

## **Vereinfachte Lastannahmen fuer Selbstbau-Anlagen**

Vortragstext von Georg Böhmeke anlässlich der Selbstbauer-Tagung 25 / 26.3.2000

### **Warum vereinfachte Lastannahmen?**

**Ohne Berechnung ist verantwortungslos.**

**Genaue Berechnung ist zu teuer.**

Wie aufwendig eine Berechnung in kommerziellem Masstab ist, zeigen die folgenden Seiten.

### **1. Typische Entwicklungsschritte einer kommerziellen Anlage mittlerer Grösse**

1.1 Konzeptfestlegung, wie Blattzahl, Leistung, Durchmesser, Typenklasse

1.2 Grobentwurf nach Erfahrung und Faustformeln, Massenabschätzung

1.3 Betriebsfuehrungs- und Sicherheitskonzept inkl. Versagensanalysen

1.4 daraus die zu rechnenden Lastfälle inkl Versagenslastfälle

1.5 Berechnung der Lasten, und zwar nach GL die folgenden

N 1.0 Normalbetrieb ungestört, als Referenz

(N 1.1 Normale Böen)

(N 1.2 Schräganströmung)

(N 1.3 Netzausfall/Lastabwurf)

((N 1.4 Temperaturgrenzen))

(N 2.0 Start bei  $v_i$   $v_r$   $v_o$ )

N 2.1 Start und Bö

N 3.0 Stopp bei  $v_i$   $v_r$   $v_o$ , als Referenz

N 3.1 Stopp mit Bö

(N 4.0 Betriebsklar, Jahreswind)

N 4.1 Betriebsklar, Jahrebö

N 4.2 Schräganströmung

(E 1.0 Produktionsbetrieb bei  $v_i$  und  $v_o$ )

E 1.1 Extreme Bö mit Richtungsänderung (dimensionierender Lastfall, zahlreiche Einzellastfälle)

E 1.2 Extremer Gradient (bei Pendelnaben wichtig)

(E 1.3 Extremer Verbrauchereinfluss, nur bei Inselanlagen)

E 1.4 Vereisung bei Produktion (bei Gittertuermen wichtig)

(E 2.0 Parken bei 50-Jahreswind)

E 2.1 Parken bei 50-Jahres-Bö (oft dimensionierender Lastfall)

E 2.2 Vereisung und Schräganströmung

(S 1.0 Parken nach Störung bei  $v_i$  und  $v_o$ )

- S 1.1 Notaus
- S 1.2 Generatorkurzschluss (erfordert immer Rutschkupplungen)
- S 1.3 Betriebsfuehrung defekt (grösstmögliche "Sabotageakte" des eigenen Betriebsfuehrungsrechners anzusetzen, nicht nur einfaches Versagen)
- S 1.4 eines der zwei Sicherheitssysteme versagt (hier wegen unterschiedlicher Versagensarten diverse Lastfälle notwendig, wechselweise beide Systeme)
- (S 1.5 Erdbeben, Einfluss auf den Turm, Anlagen fuer Griechenland oder Japan, wird in Deutschland nicht gerechnet.)
- (S 2.0 Parken nach Störung)
- S 2.1 Parken nach Störung plus Jahresbö
  
- (M 1.0 Montage und Wartung )
- M 1.1 Jahresbö in diversen Zuständen der Montage
- M 2 Transport (Geno-Kugellager, Turmflansche)

In Klammern sind die Lastfälle, die normal nicht gerechnet werden, weil sie eindeutig von anderen ueberholt werden. Ggfs können weitere entfallen.

Die bisher erwähnten Lastfälle können mit relativ einfachen Programmen bearbeitet werden, wie STADS und STADYN (aerodyn GmbH), HAWEC (Germanischer Lloyd). Die Programme rechnen "steif", das heisst ohne Beruecksichtigung der Anlagendynamik. Dynamische Effekte werden durch die Sicherheitsfaktoren abgedeckt. Diese sind je nach Lastfall und Lastenart verschieden, siehe GL-Rili Seite 4-4-2.

Heutzutage rechnet man aber häufig auch statische Lastfälle mit dynamik-fähigen Programmen. Die erwähnten Lastenberechnungen ergeben Maximallast-Einhuellende zum Nachweis der Gestaltfestigkeit der Baugruppen. Es fehlt aber noch die mindestens genauso wichtige Betriebsfestigkeit. Deshalb geht es wie folgt weiter.

Hierzu braucht man ein Gesamtdynamik-fähiges Programm, was die Ausgabe der Schnittlasten erlaubt und ein turbulentes Windfeld simuliert. FLEX4, BLADED, GAROS, ADAMS und es gibt noch weitere.

#### Ermittlung der Betriebsfestigkeits-Lastkollektive

Modellierung eines Windfeldes mit dreidimensionaler Turbulenz entsprechend mathematischen Modellen.

Modellierung der Anlage mit allen relevanten Massen, Massenträgheiten, Steifigkeiten und Drehsteifigkeiten. Modellierung des Generatorsystemes. Ansatz eines Feder-Dämpfer-Systems fuer das Fundament.

Fuer bestimmte Komponenten werden an bestimmten Stellen sowohl Zeitreihen als auch Rainflow-Kollektive ermittelt. Die Rainflow-Methode ist ein mathematisches Modell um aus stochastischen Schwingungen Lastzyklen und Schwingweiten zu ermitteln.

Rechengänge fuer diverse Windgeschwindigkeiten im Betriebsbereich. Wichtung der Lastkollektive mit der Häufigkeit der jeweiligen Windgeschwindigkeiten. Ergebnis: Lastkollektive, gueltig fuer die gesamte Betriebszeit der Anlage. Ein Lastkollektiv ist der Zusammenhang zwischen Schwingweite und deren Häufigkeit.

Umrechnung der realen Lastkollektive zu schädigungsäquivalenten Rechteckkollektiven fuer die Wöhlerlinien-Steigungen diverser typischer Baugruppen.

Die Lastenberechnungen dauern bei geuebten Leuten etwa vier Mannwochen, die Ergebnisse fuellen zwei oder drei Aktenordner. Nun können die Festigkeitsnachweise beginnen.

