verschiebungsfreiheitsgrade im Temperaturlastfall besitzen begünstigt darüberhinaus die Rechenzeiten, da sich z.T. wesentlich weniger DOF ergeben.

Auch das Freigeben nur der inneren Domain-Knoten und des Cambiums für den Fall der eingepprägten Verschiebungen verbessert die Rechenleistung. Es wird ebenfalls sichergestellt, daß nur im Bereich der Domain Änderungen an der Struktur bzw. deren Knotenkoordinaten vorgenommen werden. Dies ermöglicht in der Realität die Auswähl nahezu jeden beliebigen Ausschnitts aus einer zu untersuchenden Gesamtstruktur.

Hat man Interesse an den Kerbspannungen eines Anschlusses einer Komponente, bestimmt man nur diesen und seine direkte Umgebung als Domain. Anschließend wählt man den zu verbessernden Oberflächenbereich aus und optimiert diese. Dies kann nach und nach an allen Stellen von Interesse erfolgen. Man kann vom Algorithmus her auch mehrere verschiedene Stellen gleichzeitig optimieren. Beschränkungen bestehen derzeit nur bei der Definition des zu verwendenden Output-Sets. An eine Erweiterung unter Berücksichtigung von Lastkollektiven bzw. Alternativlaststellungen ist bereits gedacht worden.

Das Prinzip der Topologie-Optimierung nach /1/ beruht auf der Annahme, daß bei einem Auswahlprozeß zwischen „fleissigen“ und „faulen“ Teilen einer Struktur der beim Lastabtrag fleissige immer stärker (steifer) wird und die „Faulpelze“ immer weicher werden und sich der Beanspruchung entziehen. Er leitet hieraus die Bedingung $E = f(\sigma)$ ab, welche er dann für die Durchführung der Methode noch verschieden definiert.

Der schematische Ablauf der Berechnung ist in Bild 9 dargestellt.

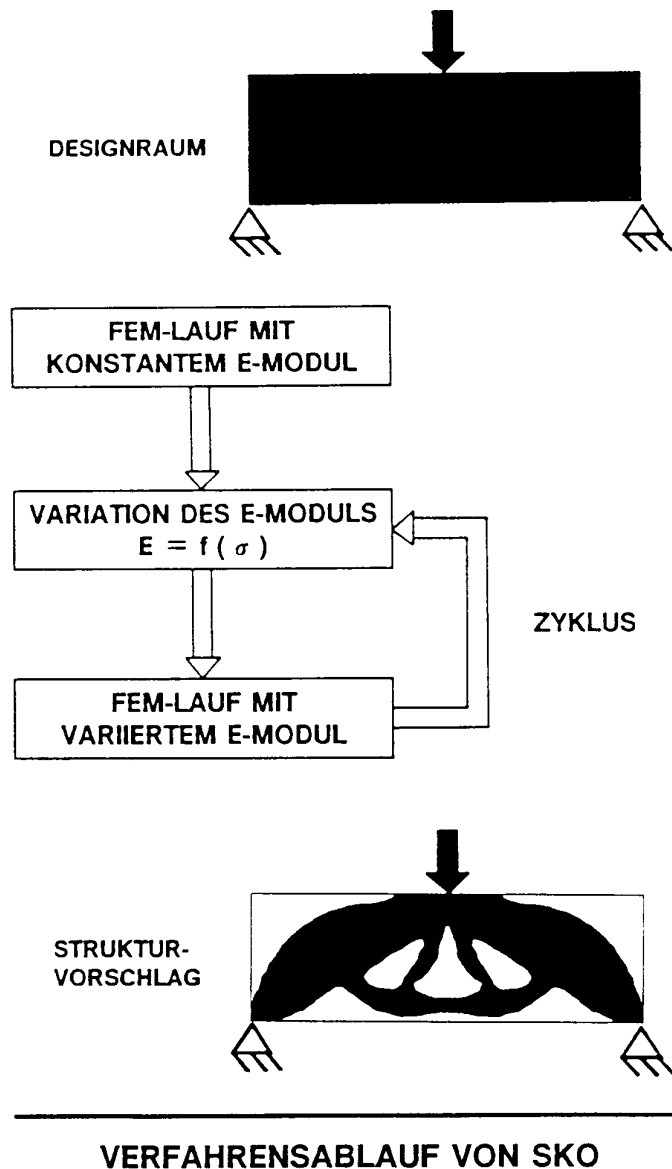


Bild 9 : Ablaufschema der Topologie-Optimierung nach /1/

Frage im Detail ist nun, mit welchem Konzept man den E-Modul variiert ?

