

Gewichtsoptimierung eines Schiffes unter Spannungsrestriktionen

Jörg Riedel

Einleitung

Die Suche nach einem optimalen Design einer Tragstruktur wird in der Regel durch mehrere konkurrierende Bewertungskriterien bestimmt. In der vorliegenden Arbeit wird die Optimierung eines Schiffes vorgestellt. Durch die Variation von Blechstärken soll Stahl eingespart werden, dabei dürfen Spannungen infolge zweier Lastfälle die zulässigen Spannungen nicht überschreiten. Mit einer Länge von fast 300 Metern und einem sehr feinstrukturierten Tragsystem sind die statischen Berechnungen des gegebenen Schiffes verhältnismäßig aufwendig. Allein die Optimierung von 30000 einzelnen Wandstärken stellt herkömmliche Optimierungsstrategien vor eine schwierige bzw. unlösbare Aufgabe. Entscheidend für den Erfolg der Optimierung ist daher die Wahl einer geeigneten Strategie. Für diese spezielle Aufgabe wurden deshalb eine selbstregelnde Evolutionsstrategie und eine Methode zur automatischen Gruppierung der Variablen entwickelt. Die Optimierung sowie Parallelisierung wurden durch das Programm `SLang` gesteuert, für die statischen Berechnungen wurde das Programm ANSYS aufgerufen. Um einen automatischen Programmablauf zu gewährleisten, mußte eine bidirektionale Schnittstelle zwischen den Programmen eingerichtet werden.

Modell

Gegeben ist ein ANSYS-FE-Modell des Schiffes, in dem Form, Material, Tragstruktur, die beiden Lastfälle und das Startdesign festgelegt sind. Im Inneren des Schiffes befinden sich in unregelmäßigen Abständen eine Vielzahl von Profilen und Blechen aus Stahl. Bis auf wenige Ausnahmen beträgt das lichte Maß zwischen den vertikalen Tragelementen weniger als 8 Meter, so daß im Vergleich zur Gesamtgröße des Schiffes von einem feinstrukturierten zellenförmigen Tragsystem gesprochen werden kann. Die beiden Lastfälle werden durch Vorschriften in Abhängigkeit der Schiffsklasse und der Schiffslänge festgelegt. Der Lastbeschreibung liegt die Annahme zugrunde, daß ein Seegang mit einer Wellenlänge von etwas weniger als der Schiffslänge für das Schiff die ungünstigsten Biegebeanspruchungen verursacht. Der Lastfall 1 (vgl. Abb. 1) beschreibt die Situation, wenn das Schiff vorne und hinten von einer Welle getragen wird, so daß es in der Mitte durchhängt, vergleichbar einem Träger auf zwei Stützen. Lastfall 2 entspricht dann der Situation, wenn gerade in der Mitte des Schiffes der größte Auftrieb wirkt, und Bug bzw. Heck wie Kragarme herunterhängen (vgl. Abb. 2).

Aus numerischen Gründen muß das Modell statisch bestimmt gelagert werden. Damit aus Lasten und Massen keine künstlichen Punktlasten an den imaginären Lagern entstehen, wird das Beschleunigungsfeld, daß auf die im Schiff verteilten Massen wirkt, so manipuliert, daß sich die Massenkräfte und die Lasten gegenseitig aufheben und das Schiff "schwebt" (sh. (ANSYS, 1998) 15.2 Inertial Relief). Die Manipulationen der Winkel- und

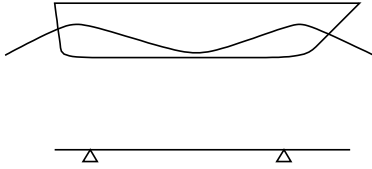


Abbildung 1. Lastfall Sagging

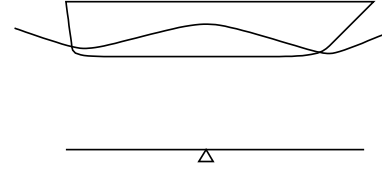


Abbildung 2. Lastfall Hogging

Wegbeschleunigungen betragen dabei ca. 1%, so daß die daraus resultierenden Ungenauigkeiten vernachlässigt werden können.