1.6 Festigkeitsnachweise, hier nur kurz angeschnitten.

Blätter

Gestaltfestigkeit fuer die Maximallast-Einhuellende

Betriebsfestigkeit entsprechend Kollektiven

Aeroelastik (Flattern) bei Parken in Extremwind

Es dimensioniert manchmal die geforderte Durchbiegung des Blattes. Bei Neuauslegungen von Blättern werden stets Bauteilversuche gemacht, dh ein Blatt bis auf Maximallast belastet.

Nabe

FEM-Nachweis fuer Gestaltfestigkeit und Betriebsfestigkeit. Es dimensioniert stets die Betriebsfestigkeit. Das richtige Verarbeiten von Kollektiven (bei denen Bildung der Phasenzusammenhang verloren geht) erfordert besondere Kenntnisse und Massnahmen. Neuerdings wird häufig auch mit Zeitreihen-Lasten gerechnet und Spannungs-Kollektive gebildet.

Die eigentliche Kunst ist es, nachzuweisen, dass der verwendete Werkstoff unter den Gegebenheiten Wandstärke, Guetestufe, Material, Oberfläche, Rauhigkeit etc die errechneten Spannungswechsel aushält. Das geht sehr in Einzelheiten der Werkstoffkunde.

Welle

Im Flanschbereich wie Nabe, in Getriebe Nähe auch "von Hand".

Maschinenträger wie Nabe

Grosswälzlager (Blattlager, Azlager)

Flanschverbindungen nach VDI 2230. Laufbahnen auf Hertzsche Pressung, Grenzwerte nach Literatur und Versuchen. Betriebsfestigkeit der Schrauben.

Getriebe

Nachweis der Bauteile, die Rotorlasten fuehren, wie Nabe.

Die Verzahnung getrennt, da diese nur Drehmoment fuehrt.

Generator

Normalerweise unbelastet, deshalb erfolgen die Berechnungen getrennt beim Hersteller nach den Regeln des klassischen Elektromaschinenbaus. Ausnahme ist, wenn der Geno mit B5-Flansch angeflanscht ist und die Schwingungen der Anlage erfährt.

Pitchantriebe

Mit Zeitreihen aus der Dynamiksimulation werden eigene Rechenprogramme gefuettert.

Turm

In Deutschland nach DIBT-Richtlinie etwas getrennt von der uebrigen Maschine. Das ist nicht logisch, jedoch historisch zu erklären.

## Fundament

Durch dazu befugten Bauingenieur. Kritisch sind stets Metall/Beton-Uebergänge und da die Betriebsfestigkeit. Es gibt kaum ein normales Bauwerk (Haus etc), was so hoch dynamisch beansprucht wird wie ein Windmuehlen-Fundament.

Die Festigkeitsnachweise fuellen etwa 5-7 Aktenordner

1.7 Erstellen der Zeichnungen, Spezifikationen, Arbeits- und Pruefanweisungen  
etwa 10 Aktenordner, 6 Mannmonate

1.8 Verhandlungen und Klärungen mit den Lieferanten  
etwa 3-4 Mannmonate

1.9 Bestellungen der Baugruppen

1.10 Innenmontage und Pruefläufe

1.11 Aussenmontage

1.12 Inbetriebnahme

1.13 Konkurs des Auftraggebers und Einstellung des Projektes

Dies nur als Hintergrundwissen. Klar, dass ein Selbstbau einer grösseren Anlage nicht möglich ist, denn niemand kann den Entwicklungsaufwand bezahlen fuer ein oder zwei Anlagen. Auch aus den Werkstatt- Möglichkeiten begrenzt sich der Selbstbau auf ca. 10 m Durchmesser und 10 kW Leistung.

Vor dem eigentlichen Thema, den vereinfachten Lastannahmen, aber noch kurz eine Stichwortliste. Die Lastannahmen sind nämlich nur ein kleiner Teil der Anlagenentwicklung.

## **2. Woran kann eine Windkraftanlage sterben?**

2.1 Die Windgeschwindigkeiten oder Windverhältnisse am Standort wurden unterschätzt. Beispiel: Ein Selbstbauer in Sueddeutschland errechnete die maximalen Lasten fuer 25 m/sec, ein stark verwirbelter Sturm brachte erheblich mehr, die Anlage nahm Schaden (1992).

2.2 Das Sicherheitskonzept ist nicht lueckenlos. Beispiel: Ein Blitzschlag ins Blatt fuehrte zum gleichzeitigen Defekt aller drei elektrischen Blattverstellungen. Die Bremse war nur fuer das Versagen einer Blattverstellung ausgelegt. Die Anlage stuerzte ab (1999).

2.3 Es wurden Lastfälle vergessen, die real auftreten können. Beispiel: Ein Rotorblatt schlug beim Umlauf gegen den Turm, weil es sich soweit durchbog. Das kam durch eine Schräganströmung von 90 Grad aufgrund einer schnell durchziehenden Sturmfront. Die Anlage schaltete aufgrund ungluecklich programmierter Betriebsfuehrung weder ab noch folgte der schnellen Winddrehung. Der Blattsatz musste verschrottet werden, zum Glueck keine weiteren Schäden. Der GL änderte seine Vorschriften daraufhin (1993/94).

2.4 Unvorhergesehene Sonderlasten. Beispiel 1: Der Azimut-Lagerzapfen einer 500 kW Windkraftanlage war in einem Gleitlager gelagert. Dieses zeigte Verschleiss. Der Lagerzapfen schlug daher im Betrieb hin und her. Dadurch erhöhte Belastungen und Bruch mehrerer Achszapfen, die ohnehin knapp dimensioniert waren (1999). Absturz mehrerer Anlagen.

Beispiel 2 Wasseraufnahme eines Blattes aufgrund verstopfter Entwässerungsbohrung, Unwucht, Folgeschäden weil keine automatische Abschaltung erfolgte (1992)

2.5 Konstruktionsfehler. Beispiel: Ein Selbstbauer schraubte ein Holzblatt an eine Metallnabe. Das Holz schrumpfte, die Schraube lockerte sich, schlug aus (1983).

