

Analyse verschiedener Rotorblattbauweisen nach der Methode der finiten Elemente

Analysis of Various Rotorblade Constructions by Means of The Finite Element Method

Hinsch, Christian; Söker, Holger

Summary

Within the bounds of DEWI's research activities it is intended to survey various rotorblade constructions by means of the finite element method. This will be done with regard to strength, stiffness, materials and their implications on production methods, costs and recycling. In order to do so a program for the semiautomatic generation of finite element models was developed as a diploma thesis in co-operation with the institute for aircraft and light weight construction of the Technical University at Braunschweig [1].

Before the actual programming phase an analysis of existing blade constructions was carried out. As an example the rotorblade of the wind energy converter DEBRA-25 was examined with emphasis on strains, displacements and natural frequencies. The calculation results were compared to experimental data to verify the finite element model.

1. Einleitung

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten beabsichtigt das DEWI, verschiedene Blattbauweisen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit, Materialauswahl sowie den damit verbundenen Produktionstechniken, Kosten und Recyclingfragen zu beurteilen. Dazu wurde ein Programm zur halbautomatischen Erstellung von Finite-Elemente-Modellen verschiedener Rotorblattbauweisen als Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Flugzeugbau und Leichtbau der TU Braunschweig erstellt [1].

Der eigentlichen Programmierphase ging eine Analyse vorhandener Blattbauweisen voraus. Am Beispiel des Rotorblattes der Windkraftanlage DEBRA-25 wurde ein generiertes FE-Modell bezüglich der Dehnungen, Verformungen und Eigenfrequenzen durch Vergleich der Ergebnisse aus Rechnung und Versuch überprüft.

2. Analyse der Bauweisen

Bei der Analyse vorhandener Rotorblattstrukturen muß zwischen dem äußeren Aufbau des Rotorblattes und der inneren Struktur unterschieden werden. Die Rotorblätter heutiger Windkraftanlagen mit horizontaler Achse bestehen aus einem oder mehreren trapezförmigen Abschnitten und gehen zur Blattwurzel hin meist in einen Kreisquerschnitt über. Die einzelnen Querschnitte haben aerodynamische Profile und sind gegenüber der Horizontalen um einen Verwindungswinkel β gedreht (Abb. 1).

Als mögliche Materialien kommen die aus dem Flugzeugbau bekannten Werkstoffe Stahl, Aluminium und Titan sowie insbesondere Faserverbundwerkstoffe (FVW) und Holz in Frage. Die zur Zeit häufigste Form der FVW besteht aus Glasfasern und einem Epoxid- oder Polyester - Harzsystem. Sie besitzen eine hohe Festigkeit in Faserrichtung, sind gut zu verarbeiten und aus dem Segelflugzeugbau sehr gut bekannt. Ein weiterer Vorteil der FVW ist die Möglichkeit, durch eine der Belastung angepaßte Orientierung der Fasern die Materialfestigkeit optimal auszunutzen und somit leichte Strukturen zu verwirklichen. Durch die Produktionstechnik (Laminierverfahren) lassen sich nahezu beliebige geometrische Formen herstellen, bei sehr guter Formtreue.

Analysiert man die verschiedenen Bauweisen, so lassen sich einige wesentliche Elemente eines Blattes herausstellen (Abb. 2)

Abb 1: Äußere Geometrie eines Rotorblattes [2]

Fig. 1: Outer geometry of a rotor blade [2]

Abb. 2: Die wesentlichen Elemente eines Blattes [3]

Fig. 2: The main elements of a rotor blade [3]

- tragende Schalen :
Hierbei muß die Schale häufig durch Sandwichkonstruktionen und Rippen oder volle Schaumkerne gegen Beulen gestützt werden.
- Gurte :
Mit Hilfe der Gurte werden Zug- und Druckkräfte aufgenommen und in den Blattanschluß übertragen. Sie sind in der Regel symmetrisch zum Steg auf der Profillober- und Profilunterseite angeordnet.
- Holme :
Der Holm ist das tragende Element in Spannweitenrichtung und nimmt vorwiegend Biegemomente auf, kann aber bei großer Querschnittsfläche auch zur Torsionssteifigkeit beitragen.
- Stege :
Stege dienen der Aufnahme der Querkräfte und werden häufig als Sandwichkonstruktion hergestellt, um ihre Steifigkeit zu erhöhen. Durch den Einsatz von Stegen erhöht sich die Beulsteifigkeit der Schale.
- Rippen :

Als Rippen werden die Querversteifungen eines Blattes bezeichnet. Sie sind flächige Gebilde, die Aussparungen zur Durchführung von Gestängen und zur Belüftung des Blattinneren aufweisen.

- Beulversteifungen :
Balkenartige Versteifungen in Blattlängsrichtung an der Profiloberseite und/oder an der Profilunterseite verhindern ein örtliches Beulen der Struktur.

- Schaumklötze :
Durch teilweises oder auch vollständiges Füllen des Rotorblattes mit einem Hartschaum wird die Beulsteifigkeit erhöht.

- Profilendfahne :
Der hintere Bereich eines Blattprofils wird als Endfahne bezeichnet und ist aus aeroelastischen Gründen (Schwerpunktlage) leicht konstruiert, was sich durch eine Sandwichbauweise realisieren läßt.

