



FEM-Analyse von Windturbinenblättern

Aeroelastische Betrachtung des Rotors bezüglich der Torsionseffekte - Torsionswinkel sollten in der Drehmomentberechnung berücksichtigt werden

Auf Grundlage der veröffentlichten Daten der AEOLUS II wurde ein theoretisches Windturbinenblatt, T100, entwickelt und auf Torsionseffekte untersucht. Das Verfahren zur Betrachtung der Torsionseffekte an WKA-Rotoren wurde mit Hilfe einer kommerziell erhältlichen FEM-Software, NX NASTRAN von UGS, zusammen mit allgemeingültigen aerodynamischen Grundlagen realisiert. Das Verfahren kann zur Berechnung jedes Flügels/Rotortyps angewandt werden.

AEOLUS II

Im Jade-Windpark Wilhelmshaven steht das größte Windkraftwerk Deutschlands: die Anlage AEOLUS II, in Betrieb seit Herbst 1993. Der Windenergiekonverter hat eine Nennleistung von 3 Megawatt, die ab Windstärke 7 erbracht wird. Der Turm besteht aus Spannbeton und ist 92 Meter hoch. Die runde Fundamentplatte hat einen Durchmesser von 14,4 Metern und ist vier Meter dick. Sie ruht auf 36 Betonpfählen, die tief in dem weichen Marschenboden verankert sind.

Die Maschinengondel an der Spitze des Turms wiegt einschließlich des Rotors 162 Tonnen; das Gewicht eines einzelnen Rotorblattes beträgt 9 Tonnen. Die 38,8 Meter langen Blätter bestehen aus kohle- und glasfaserverstärktem Kunststoff. Die Drehzahl des Rotors liegt zwischen 11 und 24 Umdrehungen pro Minute. Die Drehzahlregelung erfolgt durch automatische Verstellung des Einstellwinkels der Rotorblätter.

Für die Auslegung eines Windturbinenrotors werden aeroelastische Berechnungen durchgeführt. Hierbei werden sowohl für die Aerodynamik als auch für die Strukturmechanik vereinfachende Annahmen getroffen.

Stand der Technik bei den angewandten Methoden ist, dass die Aerodynamik des Rotors zunächst durch eine Vielzahl von zweidimensionalen Profilpolaren mit Interpolationsmöglichkeiten approximiert wird, wobei die Profilpolare 2D-Windkanalmessungen entnommen werden. Die Strukturmechanik bezieht sich in der Regel auf eindimensionale Balkenelemente, die für Biege- und Zuglasten, nicht aber für Torsionsbetrachtungen um die Rotorlängsachse berechnet werden. Torsionseffekte nimmt man als sehr klein und damit vernachlässigbar an. Mit zunehmender Größe des Rotordurchmessers von der Größenordnung 100 m wird erwartet, dass die Torsionslasten einen zunehmenden, nicht mehr vernachlässigbaren Einfluss auf die Wechselwirkung der Aerodynamik und Strukturmechanik nehmen.

In dieser Forschungsarbeit wird mit besonderem Augenmerk auf die Torsionseffekte des Rotorblattes die Größenordnung der Drehwinkel ermittelt. Da diese Arbeit auf Torsionseffekte fokussiert, wird auf sonstige Parameter wie z.B. Windgeschwindigkeitsgradient und Rotorebenenneigung verzichtet

und somit eine stationäre Strömung simuliert. In einem iterativen Verfahren wird zunächst die aerodynamische Lastverteilung auf dem Rotorblatt ermittelt und die Ergebnisse in einem strukturmechanischen Programm auf das Balkenmodell des Rotorblattes übertragen. Die aerodynamischen Belastungen und die Zentrifugalkräfte erzeugen einen Gleichgewichtszustand und eine neue Deformation für das Rotorblatt.