2.6 Bauteilfehler. Beispiel: Fehlerhafte Härtung von Schraubenbolzen (1996), Lunker im Guss heimlich zugespachtelt (1998)

2.7 Sonstiges unvorhergesehenes. Beispiel: Die Ueberschwemmung eines nahen Flusses verursachte die Unterspuelung eines Fundamentes, die Anlage neigte sich.

Was lernen wir daraus? Korrekte Lastenberechnung und Festigkeitsnachweise reichen nicht aus, alles muss richtig sein.

***Jede Kette ist so stark wie ihr schwächstes Glied.***

### **3. Vereinfachte Lastannahmen**

In der GL-Richtlinie findet sich ein Kapitel ueber vereinfachte Lastannahmen. Es gilt nur fuer Anlagen mit mindestens 3 starr befestigten Blättern. Im Falle von Pitchanlagen muss man sich selbst ein paar Lastfälle zufuegen.

Die vereinfachte Rechenweise ermöglicht, auf Lasten-Rechenprogramme zu verzichten und erlaubt prinzipiell, die Lastannahmen einer Kleinanlage mit EXCEL zu machen. Sie verringert eigentlich nicht die Zahl der zu rechnenden Lastfälle. Es gibt nun Sinn, sich auf einige dimensionierende Lastfälle zu beschränken. Dazu muss man wissen, welche erfahrungsgemäss dimensionieren.

#### **3.1 Rechengang anhand eines Beispieles fuer Betrieb bei Nennwind**

Die Anlage hat ein Getriebe, einen Dreiblatt-Rotor mit fest montierten Blättern.

Die Bremse ist mit der Rotornabe integriert, sodass Getriebebruch die Bremse nicht unwirksam macht. Bremsmoment sei 3 faches Nennmoment (habe ich jetzt geraten, keine Garantie ob es reicht).

Das System zur Leistungsbegrenzung ist eine Luftwirbelbremse mit Fliehgewichten und Schaufeln, ähnlich wie beim Winco-Wincharger, jedoch auf der B-Seite des Generators. Diese verschleissfreie Bremse erzeugt eine zusätzliche Belastung und hält die Drehzahl in Grenzen. Wir nehmen an, es sei getrennt ermittelt worden, dass die Drehzahl bei 14 m/sec 180/min sei.

Das zweite Sicherheitssystem ist das Schwenken in Helikopterstellung (das Getriebe hat eine Gleitringdichtung auf der schnellen Welle). Die Anlage bremst bevor sie in Helikopterstellung geht. Die Windnachfuehrung ist mit Windfahne.

Die Betriebsfuehrung ist eine hartverdrahtete Schaltung. Die Signale sind weitestgehend drahtbruchsicher ausgefuehrt, sicherheitsrelevante Beschaltungen wie Ueberdrehzahlwächter sind doppelt ausgefuehrt und gegenseitig verriegelt.

Alarmgrenze fuer die Drehzahl ist 200/min, was zum Auslösen der Bremse fuehrt. Zeitverzögert nach der typischen Bremszeit von ca. 3 sec (geraten) wird die Anlage mit 15 Grad/sec weggeschwenkt bis sie waagrecht ist.

Die Numerierung entspricht hier innerhalb des Beispiels der des GL.

Die Windmuehle hat 3 Blätter  $Z=3$   
 Rotordurchmesser  $D = 7 \text{ m}$   
 Rotorfläche  $A = \pi/4 * D^2 = 38,5 \text{ m}^2$   
 Nennleistung sei  $P_n = 5,5 \text{ kW}$ , also recht wenig, nämlich nur  
 spezifisch  $143 \text{ W /m}^2$   
 Diese niedrige Leistungsdichte erlaubt keinen Stallbetrieb, ist aber in Schwachwindbereichen sinnvoll.

Getriebewirkungsgrad bei  
 Nennleistung ist etwa  $\eta_{\text{getr}} = 0,92$  und  
 Genowirkungsgrad  $\eta_{\text{gen}} = 0,85$   
 Der cp-Wert des Rotors sei  
 getrennt errechnet worden zu  $c_{\text{pr}} = 0,40$

Damit wird die Nennwindgeschwindigkeit gemäss Formel

$$P_{\text{el}} = \eta_{\text{getr}} * \eta_{\text{gen}} * \rho/2 * v_r^3 * A * c_{\text{pr}}$$

zu  $v_r = 9,1 \text{ m/sec}$

Nenn-Umfangs-  
 geschwindigkeit sei  $u = 50 \text{ m/sec}$  aus Lärmgruenden.  
 Nenn-Schnellaufzahl ist dann  $\lambda_r = u/v = 50/9,1 = 5,5$   
 Die Schnellaufzahl von 5,5 passt in etwa zur Blattzahl drei, ist aber bereits anspruchsvoll, verlangt präzise Rotorblätter vorzugsweise aus GFK.  
 Nenn Drehzahl ist  $n_r = u / (\pi * D) = 50 / (3,14 * 7) = 2,27/\text{sec} = 136 \text{ /min}$

Der Windschub auf den gesamten Rotor ist bei Nennbetrieb (Nennwind, Nennleistung) etwa

$$F_{\text{xn}} = 8/9 * A * \rho/2 * v_r^2$$

$$F_{\text{xn}} = 8/9 * 38,5 \text{ m}^2 * 1,25 \text{ kg/m}^3 * 9,1^2 \text{ m}^2/\text{sec}^2 = 1771 \text{ N}$$

Zusätzlich zum Windschub entstehen Nick- und Giermomente. Die werden durch einen aussermittigen Kraftangriffspunkt beruecksichtigt.

$$e_w = (w * R^2) / (2 * v_r)$$

w ist der extreme Windgradient nämlich 0,25 m/sec / m  
 und hier wird

$$e_w = (0,25 * 3,5^2) / (2 * 9,1) = 0,17 \text{ m}$$

Es entstehen also Nick- und Giermomente der Grösse

$$M_{\text{YB}} = M_{\text{ZB}} = 1771 \text{ N} * 0,17 \text{ m} = 300 \text{ Nm}$$

Damit kann man erstmal noch wenig anfangen, aber ein Gefuehl fuer die Grössenordnung bekommen. Gemeint ist, dass diese im Betrieb stets wirken.