Im praktischen Fall wurde die Umsetzung derart geändert, daß der „steifste“ E-Modul dem Ausgangsmaterial entspricht und sich nur „weichere“ Bereiche einstellen. Ab Unterschreiten eines bestimmten unteren Schwellenwertes werden dann diese Elemente gelöscht.

In Bild 10 sind drei unterschiedliche Kriterien für die Beurteilung der einzelnen Elemente und deren Spannungen untersucht worden. Man erkennt deutlich, daß die Wahl des „Verbesserungskriteriums“ wesentliche Auswirkung auf das erzielte Ergebnis hat.

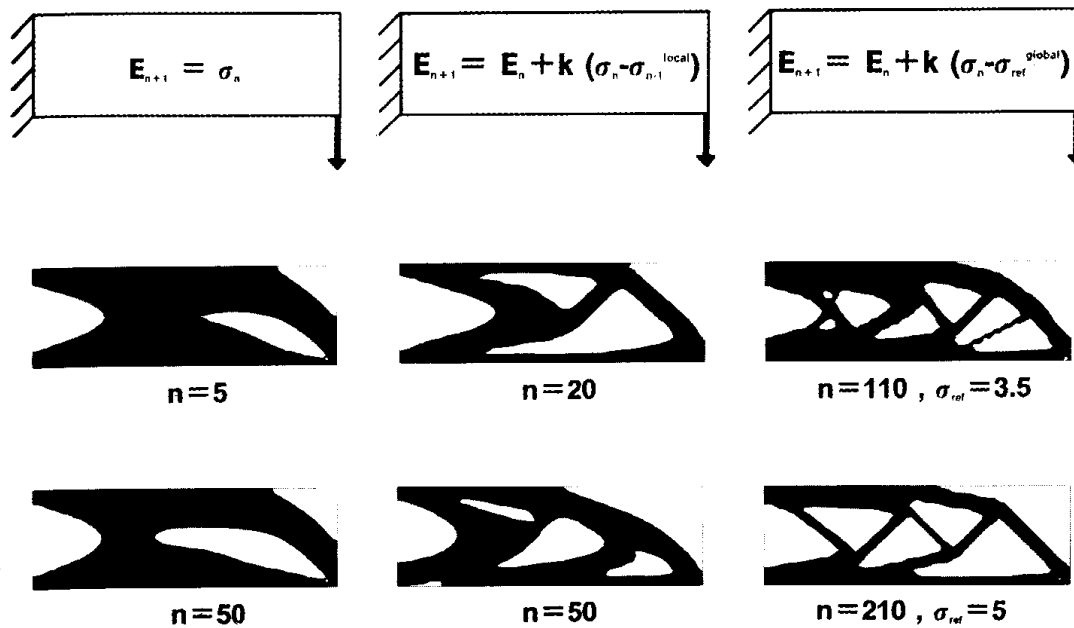


Bild 10 : Unterschiedliche Spannungskriterien und deren Ergebnisse nach /1/

Alle dargestellten Strukturen stellen aber ein gewisses Optimum bzgl. der Vorgaben dar. Ergebnisse mit dem in MSCN4W programmierten Algorithmus liegen vor, sind jedoch noch nicht so umfangreich wie die in der Literatur dargestellten Systeme.

Es erfordert ein wenig Erfahrung die Parameter, die zur Steuerung des Iterationsablaufes dienen, im voraus bereits hinreichend gut abzuschätzen. Häufig ist ein „Feintuning“ mit mehreren Rechenläufen erforderlich oder ein Eingreifen während des Ablaufes.