Der neue Gleichgewichtszustand wird für die Ermittlung der Aerodynamik für den nächsten Berechnungsschritt benutzt. Dieses iterative Verfahren wird so lange fortgesetzt, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Im Anschluss daran werden die deformierte Form und der Drehwinkel um die Längsachse des Rotorblattes als Einflussgrößen für die Drehmomentermittlung der Antriebswelle beurteilt.

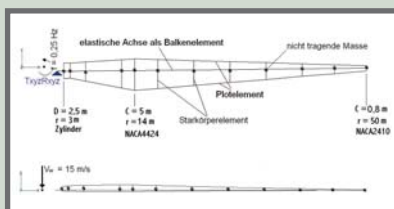


Abb. 1: Grundrissdarstellung Rotorblatt T100

Modellbildung

Angelehnt an Aelous II [1] wurde ein Windturbinenrotorblatt, T100, mit einem Durchmesser von $D = 100$ m mit folgenden Daten angenommen (Abb. 1):

Rotordurchmesser:	100 m
Rotordrehzahl	27 RPM (0,45 Hz)
Durchmesser des Anschlussprofils:	2,5 m
Größe Blatttiefe:	5,0 m
Kleinste Blatttiefe:	0,8 m
Relative Dicke bei $r/R = 0,7$:	0,22
Aerodynamische Profile:	Kreiszyylinder, NACA 4424, NACA 4421, NACA 2410
Masse:	8000 kg (Abschätzung)
Leistung:	4 MW (Abschätzung)
Auslegungswindgeschwindigkeit:	15 m/s
Umfangsgeschwindigkeit $R=50$ m	141 m/s
Schnelllaufzahl λ	9,4

Blattflächendichte = Fläche der Rotorblätter / Rotorkreisfläche: $146 \cdot 3 / 50^2 \cdot \pi = 5,5$ [%]
 Streckung (Schlankheit) = (Rotorradius)² / Fläche eines Rotorblattes: $50^2 / 146 = 17$ [-]
 Zuspitzung = Blatttiefe an der Spitze / Blatttiefe an der Wurzel: $0,8 / 5,0 = 0,16$ [-]
 Lineare Verwindung des Rotorblattes: 15°

FEM-Modell

Die Anzahl der Rotoren der Windkraftanlage beträgt 3. Das Balkenmodell stellt nur einen Rotor dar, dessen Hülle dann in einem 1/3-symmetrischen Aerodynamikmodell berechnet wird. Die Struktur des Rotors besteht aus insgesamt 62 Knoten und 58 Balken-, Massen-, Starrkörper- sowie Plotelementen (Abb. 1). Die Masse ist 8311 kg. Die Schwerpunktlage ist: $X = 14,1$ m, $Y = -0,6$ m, $Z = 0,04$ m.

Querschnittsdaten des Rotorblattes T100 wurden von AEOLUS II übernommen und interpoliert. Die Modelle wurden entsprechend dem SI-Einheitensystem erstellt und mit dem Programm NX NASTRAN [2] berechnet. Als Randbedingung ist der Rotor an der Wurzel mit allen Freiheitsgraden gesperrt (Abb. 1). Als Lasten wurden Eigengewicht, Zentrifugalkraft und die Aerodynamik berücksichtigt. Das Eigengewicht, ca. 8000 kg, spielt bei der Torsionsuntersuchung eine untergeordnete Rolle. In der Vertikallage des Rotorblattes ist der Einfluss des Eigengewichtes quasi Null. In der Horizontallage des Rotorblattes ist der Einfluss des Eigengewichtes vernachlässigbar. Die Zentrifugalkraft spielt mit ihrem aufrichtenden Einfluss bei $f = 0,45$ Hz nur eine untergeordnete Rolle.

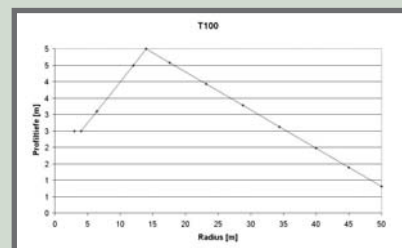


Abb. 2: Profiltiefe Rotorblatt T100. Das Rotorblatt hat eine lineare Profiltiefenverteilung mit einem Maximum von 5 m an der Stelle $r = 14$ m und einem Minimum von 0,8 m an der Stelle $r = 50$ m.