Das Nenn-Drehmoment können wir ganz elementar aus der Leistung und Drehzahl bestimmen.

$$M_{XN} = 5500 \text{ W} / (2 * \pi * n_r * \eta_{\text{getr}} * \eta_{\text{gen}}) = 493 \text{ Nm}$$

Unser Gesamtwirkungsgrad ist etwas besser als der default-Wert beim GL.

Das Schlagbiegemoment an der Blattwurzel errechnet sich unter der Annahme, dass sich der zuvor errechnete Windschub auf alle drei Blätter gleichmässig verteilt und die Streckenlast dreiecksförmig (grosser Wert aussen!) ist. Das ist konservativ und gilt nur fuer Betrieb und Böen. Bei Stillstandslastfällen muss anders gerechnet werden, da man sonst zu stark ueberhöhte Lasten bekommt.

Die gesamte Schubkraft  $F_{XN} = 1771 \text{ N}$  teilt sich also auf drei Blätter auf zu je  
 $F_{XB} = 1771 \text{ N} / 3 = 590 \text{ N}$

Der Hebelarm der Kraft ist  $2/3 * \text{Blattradius}$ , sodass das Schlagbiegemoment  
 $M_{YB} = 2/3 * 590 \text{ N} * 3,5\text{m} = 1377 \text{ Nm}$  ist.

Das Biegemoment entspricht einem 80 kg schweren Mann etwa in Blattmitte auf dem 3,5 m langen Blatt. Das Blatt muss schon allerhand aushalten.

In Umfangsrichtung ist das Schwenkmoment im allgemeinen deutlich kleiner. Drei Blätter bilden hier das Drehmoment. Vereinfacht ergibt sich das Schwenk-Biegemoment der Blattwurzel zu  $M_{XN}/3$ , also  
 $M_{XB} = 493 \text{ Nm} / 3 = 164 \text{ Nm}$ .

Diese bisher errechneten Werte des Nennbetriebes können noch nicht zu Festigkeitsnachweisen benutzt werden.

Es fehlt deren Schwankungsanteil fuer die Betriebsfestigkeit und fuer Extremlasten reicht der Betriebszustand nicht. Der Lastfall dient aber als Referenzlastfall zum Errechnen eines vereinfachten Betriebsfestigkeits-Kollektivs, siehe später.

Die vereinfachte Rechenweise entbindet nicht von der Pflicht, alle real möglichen Lastfälle zu untersuchen. Man muss sich daher selbst eine Auswahl der dimensionierenden Lastfälle machen, um nicht unnötig viele zu rechnen. Wir nehmen daher weitere Lastfälle mit auf und rechnen in selber Weise. Und zwar die folgenden, nach gesundem Menschenverstand ausgewählt.

### 3.2 Normale Betriebsbö bei vo N 1.1

Eine Bö von 9m/sec zusätzlich trifft die Anlage, kurz bevor sie bei 14 m/sec abschalten wollte. Die Anlage geht in Ueberdrehzahl, die Ueberwachung greift und die Anlage bremst. Wir rechnen also die aerodynamischen Lasten wie zuvor beschrieben aber mit Wind  $v = 14 + 9 = 23 \text{ m/sec}$ . Auf die aerodynamischen Lasten wenden wir die partielle Sicherheit 1,2 an.

Das Schwenkmoment der Blätter sowie das Torsionsmoment der Welle ergibt sich aus dem Bremsmoment, auf die Bremslasten kommt der Faktor 1,35 (Bremsen ist eine "Funktionskraft"). Das Schwenkbiegemoment der Blätter aus Eigengewicht wird zum Schwenkbiegemoment aus Bremsung zugezählt und gemeinsam mit ueberhöht.. Die der Drehzahl entsprechende Fliehkraft ist eine Massenkraft und wird bei N-Lastfällen auch mit 1,35 ueberhöht. Siehe Tabelle Seite 4-4-2

Zahlenwerte hierzu:

Windschub auf Rotor  $F_{XN} = 8/9 * A * \rho / 2 * v^2$   
 $F_{XN} = 8/9 * 38,5\text{m}^2 * 1,25/2 \text{ kg/m}^3 * 23^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 11'314 \text{ N}$   
Inklusive Sicherheit  $F_{XNS} = 1,2 * 11314 \text{ N} = 13'577 \text{ N}$   
(Das Gewicht eines vollen Kleinwagens!)

Die Biegemomente auf Rotorlager und Maschinenträger kann man abschätzen unter Ansatz des zuvor errechneten  $e_w = 0,17\text{m}$ .

Windschub auf ein Blatt ohne Sicherheitsfaktor

$$F_{XB} = F_{XN} / 3 = 3771 \text{ N}$$

Mit Sicherheit

$$F_{XBS} = 3771 \text{ N} * 1,2 = 4525 \text{ N}$$

Schlagbiegemoment an Blattwurzel

$$M_{YB} = 2/3 * F_{XB} * R$$

$$M_{YB} = 2/3 * 3771 \text{ N} * 3,5\text{m} = 8799 \text{ Nm}$$

Inklusive Sicherheit

$$M_{YBS} = 1,2 * M_{YB} = 10559 \text{ Nm}$$

Das ist derart viel, dass man ernsthaft ueberlegen muss, solche Lastfälle detaillierter zu rechnen um keine grobe Überdimensionierung zu bekommen.