Am Beispiel des Rotorblattes der DEBRA-25 sind Holm, Steg und Endfahne gut zu erkennen (Abb. 3).

Abb. 3: Aufbau des Rotorblattes der DEBRA-25 [4]
Fig. 3: Design of the DEBRA-25 rotor blade [4]

3. Das Programm zur halbautomatischen Erstellung eines FE-Modells

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde ein FORTRAN 77 - Programm entwickelt, mit dem für die oben beschriebenen Bauweisen FE - Modelle erzeugt werden können. Für die DEBRA-25 ergibt sich das folgende Modell, bestehend aus 1374 Knoten und 1462 Schalenelementen (Abb. 4).

Abb. 4: Das FE - Modell des Rotorblatts der DEBRA-25

Fig. 4: The FE - modell of the rotor blade of the DEBRA-25

Wie in Abb. 3 zu erkennen, besteht das DEBRA - Rotorblatt aus einem C-Holm, einem Schubsteg und einer Endfahne. Diese Bauteile finden sich auch im FE - Modell wieder (Abb. 5).

Bei dem gezeigten Modell handelt es sich um ein rein geometrisches Modell, dessen Elemente noch nicht die richtigen Materialeigenschaften besitzen. Diese müssen anhand der realen GFK - Rotorblattstruktur ermittelt werden und können dann in Form von Materialtabellen eingegeben und anschließend den Elementen zugeordnet werden.

Abb. 5: FE - Modell der inneren Struktur des Rotorblatts

Fig. 5: FE - modell of the inner structure of the rotor blade

4. Ergebnisse der FEM - Rechnung

Zur Durchführung der FEM - Analyse steht am DEWI das FE - Programm "ANSYS" zur Verfügung. Es wurde ein statischer Belastungsversuch zur Bestimmung der Auslenkung der Blattspitze infolge einer Querkraft von ca. 32 kN und der dabei auftretenden Dehnungen simuliert. Im Vergleich zum Versuch ergab sich die folgende Biegelinie (Abb. 6).

Im Versuch ergab sich eine Auslenkung der Blattspitze von 1,85 m. Dieser Wert konnte bei der Simulation nicht ganz erreicht werden, wo die Auslenkung der Blattspitze "nur" 1,725 m betrug. Die Abweichung zwischen Experiment und Simulation beträgt somit an der Blattspitze 6,8% ; das FE - Modell besitzt folglich eine zu große Steifigkeit, wofür im wesentlichen folgende Gründe in Frage kommen :

- Fehler bei der Idealisierung der realen Rotorblattstruktur,
- Fehler bei der Bestimmung der Ersatzmaterialkennwerte,

- Vernachlässigung der Art der Einspannung.

Abb. 6: Vergleich der Biegelinien
Fig. 6: Comparison of bending lines

Das entsprechende Verformungsbild beim statischen Belastungsversuch zeigt Abb. 7.

Abb. 7: Verformungsbild
Fig. 7: Distortion sight

Neben der statischen Analyse wurde auch eine Modalanalyse zur Bestimmung der Blatteigenformen und der Eigenfrequenzen durchgeführt. Hierzu mußten die Massenverhältnisse im Rotorblatt berücksichtigt werden, wodurch eine weitere Fehlerquelle auftritt (Abb. 8).

Abb. 8: Die ersten drei Eigenformen des Rotorblattes
Fig. 8: The first three Eigenfrequencies of the rotor blade.

5. Zusammenfassung

Durch das Programm zur halbautomatischen Erstellung von Finite-Elemente-Modellen besteht am DEWI im Rahmen der Forschungsaktivitäten die Möglichkeit, auf relativ einfachem Wege Aussagen hinsichtlich der Steifigkeit und Festigkeit von Rotorblättern zu machen. Dazu sind allerdings ausführliche Unterlagen über Aufbau und Materialeinsatz notwendig, um im vorhandenen FE - Programm "ANSYS" das generierte Modell mit den richtigen Materialkennwerten zu versorgen und die Rechnungen durchführen zu können.

Da uns die benötigten Unterlagen für die DEBRA-25 freundlicherweise vom Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung der DLR Stuttgart zur Verfügung gestellt worden sind, wurde ein Rotorblatt der DEBRA-25 statisch untersucht und die Eigenfrequenzen ermittelt. Ergebnisse dieser Berechnungen sind als Forschungsbericht (DEWI - V - 930002) beim DEWI erhältlich.

6. Literatur

- [1] C. Hinsch: Entwurf und Überprüfung eines Rotorblattstrukturmodells nach der Methode der finiten Elemente zur Untersuchung verschiedener Geometrien und Bauweisen :Diplomarbeit Nr. 191 : Institut für Flugzeugbau und Leichtbau : TU Braunschweig : 1993.
- [2] J.P. Molly: Windenergie - Theorie, Anwendung, Messung :Verlag C.F. Müller : Karlsruhe : 1990.
- [3] D. Muser: Rotorblatt - Entwicklung für Windenergiekonverter mit 11,5m Durchmesser :IB 454 - 77/13 : Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung: DLR : Stuttgart :1977.
- [4] H. Bönisch, H. Hald, C. Kensche, A. Kußmann, J.P. Molly, H. Seifert: Entwicklung, Bau und Betrieb einer 30/100 kW Windkraftanlage: Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung : DLR : Stuttgart : 1987.