Die Aerodynamik des Rotors T100 wurde durch folgende Profilverteilung festgelegt (Abb. 2):

Profil	Radial Lage [m]
Kreiszylinder	3 - 4
NACA 4424	14
NACA 4421	40
NACA 2410	50

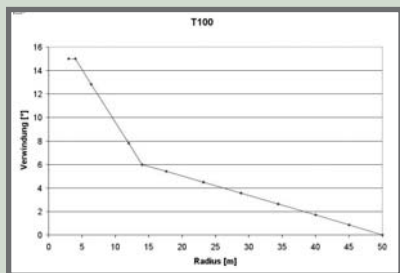


Abb. 3: Lineare Verdrehung Rotorblatt T100, Maximum von 15 ° an der Stelle r = 4 m, Minimum von 0 ° an der Stelle r = 50 m.

Die Anstellwinkelverteilung ist linear (Abb. 3). Die aerodynamischen Lasten werden nach [3] wie folgt berechnet:

$A = C_a F q$ Auftrieb [N]
 $W = C_w F q$ Widerstand [N]
 $M = C_m F q c$ Nickmoment [N]

mit

C_a	Auftriebsbeiwert	[-]
C_w	Widerstandsbeiwert	[-]
C_m	Nickmomentsbeiwert	[-]
F	Aerodynamische Fläche	[m ²]
$q = \rho/2 (V_w)^2$	Staudruck	[N/m ²]
ρ	Luftdichte	[kg/m ³]
V_w	Windgeschwindigkeit	[m/s]
c	Profiltiefe	[m]

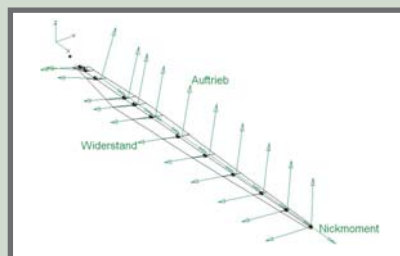


Abb. 4: die aerodynamischen Lasten, A, M, W

Die aerodynamischen Kräfte und Momente (Abb. 4) sind bestimmt durch die Geschwindigkeit der anströmenden Luft, $V_w = 15 \text{ m/s}$, sowie der lokalen Umfangsgeschwindigkeit des Rotorblattes, die zusammen eine lokale, resultierende Anströmgeschwindigkeit bilden.

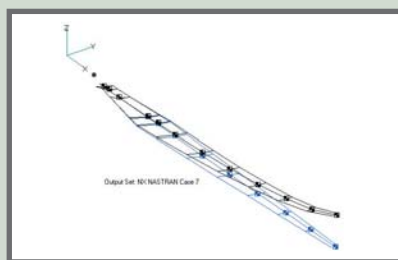


Abb. 5: Deformationen des Rotorblattes T100, aerodynamische Lasten + Zentrifugalkraft

Ergebnisse

Abb. 5 zeigt die Deformationen des Rotorblattes T100 auf Grund der aerodynamischen Lasten und der Zentrifugalkraft. Die Schlagdeformation für die erste Anstellwinkelverteilung ist 7 m, die Schwenkdeformation hierfür 0,4 m. Die Rotation an der Rotor Spitze ist 8,3 °. Die elastische Torsion auf Grund der Belastungen mit der ersten Anstellwinkelverteilung wurde als Anstellwinkel für die zweite Iteration benutzt (siehe Abb. 6 und 7).