So kommt es vor, daß sich die Elemente manchmal nahezu einvernehmlich die Arbeit teilen, obwohl sie unterschiedliche Steifigkeiten haben. Es kann dann geschehen, wenn man eine relativ geringe Anzahl von Properties bzw. Materialien vorgibt, daß lange Zeit sich nur unmerklich Spannungsänderungen zwischen den Berechnungen ergeben. Damit ändert sich auch nur geringfügig oder evtl. garnicht die „Arbeitsteilung“. In diesen Fällen kann man allerdings eine „Strafrunde“ einführen, die darin besteht, daß man die untere Schwelle für das Löschen der Elemente kurzzeitig anhebt und dadurch ein weiteres Löschen von Elementen und eine Umverteilung auf die „stärkeren“ provozieren kann.

Die von /1/ beschriebene Formel $E = f(\text{Sigma})$ würde in ihrer wörtlichen Form ja bedeuten, nahezu unendlich viele und sich ständig ändernde Properties bzw. Materialien zu erzeugen, was programmtechnisch äußerst unhandlich ist. Man richtet also eine endliche Anzahl von Materialien ein (ca. 5 –25) mit denen man die Verteilung zwischen „faul“ und „fleissig“ berücksichtigt. Zum besserem Iterationsfortschritt muß man halt noch eine „Empfindlichkeitskontrolle“ einbauen die auch kleinere Änderungen entsprechend berücksichtigt.

Bei der Beispielrechnung desselben Falls wie in Bild 10 (Kragarm mit unterseitigen Einzellast) wird in Bild 11 das Ergebnis mit einem groben Netz in MSCN4W gezeigt. Die Berechnung wurde mit 7 Materialien und einer (gewünschten) Referenzspannung von 200 N/mm² bei einer unterern Schwelle von 25 N/mm² gestartet.

Da der Fortschritt nach ca. 20 Iterationen sehr verlangsamte, wurde $\sigma_{ref} = 240 \text{ N/mm}^2$ und die Schwelle auf 30 N/mm² eingestellt. Schnell wurden weitere Elemente gelöscht und das „Ausdünnen“ hatte weitere Fortschritte. Dasselbe wurde bei ca. 40 Iterationen nochmals mit 280 N/mm² bzw. 35 N/mm² durchgeführt. Darüberhinaus wurde zweimal kurzzeitig die Schwelle auf 56 N/mm² angehoben, um ein Löschen weiterer Elemente zu provozieren.

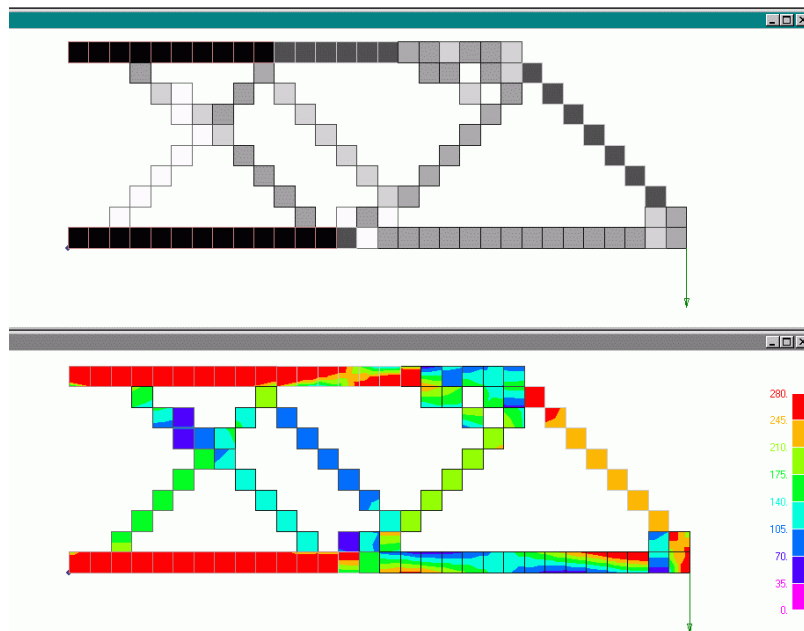


Bild 11 : Material- und Spannungsverteilung nach ca. 50 Iterationen, $\sigma_{ref} = 280 \text{ N/mm}^2$