Das Nenndrehmoment war  $M_{XN} = 493 \text{ Nm}$ . Das Bremsmoment sei 3 fach, also

$$M_{XNBBr} = 493 \text{ Nm} * 3 = 1479 \text{ Nm}$$

Auf ein Blatt entfällt ein Drittel, also wieder

$$M_{XBBBr} = 493 \text{ Nm}$$

Ein Blatt möge etwa 25 kg wiegen und der Schwerpunkt sei bei  $0,3 * \text{Radius}$ , also bei 1m (beides nur grob geraten!). Aus dem Eigengewicht ergibt sich ein Schwenkbiegemoment von

$$M_{XBGew} = 25 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/sec}^2 * 1\text{m} = 245 \text{ Nm}$$

In waagerechter Position ueberlagern sich die Schwenkbiegungen zu

$$M_{XBGes} = 245 \text{ Nm} + 493 \text{ Nm} = 738 \text{ Nm}$$

Mit Sicherheitsfaktor drauf

$$M_{XBGesS} = 738 \text{ Nm} * 1,35 = 996 \text{ Nm}$$

Fliehkraft auf ein Blatt bei  $n = 220 / \text{min}$  (etwas mehr als der Abschaltgrenze entspricht)

$$\omega = 2 * \pi * n / 60 = 23 / \text{s}$$

$$F_{ZBn} = m * r * \omega^2$$

$$F_{ZBn} = 25 \text{ kg} * 1\text{m} * 23^2 / \text{s}^2 = 13'225 \text{ N}$$

mit Sicherheitsfaktor

$$F_{ZBnS} = 13225 \text{ N} * 1,35 = 17'854 \text{ N}$$

Damit haben wir schon mal die Lasten am Blattanschluss, den Windschub auf Rotorlager und Maschinenträger sowie die Nick- und Giermomente des gesamten Rotors fuer diesen Fall.

### 3.3 Extreme Betriebsbö mit extremer Richtungsänderung E1.1

Nach GL müssen wir bei 15 m/sec plus Bö mit  $\pm 35$  Grad rechnen. Das ist durchaus realistisch, da die Windfahne eine unpräzise und stark pendelnde Windnachführung ist und die natürlichen Richtungsänderungen sich dazu addieren können. Vereinfacht setzen wir an, dass eine  $v=23$  m/sec Bö den Rotor aus 35 Grad trifft und der Rotor so schnell nicht nachfährt. Anschliessend versuchen wir die Lasten aus Nachführung zu ermitteln.

*Dieser Lastfall ist bei grösseren Anlagen der weitgehend dimensionierende Extremlastfall fuer Blattanschluss und Rotorbereich. Wir müssen uns die Strömungsverhältnisse einmal in Ruhe ansehen, um zu verstehen warum.*

Windschub auf den Turmkopf nach GL Seite A4.2-3

$$F_{XN} = 0,707 * A * 8/9 * \rho/2 * v^2$$

$$F_{XN} = 0,707 * 38,5 \text{ m}^2 * 8/9 * 1,25/2 * 23^2 = 8001 \text{ N}, \text{ nicht viel.}$$

Aber das Nick- und Giermoment auf den Rotor, genau das wichtige?

Das entzieht sich leider den einfachen Formeln. Wir können in erster Näherung ansetzen, dass die Exzentrizität des Kraftangriffes  $e_w$  nicht mehr  $e_w = 0,17\text{m}$  sondern  $e_w = R/4$  ist, (private Faustformel, nicht GL).

Damit wird das Nickmoment auf Rotorwelle, Lagerung und Maschinenträger

$$M_{YN} = F_{XN} * 3,5\text{m} / 4 = 7001 \text{ Nm}$$

mit Sicherheitsfaktor 1,5 fuer aerodynamische Kräfte ergibt sich

$$M_{YN} = \text{ca. } 10502 \text{ Nm}, \text{ aber ein sehr grob gerechneter Wert.}$$

Nun sollen Kreiselkräfte aus Windnachführung abgeschätzt werden. Das Drehmoment um die Turmachse, was die Windfahne hervorruft, ist nach GL

$$M_{ZT} = 2 * p_N * A_F * e_F$$

dabei ist  $A_F$  die Windfahnenfläche, geschätzt zu 6 m<sup>2</sup>

und  $e_F$  der Abstand der Fläche zu Turmmitte, geraten zu 10m

$$M_{ZT} = 2 * 8/9 * 1,25/2 \text{ kg/m}^3 * 9,1^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 * 6\text{m}^2 * 10\text{m} = 5'520 \text{ Nm}$$

Diese Drehmoment entwickelt also die Windfahne bei einsetzender Schräganströmung etwa etwa und führt den Rotor nach. Die Formel halte ich fuer ziemlich ungenau und empfehle, die Windfahnen anders zu rechnen. Nämlich so: Hinter dem Rotor sei  $v/3$ , diese trifft auf die Windfahne. Die Windfahne als Tragfluegel-Stueck rechnen, Auftrieb und Widerstand bestimmen. Aus den Kräften das Nachfuermoment. Wegen Randwirbelbildung vom Auftrieb etwa 20% abziehen oder den Randwirbel nach klassischen Formeln mitnehmen.

Aber nehmen wir grössenordnungsmässig  $M_{ZT} = 5000 \text{ Nm}$  an.

Das Moment verursacht eine Beschleunigung der Anlage um die Turmachse. Deren Massenträgheit komplett um die Turmachse sei

$$I_M = 2500 \text{ kg m}^2 \text{ (hier grob geraten, bitte im Ernstfall korrekt errechnen)}$$

Damit wird die Winkelbeschleunigung um die Turmachse zu

$$d\Omega/dt = M_{ZT} / I_M = 5000 \text{ Nm} / 2500 \text{ kgm}^2 = 2 / \text{sec}^2$$

Schnittlasten an der Blattwurzel aus Beschleunigung um die Turmachse Seite A 4.2-4, Punkt 2.4

$$F_{XB} = -m_B * r_S * d\Omega/dt$$

$$F_{ZB} = -m_B * e_0 * d\Omega/dt$$

$$M_{YB} = -I_B * d\Omega/dt$$

$m_B$  = Blattmasse, hier geraten zu 25 kg

$I_B$  = Massenträgheitsmoment eines Blattes um die Rotorachse, geraten zu 45 kgm<sup>2</sup>

$r_S$  = Schwerpunktabstand des Blattes von der Rotorachse, geraten zu 1m

$e_0$  = Schwerpunktabstand des Rotors von der Turmachse, geraten zu 0,5 m

$$F_{XB} = 25 \text{ kg} * 1 \text{ m} * 2/\text{sec}^2 = 50 \text{ N}$$

$$F_{ZB} = 25 \text{ kg} * 0,5 \text{ m} * 2 / \text{sec}^2 = 25 \text{ N}$$

$$M_{YB} = 45 \text{ kgm}^2 * 2/\text{sec}^2 = 90 \text{ Nm}$$

Die Werte sind so klein, dass wir sie vergessen können, sie gehen völlig unter in anderen Lasten.