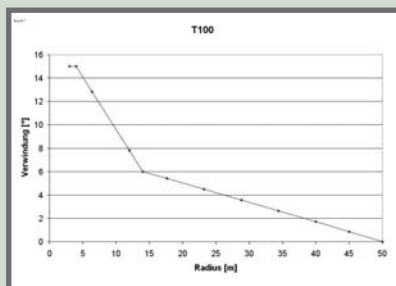


Abb. 6: Anstellwinkelverteilung als Funktion der Iteration, Rotorblatt T100

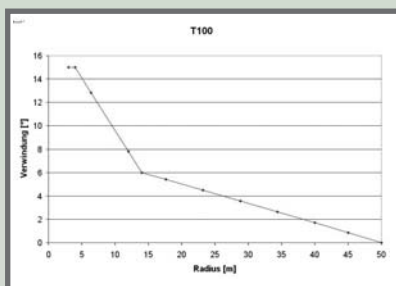


Abb. 7: Anstellwinkelzuwachs als Funktion der Iteration, Rotorblatt T100

Diese iterative Vorgehensweise wurde insgesamt vier Mal durchgeführt. Bei der letzten Iteration war der Zuwachs der elastischen Torsion vernachlässigbar klein und der Iterationsvorgang wurde somit beendet. Es ergibt eine Drehmomentänderung vom 50 Prozent (siehe Abb. 8 und 9). Somit erhöht sich die Leistung von 2,0 MW auf 4,0 MW.

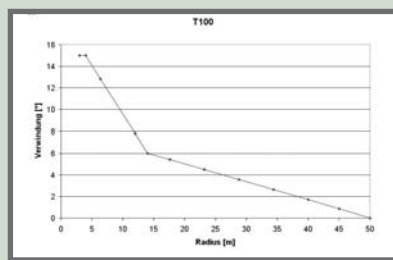


Abb. 8 (re.): Prozentualer Drehmomentzuwachs als Funktion der Iteration, Rotorblatt T100

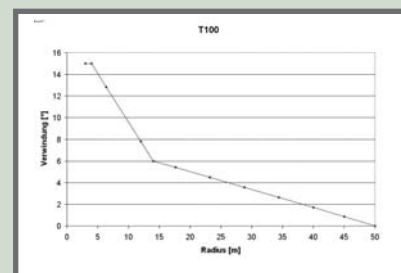


Abb. 8 (li.): Drehmomentzuwachs als Funktion der Iteration, Rotorblatt T100

Zusammenfassung

Die Berücksichtigung der elastischen Torsion des Rotors T100 auf Grund der aerodynamischen Lasten und Zentrifugalkraft zeigt eine Beeinflussung der Drehmomentbilanz und folglich der Struktur. In dieser Arbeit wurden folgende Vereinfachungen vorgenommen: Ein stationärer Betriebszustand wurde angenommen. Die Bodengrenzschicht wurde nicht berücksichtigt. Die Einflüsse des Turmes wurden nicht berücksichtigt. Die Dreidimensionalität der Strömung wurde vernachlässigt. Trotzdem zeigt sich zumindest qualitativ, dass ein torsionselastischer Rotor sich von einem starr angenommenen Rotor wesentlich unterscheidet. In künftigen Untersuchungen soll das Problem mehr quantitativ behandelt werden. ■■

Referenzen

- [1] Emmerling S. Festigkeitsnachweis des AEOLUS II Rotorblattes, MBB TN-HE133-91-007, 1991
- [2] NX NASTRAN www.ugsplm.de/produkte/nx/, 5. Juni 2005 FEMAP
- [3] Schlichting Aerodynamik des Flugzeuges Band 1, Springer Verlag 1967, Truckenbrodt ISBN 3-540-03970-8

Dipl.-Ing. Armin F. Khadjavi
 IBS Engineering GmbH
 Hanauer Str. 14 B
 D- 80992 München
 Telefon: 089 / 84057730
 Fax: 089 / 84057731
 f.khadjavi@ibs-engine.de
 www.ibs-engine.de



FEM-Analyse von Windturbinenblättern (II)

In einem früheren Beitrag (siehe Referenz I, **interface 3-2005**) wurde anhand von Balkenmodellen auf die Einflüsse der aeroelastischen Effekte auf das Torsionsverhalten von Rotorblättern berichtet. Es wurde festgestellt, dass die entstehenden Torsionswinkel nicht vernachlässigbar sind.

