

DISS. ETH NO. 17573

GLOBAL OPTIMIZATION OF LAMINATED STRUCTURES

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
NINO ZEHNDER
Dipl. Masch. Ing. ETH
born March 6, 1972
citizen of Birmenstorf (AG)

accepted on recommendation of
Prof. Dr. P. Ermanni, examiner
Prof. Dr. K. Drechsler, co-examiner
Dr. G. Kress, co-examiner

2008

Abstract

The application of laminated composite materials is well established for the manufacturing of high-performance lightweight structures. They are widely used because their stiffness-to-weight ratio is high if compared to other materials. Furthermore laminated composites offer the possibility to create an extremely wide range of different material behavior that can be tailored to structural needs. Additionally, manufacturing processes allow the building of structures with regions containing different laminates and consequentially different material properties in these regions. This increases the freedom in design and gives more control to fine-tune the material to meet local design requirements. However, the challenge in terms of sizing, optimization, and rules for spatial variation of the laminate design is much higher if compared to isotropic materials.

The possibility to achieve an efficient design that fulfills the global criteria and the difficulty to select the values out of a large set of constrained design variables makes computer aided optimization a natural tool for the design of laminated composite structures.

The analysis of today's laminate optimization methods reveals that the parametrization methods constrict the design space unnecessarily and can thereby not keep up with the manifold design possibilities of composite manufacturing processes.

This thesis seeks to overcome this drawback and therefore introduces a parametrization scheme which corresponds with a specific manufacturing process. It connects the aspects of global structural properties, local laminate construction, and the manufacturability. This scheme can access and amend all variable design parameters and at the same time keep the restrictions because they are inherently included in the parametrization and therefore renders a highly efficient optimization process.

The presented scheme is implemented in a laminate optimization methodology which allows to amend *all* parameters that can be addressed by the chosen manufacturing process. The methodology is realized by a sequence of three sophisticated custom built software tools and takes advantage of the associative-parametric geometry representation of a commercial CAD-system. This system is used to map the parametrization scheme to the designers world to define a virtual lay-up pattern. The program `LaminateExport` extracts all information needed from the virtual lay-up to build a detailed finite element model including the element-wise material orientations based on a geometrical draping algorithm. This information is used to adjust the local material properties and the local material thickness in every finite element in order to simulate the real-world the best. The optimization is performed with the proprietary software `DynOPS`, a generally

applicable parameter optimization tool which leads the entire optimization process and uses a parallel environment to minimize run time.

The entire implementation of the Patch Concept is demonstrated and validated on four different examples.

The first example demonstrates the amendability of all laminate related parameters. On a doubly curved surface the angle between the initially orthogonal warp and weft threads is maximized in order to get the least material distortion in the entire structure. The smallest angle between warp and weft threads shows for the best solution a value of 77° , whereas the worst solution has for the same angle a value of 45° only.

The movement of a highly specialized patch of reinforcement fibers on a dome-like structure is shown in the second example. This example demonstrates the increased possibilities in parametrization which arise from the presented methodology: The patch can freely change its shape, size, and location on the structure.

In the third example, the compliance of a sailing boat hull is minimized while maintaining the initially given weight of the hull and price of the materials. The overall best result is 20% stiffer, 1% lighter, and 2% less expensive than the original design.

The last application validates the use of the built method on a real-world structure. A keel of a sailing boat is optimized subject to a deformation objective. Three different lay-up patterns are parametrized with increasing complexity and the best result for each parametrization is compared to an isotropic reference structure. The overall best solution is 57% better than the reference structure while showing the same mass.

Zusammenfassung

Für den Bau von Leichtbaustrukturen werden heute oft geschichtete faserverstärkte Kunststoffe (Laminates) verwendet. Der Erfolg dieser Materialien im Leichtbau beruht auf ihren ausgezeichneten massespezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten und den vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten in der Fertigung. Durch die Wahl der anisotropen Materialien, der Orientierungen der Materialhauptrichtungen und die Anzahl der einzelnen Schichten eines Laminates lassen sich dessen Eigenschaften entsprechend den vorherrschenden Belastungen einstellen. Hinzu kommt, dass viele Fertigungsprozesse es erlauben, Strukturen zu bauen, die in verschiedenen Bereichen unterschiedliche Laminates und damit unterschiedliche Materialeigenschaften besitzen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten in der Gestaltung der Bauteile und erlaubt es die Materialeigenschaften an die lokal vorherrschenden Belastungen anzupassen. Jedoch erschwert die nun viel grössere Anzahl von Parametern den Designprozess. Deswegen erweist sich hier die automatisierte numerische Designoptimierung als besonders geeignetes Werkzeug.