Die Zielfunktion der Optimierung

Der Designvektor der Optimierungsaufgabe besteht aus 30000 unabhängigen Wandstärken t_i von flächigen Stahlelementen mit jeweils einer Fläche A_i . Das Ziel ist die Minimierung des Stahlvolumens in Abhängigkeit von \mathbf{t} .

$$\min(Z(\mathbf{t})) = \min\left(\sum_i t_i A_i\right) \quad i = 1, 2, \dots, 30000 \quad t_i \in [t_{min}, t_{max}] \quad A_i \in R \quad (1)$$

Die Zielfunktion Z ist eine Linearkombination der Variablen \mathbf{t} und beschreibt daher eine 30000-dimensionale Hyperebene. Die absoluten Extrema erhält man trivialerweise für $t_i = t_{min}$ bzw. $t_i = t_{max}$.

$$\begin{aligned} \sum_i t_i A_i &= t_{min} \\ \sum_i t_i A_i &= t_{max} \end{aligned} \quad (2)$$

Aufwendig wird die Optimierung erst durch die Einführung der Spannungsrestriktionen, weil die Spannungen in Abhängigkeit von \mathbf{t} und infolge der zwei Lastfälle durch eine FE-Berechnung ermittelt werden. Für jedes Element i müssen folgende sechs Nebenbedingungen eingehalten werden:

$$\begin{aligned} g_{1,i}(\mathbf{t}) &= |\sigma_{x,i,1}| < \sigma_{zul} \\ g_{2,i}(\mathbf{t}) &= |\sigma_{y,i,1}| < \sigma_{zul} \\ g_{3,i}(\mathbf{t}) &= |\tau_{xy,i,1}| < \tau_{zul} \\ g_{4,i}(\mathbf{t}) &= |\sigma_{x,i,2}| < \sigma_{zul} \\ g_{5,i}(\mathbf{t}) &= |\sigma_{y,i,2}| < \sigma_{zul} \\ g_{6,i}(\mathbf{t}) &= |\tau_{xy,i,2}| < \tau_{zul} \end{aligned} \quad (3)$$

wobei σ_x , σ_y und τ_{xy} die Membranspannungen im Schwerpunkt des Elementes i sind. Außerdem verhalten sich die Nebenbedingungen bezüglich der Variablen \mathbf{t} nichtlinear. So kann eine Veränderung der Wandstärke eines Elementes i durch Spannungsumlagerung zu Verletzungen von Nebenbedingungen in anderen Elementen führen. Die ebene Zielfunktion wird durch diese Nebenbedingung nichtlinear begrenzt.

Automatische Gruppierung der Variablen

In Anbetracht der Größe des Modells, der damit verbundenen Rechenzeit von ca. 2 Std. und den gegebenen Terminfristen war von vornherein klar, daß die Anzahl der Berechnungen auf eine Größenordnung von 1000 beschränkt sein wird. Demgegenüber stehen 30000 variable Wandstärken, die einzeln optimiert werden sollen. Zudem benötigen alle Optimierungsstrategien, die für das Projekt in Frage kommen, Informationen über die Veränderung des Zielfunktionswertes bei Variation bestimmter Variablen. Deshalb ist es unumgänglich, die Variablen zu gruppieren und die Variation auf alle Variablen einer Gruppe gleichzeitig zu beziehen. Sinnvoll ist es, die Gruppen nach der Sensitivität der Variablen einzuteilen.