Die Lasten aus konstanter Gierbewegung (klassische Kreiselkräfte) sind entsprechend Formel 3.5

$$F_{XB} = -m_B * (e_0 * \Omega^2 + 2 * r_S * \omega * \Omega)$$

$$F_{YB} = -m_B * \Omega^2 * r_S / 2$$

$$F_{ZB} = m_B * \Omega^2 * r_S / 2$$

$$M_{XB} = I_B * \Omega^2 / 2$$

$$M_{YB} = -m_B * r_S * e_0 * \Omega^2 - 2 * I_B * \omega * \Omega$$

Das kleine  $\omega$  ist die Winkelgeschwindigkeit des Rotors, das grosse  $\Omega$  ist die der Drehung der Anlage um die Turmachse, was natürlich um Grössenordnungen kleiner ist.

Unterstellen wir eine konstante Nachführung von 5 Grad/sec entsprechend  $\Omega = 0,0873 / \text{sec}$  bei Ueberdrehzahl 220/min entsprechend  $\omega = 23 / \text{sec}$ , so wird beispielsweise das Blattwurzel-Schlagbiegemoment daraus zu

$$M_{YB} = 25 \text{ kg} * 1 \text{ m} * 0,5 \text{ m} * 0,0873^2 / \text{sec}^2 - 2 * 45 \text{ kg m}^2 * 23 * 0,0873$$

$$= -181 \text{ Nm}$$

Das sind recht kleine Lasten im Vergleich zu den anderen Extremlasten. Das einzige, was aus diesem Lastfall ggfs dimensioniert ist das Nickmoment auf den Rotor, aber das war nur sehr grob errechnet zu ca. 10 kNm. Lasten aus Kreiselkräften sind relevant wenn das Wegschwenken in Sturmstellung schnell geschieht.

### 3.4 Fuenfzig-Jahres-Bö E 2.1

Die Anlage steht in Helikopterstellung, die 50 Jahresbö trifft sie aus +/-15Grad Schräganströmung, sowohl oben/unten als rechts/links. Wie gross ist die 50 Jahres-Bö ?

Es gibt diverse Klassen, nach der man seine Anlage zertifizieren kann. Normalerweise werden sie fuer das Vertriebsgebiet definiert und der Maschinenkopf danach ausgelegt. Der Turm wird je nach Standort gerechnet, weil die Materialeinsparung durch Optimierung den Rechenaufwand lohnt. Das Fundament muss wegen der Bodenbeschaffenheit ohnehin individuell sein.

Prinzipiell kann man sich eine eigene Klasse selbst ausdenken. Die IEC-Typenklassen beziehen sich auf Nabenhöhe. In Finnland an der Kueste wird man nach Klasse IEC II dimensionieren, im

Binnenland nach IEC III, tief im Wald nach IEC IV. Die zugehörigen Windgeschwindigkeiten sind auf Seite 4-2-2. Man darf 7% abziehen (alles etwas buerokratisch). Jedenfalls nehmen wir IEC III an und finden

50Jahres-Wind	$v_{Em} = 34,9$ m/sec
50Jahres-Bö	$v_E = 48,8$ m/sec
Jahreswind	$v_{Jm} = 27,9$ m/sec
Jahresbö	$v_J = 39,1$ m/sec

(Bei mir ist Index m das was beim GL der Strich ueber dem Buchstaben ist.)

Nun trifft die Bö den Rotor am ungluecklichsten derart, dass ein Rotorblatt gerade waagrecht rechtwinklig zumWind steht und aus 15Grad von oben angeströmt wird. Die relevanten Bereiche des Blattes sind etwa im ca-max-Bereich.

Dasselbe passiert, wenn wir eine Pitchanlage haben, und der Wind trifft 15 grad seitlich auf das 90Grad rueckgepitchte Blatt.

Merkregel deshalb:

***Rueckpitchen, seitlich wegschwenken oder nach oben wegschwenken verringern nicht die Maximallasten am Blattanschluss. Ein Blatt muss stets mit ca-max der äusseren Blattbereiche nachgewiesen werden.***

Die vereinfachten Formeln decken diesen Lastfall nicht ab und wir muessen selbst weiterrechnen. Das kann man mit einem EXCEL machen, in dem man die Blattverwindung und Blattiefe eingibt, z.B. in 10 Radius-Abschnitten. Dann braucht man fuer jeden Profilschnitt die ca/cw-Polare, die man der herrschenden Re-Zahl etwas anpassen muss. Entsprechend den Anströmwinkeln entwickelt jedes Tragfluegelstueck Kräfte gemäss

$$F_a = c_a * \rho / 2 * v^2 * A$$

$$F_w = c_w * \rho / 2 * v^2 * A$$

wobei A die Fläche des Fluegelstuecks ist, aber nicht die projizierte vom Wind gesehene Fläche sondern Fluegeltiefe mal Radiusabschnittslänge!

Die Kräfte bilden mit ihren Hebelarmen Biegemomente an der Blattwurzel, dieses summiert ist das Schnittmoment an der Blattwurzel, was man in Schwenk- und Schlagrichtung ermittelt. Leider habe ich jetzt keine Zeit, ein solches EXCEL zu machen, es setzt voraus, dass man bereits einen Rotor ausgelegt hat.