Die dem Stand der Technik entsprechenden Laminatoptimierungsmethoden schränken den Designraum oft unnötigerweise ein und können dadurch nicht alle Möglichkeiten der Fertigungsprozesse ausnützen. Die als Gegenstand dieser Dissertation entwickelte Methodik überwindet die bisherigen Grenzen, indem sie die Gestaltungsvielfalt eines vorgegebenen Fertigungsprozesses in der Parametrisierung, und damit im Lösungsraum des Optimierungsproblems, einschliesst. Die neue Methodik verbindet Aspekte des globalen Verhaltens der Struktur mit der lokalen Laminatgestaltung und den Randbedingungen der Fertigung. Da auch alle Restriktionen direkt in der Parameterisierung des Modells erfasst werden, kann der Optimierungsprozess, oder die Suche nach der besten Lösung, sehr effizient ablaufen. Die Anwendbarkeit der Methodik wird anhand von vier Beispielproblemen aufgezeigt. Die dazu notwendige Softwareumgebung umfasst drei im Rahmen dieser Arbeit geschriebene Programme und nutzt zusätzlich den vollen Funktionsumfang eines assoziativ-parametrischen CAD-Systems. Mit Hilfe dieses Systems wird die Geometrie und der gesamte Lagenaufbau der Struktur definiert. Von diesem virtuellen Modell extrahiert das Programm `LaminateExport` alle für die Erstellung eines Finite Elemente Modells notwendigen Daten. Dabei werden die lokalen Materialeigenschaften Dicke und Materialorientierung für jedes Element durch einen eigens implementierten geometrischen Drapierungsalgorithmus bestimmt. Die Suche nach guten Lösungen erfolgt mit der Optimierungssoftware DynOPS für allgemeine Parameteroptimierung, welche parallele Evaluationen unterstützt und so die Berechnungszeit der Suche minimiert.

Das erste Beispielproblem betrifft das Ablegen eines Gewebes auf einer dop-

pelt gekrümmten Fläche. Dabei wird der Startpunkt und die anfängliche Orientierung der Materialhauptachsen gesucht für den die kleinsten Deformationen des Materials, hier gemessen am Winkel zwischen Kett- und Schussfaden, auftreten. Beim undeformierten Material beträgt der Winkel 90 Grad und in der besten Lösung 77 Grad. Ungünstige Lösungen können hier zu Zwischenwinkeln von lediglich 45 Grad führen. Das zweite Beispiel zeigt anhand eines hoch spezialisierten Stückes Verstärkungsmaterials die Funktionalität der neuen Methode: Der Optimierungsalgorithmus kann Orientierung, Form, Grösse und Position der Verstärkung auf der Struktur frei wählen. Das dritte Beispiel zeigt die Optimierung der Nachgiebigkeit des Rumpfes einer Segelyacht unter Einhaltung des ursprünglichen Gewichtes und Preises. Das beste Resultat ist 20% steifer, 1% leichter und 2% günstiger als das originale Design.

Zuletzt wird im Rahmen einer realen Aufgabenstellung das Deformationsverhalten einer Kielfinne eines Segelbootes optimiert. Dabei wird der Einfluss unterschiedlicher Parametrisierungsschemata und Anzahl Optimierungsparameter betrachtet. Drei unterschiedliche Laminierpläne mit steigender Anzahl Parameter werden optimiert und die jeweils beste Lösung mit einer isotropen Referenzstruktur verglichen. Die beste gefundene Lösung hat ein um 57% besseres Deformationsverhalten bei gleichbleibender Masse verglichen mit der Referenzstruktur.