Unter Sensitivität einer Variablen t_i ist das Potential zu verstehen, das bei differentieller Veränderung der Wandstärke t_i zu Verletzungen der Nebenbedingungen in **allen Elementen** führt. Durch diese Aussage könnte man die Variablen herausfinden, die robust gegenüber den Nebenbedingungen sind und entsprechende Modifikationen am Designvektor vornehmen. Notwendig wäre dazu für jede Variable t_i eine vollständige statische Berechnung - also 30000 Berechnungen, was zeitlich nicht realisierbar ist. Deshalb wurde die Definition der Sensitivität im Zusammenhang mit dieser Arbeit soweit reduziert, daß dazu keine zusätzlichen FE-Berechnungen notwendig sind.

Unter Sensitivität einer Variablen t_i - im neuen Sinne - ist das Potential zu verstehen, das bei differentieller Veränderung der Wandstärke t_i zu Verletzungen der Nebenbedingung im **Element** i führt. Da der Kraftfluß im Tragwerk durch differentielle Veränderung der Wandstärke t_i kaum verändert wird, wird außerdem der Kräftezustand im Element i zur Ermittlung der Sensitivität als konstant angenommen. Die Sensitivität ζ wird daraus wie folgt definiert.

$$\zeta(i) = \left| \frac{d}{dt} t \max \left\{ \frac{\max(|\sigma_i|)}{\sigma_{zul}}, \frac{\max(|\tau_i|)}{\tau_{zul}} \right\} \right| \quad (4a)$$

Da die Membranspannungen indirekt proportional zu t sind, kann Gl. (4a) zu

$$\zeta(i) = \frac{\max \left\{ \frac{\max(|\sigma_i|)}{\sigma_{zul}}, \frac{\max(|\tau_i|)}{\tau_{zul}} \right\}}{t} \quad (4b)$$

vereinfacht werden. Die Zuordnung in 40 Gruppen erfolgt mit abnehmender Sensitivität, wobei die Gruppenstärke G für die Gruppe j mehr oder weniger willkürlich durch

$$G(j) = \text{int} \left(\left(\frac{75 + 3j}{39} \right)^{4,93574} + 20 \right) \quad j = 1, 2, \dots, 40 \quad (5a)$$

festgelegt wird, wobei der Operator $\text{int}(x)$ die Nachkommastellen von x abschneidet, so daß

$$\sum_{j=1}^{40} G(j) = 30000 \quad (5b)$$

ergibt.

Selbstregelnde Evolutionsstrategie

Gegenüber vielen anderen Optimierungsstrategien haben Evolutionsstrategien (ES) für diese spezielle Aufgabe entscheidende Vorteile. Das Grundschema dieser Strategie wird durch die drei Mechanismen Selektion, Mutation und Reproduktion gesteuert. Der Inhalt

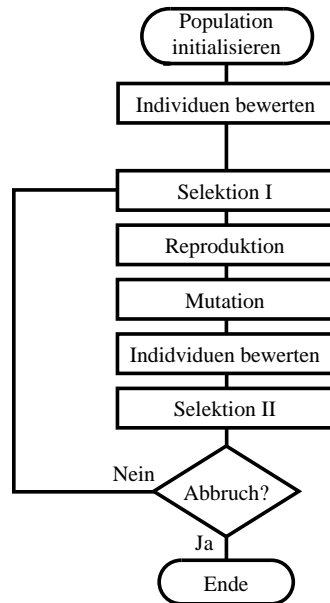


Abbildung 3. Flußdiagramm Evolutionstrategien

der einzelnen Elemente aus Abb. 3 ist nicht starr festgelegt, sondern muß mit viel Erfahrung an die entsprechende Aufgabe angepaßt werden. Weitere Informationen zu ES sind beispielsweise zu finden in (J. Riedel, 1998), (Michalewicz, 1994) und (E. Herz, 2000). Im folgenden wird die Umsetzung der einzelnen Elemente für die Optimierung des Schiffes erläutert.