Die anzusetzende Geschwindigkeit v ist die Original-50-Jahresbö ohne irgendwelche Abminderungen, denn in Stillstandslastfällen erfolgt kein Energieentzug aus dem Wind. Betriebslastfälle können wir mit einem EXCEL der erwähnten Art nicht rechnen, denn dort erfolgt Energieentzug und man rechnet als effektive Geschwindigkeit das arithmetische Mittel aus vor und hinter dem Rotor. Das kann man zwar theoretisch mit EXCEL machen, setzt aber automatische Iteration voraus und ist nicht zu empfehlen. Stattdessen haben wir das schöne kleine Programm PROFILE, was als Shareware ueberall rumläuft.

Man wird feststellen, dass das Blattwurzel-Biegemoment etwas grösser ist als wenn man den Rotor frontal imWind stehen lässt. Warum dann ueberhaupt wegschwenken oder rueckpitchen? Antwort: Fuer Turm und Fundamente. Es ist immer nur ein unguenstig stehendes Blatt, was die hohe Extremlast erfährt, der Windschub auf den Turm ist durch Sturmstellungen wirkungsvoll verringert.

Der Windschub auf den Turm in der Helikopter-Parkstellung kann wie folgt errechnet werden.

Man nehme die vom Wind gesehene Fläche des Rotors wie eine einfache Stange an und rechne mit  $c_w = 1,3$ . Dazu alle uebrigen Bauteile der Anlage mit ihren Flächen und  $c_w$ -Werten. Hinweise fuer  $c_w$ -Werte von Gehäusen oder Stangen sind im DUBBEL, sowie in der DIN 4131 und 4133 (Antennentragwerke und Schornsteine).

Bei allen E-Lastfällen kommt auf die Aerodynamik Faktor 1,5 als partielle Sicherheit drauf, Massenlasten werden mit 1,35 ueberhöht und Bremskräfte mit 1,2 .

Sonderlastfälle haben generell  $S=1$

### 3.5 Vereisung E 2.2

Diesen Lastfall muss man in Finnland ernst nehmen, wenn die Anlage in einem vereisungsgefährdeten Gebiet steht. Hierfuer gibt es keine vereinfachten Annahmen, man muss mit viel Fleiss die diversen Eismassen zusammenzählen und daraus die Massenlasten errechnen, sowie die aerodynamischen Lasten zurechnen.

Und zwar nimmt man an, dass auf allen Teilen der Anlage eine 30mm starke Eisschicht rundum ist, deren Dichte ist  $700 \text{ kg/m}^3$ . Das ist schweres Klareis.

Auf die vereiste stillstehende Anlage wirkt der 50-Jahreswind, hier z.B.  $34,9 \text{ m/sec}$ . Gittermasten haben hier prozentual mehr Eislasten als abgespannte Rohrmasten. Die Dicke des Eises muss man bei der Angriffsfläche des Windes beruecksichtigen.

Der Lastfall " zwei Blätter vereist, eines eisfrei" in Drehung kann deshalb vernachlässigt werden, weil wir eine Schwingungsueberwachung haben, die die Anlage bei Unwucht abschaltet.

*Das ist unbedingt notwendig und im uebrigen auch vorgeschrieben !*

### 3.6 Generatorkurzschluss S 1.2

Wenn der Generator eine klassische Synchronmaschine ist, kann er bei 2poligem Klemmenkurzschluss bis zum 8 fachen Nennmoment erzeugen. Dieses Moment ist aber nur ein kurzer harter Schlag auf den Antriebstrang, anschliessend bleibt etwa die Hälfte des Nennmomentes. Da wir den Vorgang nicht dynamisch rechnen können, bleibt nichts anderes uebrig als entweder eine Rutschkupplung oder Brechbolzenkupplung einzufuegen. Der Lastfall ist sehr unwahrscheinlich, und ich denke, man kann ihn getrost weglassen.

Was jedoch beruecksichtigt werden muss, ist *Getriebeschaden*.

Man denke sich einen abgebrochenen Zahn, der den Antriebstrang schlagartig blockiert. In diesem Fall darf der Rotor nicht vom Turm fallen, weil sich zum Beispiel die Nabe von der Welle löst. Wenn wir z.B. die Passfederverbindung zwischen Welle und Rotornabe knapp auslegen, eben um in einem solchen Fall die Rotorblätter zu retten, dann muss der Rotor anschliessend immer noch formschlussig drauf sitzen. Die Drehzahlerfassung muss rotorseitig sein!

Also rechnen wir das Abscheren der Passfeder oder des Scherbolzens um auf eine maximale Schwenkbiegung der Rotorblätter. Zahlenwerte kann ich schlecht geben, sonst muesste man eine

Anlage vorher konstruieren. Mit etwas Glueck findet sich eine Stelle im Getriebe, die im Ernstfall versagt bei einem Moment etwa entsprechend Bremsmoment. Dann dimensioniert der Fall nicht. Beim Direktantrieb ist der entsprechende Lastfall eine Luftspaltkollision. Enercon hat deshalb den Stator auf Notgleitlagern gelagert und mit Scherbolzen befestigt. Die Kabel werden mit Steckern rausgezogen.

### 3.7 Sicherheitssystem-Fehler S 1.4

Zu kombinieren mit vo, hier 14 m/sec.

Bei Versagen der Bremse wird die Drehzahl zunächst durch die Fliehkraft-Luftbremse in Grenzen gehalten, dann die Anlage hochgeschwenkt. Zu rechnen wären die stationäre Ueberdrehzahl sowie die Kreiselkräfte, die beim Wegschwenken entstehen. Hinweise fuer die Kreiselkräfte hatten wir bereits beim seitlichen Wegschwenken.

Versagen der Luftbremse fuehrt aufgrund Ueberdrehzahl zum Auslösen der Bremse. Aus diesem Lastfall entstehen keine dimensionierenden Lasten.

### 3.8 Jahresbö in gestörtem Zustand S 2.1

Versagen der Hochschwenk-Vorrichtung fuehrt zu Stillstand mit dem Rotor frontal im Wind. Der Windschub ist mit Jahresbö zu rechnen. Kann ggfs fuer den Turm dimensionieren. Man kann diesen Fall relativ leicht rechnen. Als wirksame Fläche ist der gebremste Rotor wirksam, also nicht etwa 8/9 der gesamten Fläche sondern wirklich nur die vom Wind gesehene. Als cw-Wert kann man  $c_w = 1,3$  (ohne Sicherheiten) bis  $1,5$  (konservativ) ansetzen. Die partiellen Sicherheiten sind bei S-Lastfällen alle gleich  $1,0$ .