In dieser gegenwärtigen Arbeit wird wie in [1] das Rotorblatt der Torsionswinkel in einem iterativen Verfahren, das heißt mit der mehrfachen, sich gegenseitig beeinflussenden Datenkorrektur aus dem Bereich Aerodynamik und Strukturmechanik berechnet.

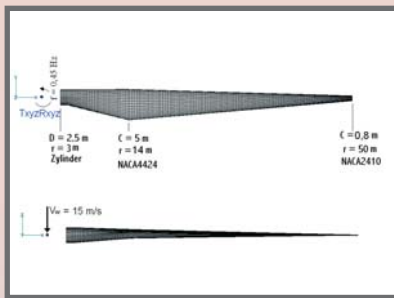


Bild 1: Grundrissdarstellung Rotorblatt T100

Der grundsätzliche Unterschied zu [1] ist jedoch, dass das Strukturmodell aus Schalenelementen besteht, welches eine exaktere Berechnung mit mehr Detailinformation ermöglicht. Ebenso wird die Aerodynamik nicht mehr aus 2D-Profilpolaren bestimmt, sondern aus Panelmodellen, die direkt aus den geometrischen Daten des Strukturmodells entnommen werden.

Im Anschluss der Berechnungsarbeit werden die deformierte Form und der Drehwinkel um die Längsachse des Rotorblattes als Einflussgrößen bezüglich der Drehmomentermittlung für die Antriebswelle beurteilt.

Modellbildung

Das Windturbinenrotorblatt, T100 aus [1], mit einem Durchmesser von $D = 100$ m mit folgenden Daten angenommen (Abb. 1):

Rotordurchmesser: 100 m

Durchmesser des Anschlussprofils: 2,5 m

Größte Blatattiefe: 5,0 m

Kleinste Blatattiefe: 0,8 m

Relative Dicke bei $r/R = 0,7$: 0,22

Aerodynamische Profile: Kreiszylinder, NACA 4424, NACA 4421, NACA 2410

Masse: 10000 kg (Abschätzung)

Leistung: 4 MW (Abschätzung)

Auslegungswindgeschwindigkeit: 15 m/s

Blattflächendichte = Fläche der Rotorblätter / Rotorkreisfläche: $146 \cdot 3 / 50^2 \cdot \pi = 5,5$ [%]

Streckung (Schlankeit) = (Rotorradius)² / Fläche eines Rotorblattes: $50^2 / 146 = 17$ [-]

Zuspitzung = Blatattiefe an der Spitze / Blatattiefe an der Wurzel: $0,8 / 5,0 = 0,16$ [-]

Lineare Verwindung des Rotorblattes: 15 °

Auslegungsschnellaufzahl λ : 9,4 und

Rotordrehzahl: 27 RPM (0,45 1/s)

Über die Untersuchung des Rotorblattes mit einer Auslegungsschnellaufzahl $\lambda = 9,4$ wurde in [1] berichtet.

FEM-Modell

Die Anzahl der Rotorblätter der Windkraftanlage beträgt 3. Das Schalenmodell stellt nur einen Rotor dar, dessen Hülle dann in einem 1/3-symmetrischen Aerodynamikmodell berechnet wird.

Die Struktur des Rotors besteht aus insgesamt 9677 Knoten und 31487 linearen Schalenelementen, welche die Haut, die Holme und die Rippen bilden.

Es werden weiterhin 20915 Balkenelemente als Stringer benutzt (Bild 2). Die Masse beträgt 10106 kg. Die Schwerpunktslage ist: $X = 20,43$ m, $Y = -0,63$ m, $Z = 0,18$ m.