Population initialisieren

Eine Population verwaltet die Designvektoren \mathbf{t} von mehreren Realisationen des Schiffes. Unter anderem werden während der Initialisierung die Populationsgröße, die Anzahl der Designvariablen, deren Grenzen und deren Startvektoren festgelegt. Im speziellen Fall werden zwei Populationen nebeneinander verwaltet. Die Population $P1$ besteht aus 4 Realisationen, 30000 Designvariablen wobei $t_i \in [t_{min}, t_{max}]$ ist. Das Startdesign der ersten Generation ($n = 0$) wurde für alle 4 Realisationen aus dem vorhanden FE-Modell gewonnen und verletzt keine Nebenbedingung. Die Population $P2$ besteht aus 4 Realisationen und 40 repräsentativen Designvariablen - eine pro Gruppe, wobei $t_j \in [-\infty, \infty]$ gilt. Für den Selbstregulierungsmechanismus wird ein Vector \mathbf{r} mit 0 initialisiert.

Individuen bewerten

Für jeden der Designvektoren \mathbf{t} aus der Population $P1$ wird der Zielfunktionswert $Z(\mathbf{t})$ bestimmt und die Spannungen infolge beider Lastfälle durch FE-Berechnungen mit dem

Programm ANSYS ermittelt. Anhand der Spannungen werden alle Nebenbedingungen Gl. (3) überprüft und die Sensitivitäten berechnet. Da die FE-Berechnungen voneinander unabhängig sind werden diese parallel berechnet.

Selektion I

Alle 4 Designvektoren der Population $P1$ werden zur Reproduktion ausgewählt.

Reproduktion

Aus den ausgewählten Vektoren werden Nachkommen gebildet, indem zwischen je zwei Designvektoren nach dem Uniform-Crossover-Verfahren (sh. auch (L.J. Eshelman, 1989) und (E. Herz, 2000)) mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% Variablen ausgetauscht werden.

Mutation

Vor der Mutation werden die Variablen der Nachkommen, wie in Kapitel "Automatische Gruppierung der Variablen" beschrieben, anhand der Sensitivitäten der bis dahin besten Realisation gruppiert. Jeweils die erste Variable einer Gruppe repräsentiert die anderen Variablen. Aus den 4×40 repräsentativen Variablen wird die Generation n der Population $P2$ gebildet. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 7% werden nun Variablen aus $P2$ dem Mutationmechanismus zugeführt.

Der Mutationsmechanismus für eine Variable j ist durch eine Normalverteilung mit Mittelwert t_j und einer Standardabweichung $\sigma(j, f_n)$ nach Gl. (6) festgelegt.

$$\sigma(j, f_n) = f_n \frac{0,04(40 - j) + 0,20(j - 1)}{39} \quad (6a)$$

Der Faktor f_n dient zur Selbstregulierung, und soll verhindern, daß durch Mutation zu häufig Designvektoren gebildet werden, die die Nebenbedingungen nicht erfüllen. Da mit selbstregelnden ES noch keine Erfahrungen vorliegen, wurde, ohne weitere Begründung,

$$f_n = f_{n-1} \cdot \begin{cases} 0,9 & \text{wenn } \sum_{k=n-5}^{n-1} r_k \geq 1 \\ 1,1\bar{1} & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{mit } f_0 = 1,0 \quad (6b)$$

ausprobiert. Mit Hilfe der Normalverteilungen werden für die Variablen ein neuer zufälliger Werte generiert und zugewiesen. Für die Rücktransformation wird die Differenz der repräsentativen Variablen t_j aus $P2$ gegenüber ihren ursprünglichen Wert aus $P1$ ermittelt. Die Differenz wird nun auf alle Variablen der Gruppe j angewendet und in $P1$ eingetragen, gleichzeitig werden Variablen, die den Definitionsbereich von $[t_{min}, t_{max}]$ überschreiten auf die entsprechende Grenze zurückgeführt.

Individuen bewerten

siehe oben.