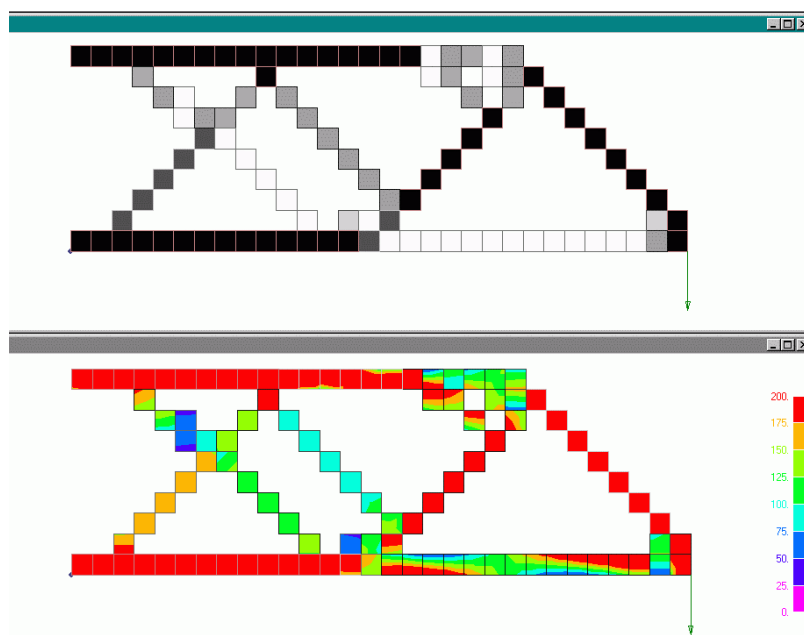


Bild 12 : wie Bild 11, jedoch Spannungen bzgl. Ausgangsgröße $\sigma_{ref} = 200 \text{ N/mm}^2$

Ergänzend seien noch einige Ergebnisse in der Topologie-Optimierung anderer Autoren kurz aufgezeigt um das Spektrum der Anwendungen und auch deren Schwierigkeiten aufzuzeigen. Bei der Durchführung der Berechnung sind viele Einflüsse auf das Ergebnis zu berücksichtigen und evtl. durch Variation in ihren Auswirkungen abzuschätzen.

In /5/ weist der Autor darauf hin, daß die mit Hilfe der Topologie-Optimierung gewonnen Ergebnisse immer noch der Interpretation bzw. Bewertung durch den Anwender bedürfen.

Im Laufe der Iterationen können z.B. kinematische Elemente bzw. Strukturteile entstehen. Diese können aber numerisch oder durch manuelles Eingreifen des Anwenders behoben werden.

Es kann ebenfalls vorkommen, daß Elemente bzw. deren strukturelle Verbindungen gelöscht werden, obwohl sie bei fortgeschrittenen Iterationen evtl. wieder benötigt würden. Ein Reaktivieren ist jedoch äußerst schwierig und so muß auch hier der Anwender manuell diese Elemente „einfrieren“ und Sie zu einem späteren Zeitpunkt der Iterationen wieder lösen.

Viele Eingangsgrößen beeinflussen das Ergebnis, so daß es dem Anwender überlassen bleibt diese zu variieren und ihren Einfluß abzuschätzen.