Die Modelle wurden entsprechend dem SI-Einheitensystem erstellt.
Länge: [m]
Kraft: [N]

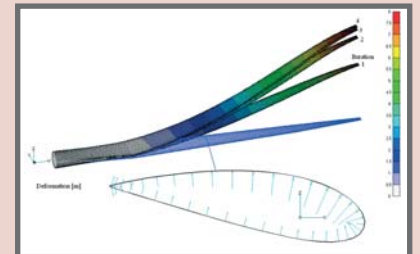


Bild 2: Deformationen als Funktion der Iteration, Lokale Druckverteilung

Die Modelle wurden mit dem Programm NASTRAN berechnet [2].

Als Randbedingung ist der Rotor an der Wurzel mit allen Freiheitsgraden gesperrt, TxyzRxyz (Bilder 1 und 2).

Als Lasten wurden Eigengewicht, Zentrifugalkraft und die Aerodynamik berücksichtigt. Das Eigengewicht, ca. 10000 kg, spielt bei der Torsionsuntersuchung eine untergeordnete Rolle. In der Vertikallage des Rotorblattes ist der Einfluss des Eigengewichtes quasi Null.

In der Horizontallage des Rotorblattes ist der Einfluss des Eigengewichtes vernachlässigbar. Die Zentrifugalkraft spielt mit ihrem aufrichtenden Einfluss bei $f = 0,45$ Hz nur eine untergeordnete Rolle.

Die aerodynamische Last wurde durch ein Panelverfahren [3] für eine resultierende Geschwindigkeit aus Anströmgeschwindigkeit, $v_w = 15$ m/s, und der lokalen Umfangsgeschwindigkeit des Rotorblattes, als eine Druckverteilung ermittelt (Bild 2).

Die Aerodynamik des Rotors T100 wurde durch folgende Profilverteilung festgelegt:

Profil	Radial Lage [m]
Kreiszylinder	3 - 4
NACA 4424	14
NACA 4421	40
NACA 2410	50

Die aerodynamischen Lasten wie Auftrieb, Widerstand und Nickmoment wurden durch die Integration der Druckverteilung berechnet.

➤ Korrektur

In der Ausgabe 3-2005 gab es bei dem Beitrag 'Aeroelastische Betrachtung des Rotors bezüglich der Torsion' leider Fehler bei den Zuordnungen der Bilder 6, 7, 8 und 9. Die Korrektur finden Sie auf: www.ibs-engine.de/fasi_index.html

Die Naben- und Blattspitzenverluste wurden nach [4] berechnet. Die Werte Auftrieb, Widerstand und Nickmoment wurden aus der Integration der lokalen Druckverteilung ermittelt.

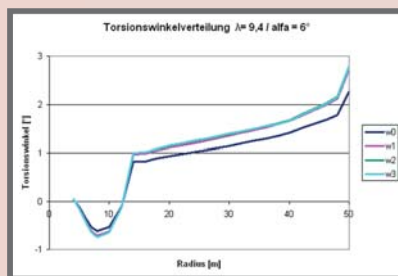


Bild 3: Torsionswinkelverteilungen als Funktion der Iteration

Ergebnisse

Bild 2 zeigt die Deformation des Rotorblattes T100 als Funktion der Iteration bei $\lambda = 9,4$. Die maximale Deformation ist 7,99 m. Bilder 3, 4 und 5 zeigen Torsionswinkelzuwächse als Funktion der Iteration für das Rotorblatt T100 bei $\lambda = 9,4$. Bild 3 zeigt die Torsionswinkelverteilungen als Funktion der Iteration.

Die Kurve w_0 zeigt die Verteilung der Torsionswinkel entlang des Rotorblattes nach der ersten aerodynamischen Lasteinleitung. In diesem neuen Zustand ändert sich auch die Aerodynamik. Nach der erneuten Aerodynamikberechnung werden die Iterationen 2, 3 und 4 vorgenommen, welche dann analog zu w_0 die Kurven w_1 , w_2 und w_3 ergeben.