Selektion II

Realisationen, die eine oder mehrere Nebenbedingungen verletzen, werden sofort aus der Population ausgesondert und deren Anzahl in r_n vermerkt. Aus den 4 besten Realisationen der Menge der übrigen und den 4 der letzten Generation wird die neue Generation $n = n + 1$ der Population $P1$ gebildet.

Abbruch

In diesem Fall wird die Zeit für die Optimierung durch die gesetzten Terminfristen begrenzt.

Ergebnisse

Ausgehend vom Startdesign des FE-Modells zeigt Abbildung 4 den Verlauf der Optimierung. Anfangs war diese zufriedenstellend, ab der Generation 200 sieht es so aus, als ob die Optimierung konvergieren würde. Bei genauerer Untersuchung stellte sich aber heraus, daß der Faktor f_n für den Selbstregelmechanismus sehr klein war und die Optimierung deshalb ein lokales Optimum nicht mehr verlassen konnte. Nach einigen Experimenten ab Generation 330 wurde der Faktor f_{390} auf 1 zurückgesetzt. Der weitere Verlauf läßt vermuten, daß der Selbstregelmechanismus zu stark in die Optimierung eingreift. Das vorläufige Endergebnis nach 748 Generationen und fast 3000 Berechnungen bestätigte die Vermutung, daß signifikante Materialeinsparung möglich sind.

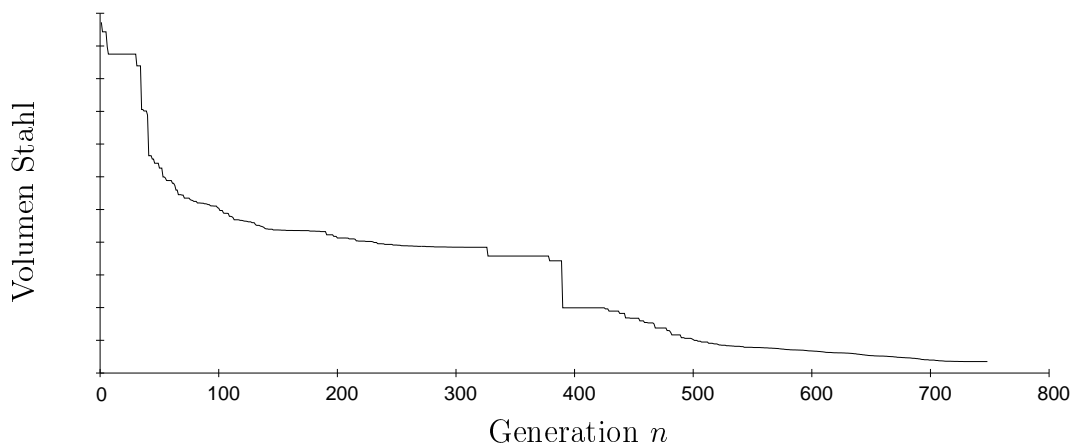


Abbildung 4. Verlauf der Optimierung

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde von der Firma *CAD-FEM* in Auftrag gegeben, wofür der Autor sehr dankbar ist. Ferner sei hier *Jörn Nelz* gedankt, für die Kooperation bei der Einrichtung der Schnittstelle zwischen den verwendeten Programmen.

Literatur

ANSYS (1998), *ANSYS Theory Reference*, SAS IP, Inc., online documentation.

- E. Herz, O. Huth, e. a. (2000), *Shaping the Structural Language*, Institut für Strukturmechanik, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.
- J. Riedel, D. Roos, e. a. (1998), *4. Institutskolloquium*, Institut für Strukturmechanik, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.
- L.J. Eshelman, R.A. Caruana, J. S. (1989), "Biases in the Crossover Landscape," *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, ICGA'89*, 10–19.
- Michalewicz, Z. (1994), *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutionary Programs*, Springer-Verlag, Berlin USA.