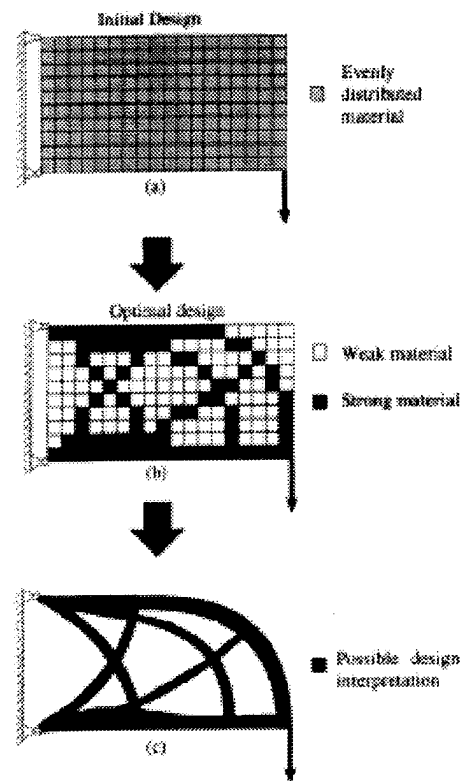


Bild 13 : mögliche Interpretation der Ergebnisse nach /5/

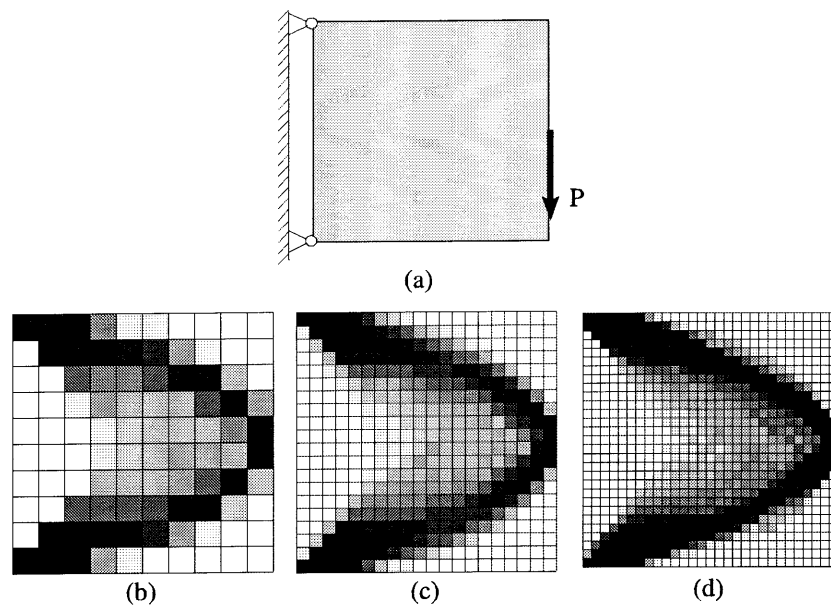


Bild 14 : Unterschiede der Feinheit der Elementierung auf das Ergebnis aus /5/

Auch das verwendete Material kann wesentliche Einflüsse auf das Ergebnis der Optimierung haben. In Bild 15 ist exemplarisch der Design-Vorschlag für elastisches und elastoplastisches Material gezeigt. Man kann deutlich den Unterschied in der Struktur erkennen und sich auch anschaulich vorstellen, daß bei Erreichen gewisser Spannungen in den „dicken“ Druckstreben sich eine Überlagerung von Zug- und Druckstäben ergibt, welche sich gegenseitig aussteifen und die Last „ökonomischer“ ableiten.

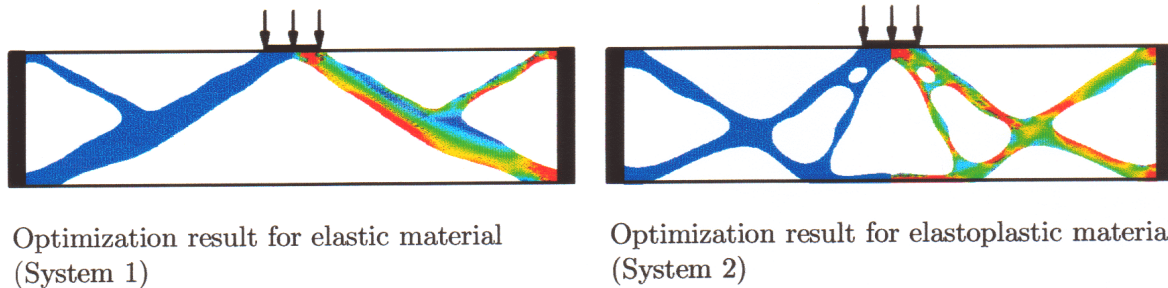


Bild 15 : Untersuchungen in /6/ zu elastischen und elastoplastischen Materialien

Kann man sich im 2D die Systeme häufig noch anschaulich vorstellen, so wird es im 3D immer komplexer. Bild 16 zeigt den Fall eines Würfels mit Lagerung der unteren Ecken und vier Einzellasten an der Würfeloberseite.