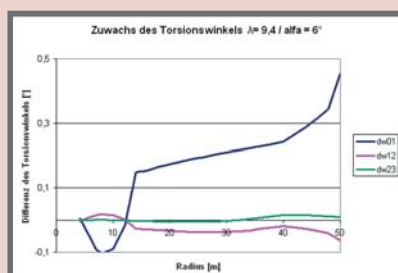


Bild 4: Zuwachs des Torsionswinkels als Funktion der Iteration

Die größte Verdrehung an der Blattspitze beträgt $2,78^\circ$. Bild 4 zeigt den Zuwachs des Torsionswinkels als Funktion der Iteration. Als Maß für die Iterations-

unterbrechung wurde die Differenz der Torsionswinkel zweier aufeinander folgender Iterationen zu Grunde gelegt.

Die Kurve dw_{01} zeigt die Verteilung der Differenzen der Kurven w_0 und w_1 aus dem Bild 3. In gleicher Weise wurden dw_{12} und dw_{23} errechnet.

Bild 5 zeigt den prozentualen Drehmomentzuwachs als Funktion der Iteration.

Bild 6 zeigt einen Leistungszuwachs von 3,07 MW auf 4,05 MW als Funktion der Iteration.

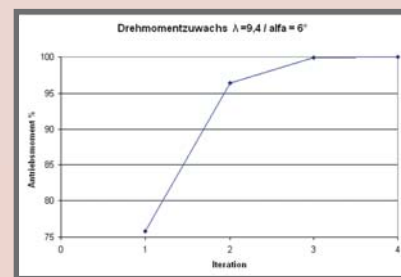


Bild 5: Drehmomentzuwachs als Funktion der Iteration

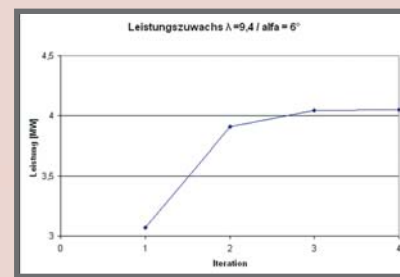


Bild 6: Leistungszuwachs als Funktion der Iteration

Zusammenfassung

Die Berücksichtigung der elastischen Torsion des Rotors T100 auf Grund der aerodynamischen Lasten und Zentrifugalkraft zeigt eine Beeinflussung der Drehmomentbilanz und folglich der Struktur.

In dieser Arbeit wurden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Ein stationärer Betriebszustand wurde angenommen.
- Die Bodengrenzschicht wurde nicht berücksichtigt.
- Die Einflüsse des Turmes wurden nicht berücksichtigt.
- Die Dreidimensionalität der Strömung wurde vernachlässigt.

Im Gegensatz zu [1] jedoch besteht das Modell aus Schalenelementen und die Aerodynamik wird mit einem Panelverfahren berechnet. Somit erreicht man eine genauere quantitative Aussage über die elastische Torsion des Rotors.

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen des Balkenmodells [1] und des Schalenmodells zeigt eine gute Übereinstimmung. ■■

■ Referenzen

- [1] Khadjavi A. F. Aeroelastische Betrachtung des Rotors bezüglich der Torsionseffekte, Interface Ausgabe 3 / 2005
- [2] NX NASTRAN www.ugsplm.de/produkte/nx/, Zugriff: 5. Juni 2005 FEMAP
- [3] Katz, J. Low-Speed Aerodynamics, Plotkin A., Cambridge University Press, ISBN 0-521-66552-3
- [4] Heier, Siegfried Windkraftanlagen, Teubner Verlag 2003, ISBN 3-519-26171-5

■ Autor:

Dipl.-Ing. Armin F. Khadjavi
IBS Engineering GmbH
Hanauer Str. 14 B
D- 80992 München
Telefon: 089 / 84057730
Telefax: 089 / 84057731
f.khadjavi@ibs-engine.de
www.ibs-engine.de