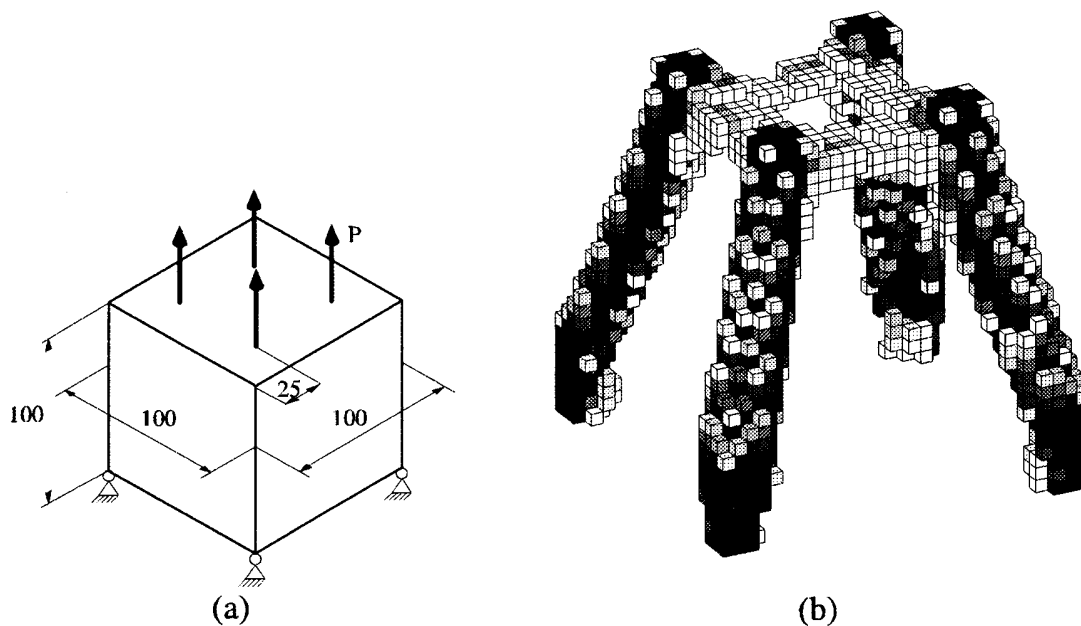


Bild 16 : Dreidimensionale Topologie-Optimierung aus /5/

Rückführung zur Geometrie und Ausblick auf Entwicklungen

Einer der wesentlichen Punkte von Interesse sind die im Optimierungsprozeß gewonnen geometrischen Ergebnisse

Bei der CAO erhält man i.d.R. recht glatte Oberflächen, die nur evtl. an den Übergängen zu nicht im Cambium berücksichtigten Bereichen Unstetigkeiten aufweisen. Im 2D ist eine Rückführung der Knotenkoordinaten möglich auf deren Grundlage man entweder geometrische Näherungsfunktionen in Form von Parabeln o.ä. oder durch Bildung von Splinekurven einfügen kann. Im 3D funktioniert dies i.d.R. ebenfalls recht gut. Ist man aber für die Konstruktion an eindeutigeren und anschaulicher definierten Geometrien interessiert, wird eine evtl. Interpolation auf bestimmte Schnittebenen erforderlich. Die so gewonnen Stützstellen können z.B. dann in MSCN4W durch die Verwendung von Lofts (Sweeps, Coons-Surfaces o.ä.) wieder zu Flächen oder Körpern zusammengefügt werden.

Viel schwieriger ist es dagegen, aus den Ergebnissen der SKO oder anderen Topologie-Optimierungen eindeutige Geometrien herzuleiten. Dies liegt zum einen an den „ausgefransten“ Strukturen und zum anderen an der bereits beschriebenen erforderlichen Bewertung durch den Anwender. Eine der Möglichkeiten zur Ermittlung angenäherter Oberflächen beruht auf dem Glätten durch Abschneiden von Elementecken, welche nur mit einem bzw. evtl. zwei Elementen verbunden sind. Man erhält so in einer Struktur von Hex-Elementen z.B. Pyramiden- oder Wedge-Elemente und eine facettierte Oberfläche. Dies ist ebenfalls das Ergebnis unter Verwendung von Tetraeder-Elementen, die jedoch nicht unbedingt gewünscht sind. Beste Ergebnisse erzielt man in praktischen Anwendungen offenbar durch das Füllen des „Bauraumes“ mit möglichst würfelförmigen Hexaedern. Anschließend werden die Koordinaten der an der Oberfläche befindlichen Knoten gemittelt und so derart „verschmiert“ das eine möglichst stetige Oberfläche entsteht.

Potentiellen Anwendern der Methode sei ein Studium der Beschreibungen bereits erhältlich kommerzieller Programme und frei verfügbarer Literatur (im Internet z.B. /3/, /4/, /6/) empfohlen, da hier bereits „Knöpfe“ und „Schalter“ eingefügt sind die aufzeigen woran man „drehen“ muß um das Ergebnis besser zu steuern bzw. zu beeinflussen.

Mit diesem Thema beschäftigt sich mittlerweile eine ganze Reihe von Wissenschaftlern unter dem Oberbegriff ‚Topological Sensitivity‘ mit dem man ausdrücken will, daß die Struktur verschieden „empfindlich“ auf Variationen reagiert. Wie man sich leicht vorstellen kann, kann man analog zu iterativen Gleichungslösern sein Ergebnis bzw. den Optimierungsprozeß durch Präkonditionierung bzw. durch Evaluierung nicht nur des aktuellen Spannungszustandes im einzelnen Element sondern auch die Berücksichtigung vorheriger Rechenläufe bzw. die umgebenden Elemente oder von Spannungsgradienten verbessern.

Dem interessierten Leser bzw. möglichen Anwender wünsche ich viel Erfolg bei der Benutzung dieser Methode und kann nur wünschen ein wenig Anregung gegeben zu haben. Hinweise bzw. Verbesserungsvorschläge nehme ich gerne unter marc.quint@xperteez.de entgegen bzw. würde mich freuen, wenn Sie die unter <http://www.xperteez.de> veröffentlichten Beispiele noch ergänzen würden.

Schließen möchte ich diesen Beitrag mit einem Werbespruch der Fa. Xerox, welcher aber hier sehr gut zum Thema paßt :

Keep the Conversation going - Share the Knowledge.

Literatur

- / 1 / Mattheck, Claus : *DESIGN IN DER NATUR – Der Baum als Lehrmeister*, 3. überarb. und erw. Neuauflage – Freiburg im Breisgau : Rombach GmbH Druck und Verlagshaus, 1997
- / 2 / Ramm, E., Maute, K. : *Tragwerksoptimierung als Entwurfshilfe – Erste Ansätze*, Finite Elemente in der Baupraxis : Beiträge der Tagung FEM'98 an der TU Darmstadt, S. 35-48
- / 3 / C ea, J., Garreau, S., Guillaume, P. , Masmoudi, M. : *The shape and topological optimizations connection*, Bericht 98-22 des MIP – Math ematiques pour l'Industrie et la Physique UMR 5640, CNRS-Universit  Paul Sabatier-INSA, Toulouse, Frankreich , <http://mip.ups-tlse.fr/publi/rapp98/98.22.html>
- / 4 / Garreau, S., Masmoudi, M., Guillaume, P. : *The topological sensitivity for linear isotropic elasticity*, Tagungsband (auf CD) der ECCM'99 (European Conference on Computational Mechanics), 31. August – 3. September 1999, München auch unter <http://mip.ups-tlse.fr/publi/rapp99/99.45.html>
- / 5 / Olhoff, N., Eschenauer, H. : *On Optimum Topology Design in Mechanics*, Tagungsband (auf CD) der ECCM'99 (European Conference on Computational Mechanics), 31. August – 3. September 1999, München
- / 6 / Schwarz, St., Kemmler, R., Ramm, E. : *Shape and topology optimization with nonlinear structural response*, Tagungsband (auf CD) der ECCM'99 (European Conference on Computational Mechanics), 31. August – 3. September 1999, München (weitere Inf. unter http://www.uni-stuttgart.de/ibs/research_6.html)