### 3.9 Betriebsfestigkeits-Ersatzkollektive

Gemäss A4.2-5 beim GL, die Vereinfachung des ohnehin schon vereinfachten Kollektives des Kapitel 4 G 2. Das schädigungsäquivalente Einstufenkollektiv darf mit einer Schwankungsbreite gleich der mittleren aerodynamischen Last im gesamten Betriebsbereich angesetzt werden. Lastspielzahl ist 75 % der realen Lastspielzahl. Zum dritten Male vereinfacht nehmen wir die Lasten bei Nennbetrieb.

Das Beispiel mit Zahlenwerten erfolgt fuer den Blattanschluss. Wir hatten errechnet, dass die mittleren aerodynamischen Lasten am Blattanschluss

$M_{YB} = 1377$  Nm Schlagmoment und

$M_{XB} = 164$  Nm Schwenkmoment sind.

Das Pitchmoment  $M_{ZB}$  vernachlässigen wir, es ist nicht lastenrelevant.

Querkräfte sind bei langen duennen Teilen zumeist zu vernachlässigen gegenueber der Wirkung der Biegemomente. Hier sind keine partiellen Sicherheiten einzurechnen, sondern die Werte sind pur zu nehmen.

Die Lastspielzahl ?

Hierzu brauchen wir ein kleines EXCEL mit der Wind/Häufigkeitsverteilung und den zugehörigen Drehzahlen. Das ist schnell gemacht, als Ergebnis kam  $5E8$  Umdrehungen raus in der Lebenszeit 20

Jahre, dabei hatte ich  $v_m=6$  m/sec Jahresmittel angesetzt. Für die Blattwurzel ist der Lastwechsel eine Umdrehung (für die Welle und Lagerung das dreifache!). Wenn wir eine IEC-Klasse erfüllen wollen, müssen wir für das Jahresmittel die vorgeschriebene Geschwindigkeit einsetzen, egal wieviel Wind am Standort wirklich ist.

Das dreifach vereinfachte Rechteckkollektiv sieht also so aus:  $5E8 * 0,75 = 3,75 E8$  Lastwechsel mit einer Schwankungsbreite von 1'377 Nm muss der Blattanschluss aushalten. Zusätzlich um 90 Grad versetzt das Schwenkmoment mit 164 Nm, selbe Lastspielzahl. Wenn der Blattanschluss rund, also rotationssymmetrisch ist, kann man zum vierten Mal vereinfachen und diese beiden geometrisch addieren.

Gültig ist das grob vereinfachte Ersatzkollektiv für Wöhlerlinien-Steigungen von 3 bis 9, daran sieht man schon wie grob vereinfacht das sein muss.

### 3.10 Zusammenfassung der Ergebnisse

Hinweis: unvollständig, als Beispiel fuer eigene Berechnungen entsprechend den Anleitungen.

#### Blattanschluss-Lasten B

Lastfall	FXB	FYB	FZB	MXB	MYB	MZB
	N	N	N	Nm	Nm	Nm
	Windschub	Querkraft	Fliehkraft	Schwenk- moment	Schlag- moment	Pitch- moment
N 1.0 / vr	708	197	5559	197	1652	0
N 1.1			17854	996	10559	0
E 1.1	4001					
E 2.1					relevant !	
E 2.2						
S 1.2						
S 1.4						
S 2.1						

(Hinweis: bei N1.0 die partiellen Sicherheiten zugefuegt)

Normal ist das grösste Schlagmoment bei E 2.1, bei schnellaufenden Anlagen kann es aber von E 1.1 ueberholt werden.

Die grösste Fliehkraft ist bei Bremsversagen S 1.4 mit folgender Ueberdrehzahl oder bei Betriebsbö N1.1

Die grössten Schwenkmomente treten bei Getriebebruch oder Bremsen auf, je nach Art der Schutzvorrichtung, somit Lastfall S 1.2

#### Nabenanschluss-Lasten N

Lastfall	FXN	FYN	FZN	MXN	MYN	MZN
	N	N	N	Nm	Nm	Nm
	Windschub	Querkraft	oben/unten	Drehmoment	Nickmoment	Giermoment
N 1.0 / vr	2125		1000	592	360	360
N 1.1	13577					0
E 1.1	8001				ca. 10'500	
E 2.1						
E 2.2						
S 1.2						
S 1.4						
S 2.1						

FZN ist das Eigengewicht des kompletten Rotors, hier zu ca. 100 kg = 1000N geschätzt.

Das grösste Nickmoment ist normal bei E 1.1. Es hängt sehr davon ab, wie die Anlage reagiert  
 Kreiselkräfte dimensionieren nur bei schnellem Wegschwenken, muessen jedoch aus Betriebsfestigkeits-Grunden vermieden werden.

Turmanschluss-Lasten sind hier nicht aufgefuehrt, jedoch kurz Hinweise:

Das grösste Nickmoment entspricht etwa dem der Naben-Koordinaten, da dieses Moment weitergeleitet wird.

Das Azimutlager ist mindestens gleich fest zu dimensionieren wie die Nabenlagerung

Der Lastfall E 2.2 mit den grossen Eismassen kann fuer die Knickung des Mastes relevant werden.

Der grösste Windschub ist entweder bei S 2.1 auf den flach stehenden Rotor oder bei E 2.1 aufgrund der passiven Teile der Anlage. Die muessen dazu, also der Luftwiderstand auf das Maschinenhaus etc.

Montagelastfälle sind im allgemeinen nur fuer den Turm relevant, muessen aber unbedingt gerechnet werden. Hochziehen mittels Juettbaum etc kann erheblich grössere Lasten als im Betrieb ueblich geben.

Betriebsfestigkeit

hier nur Blattanschluss, dreifach vereinfacht

Rechteckkollektiv mit  $n = 3,75 E8$  Lastwechsel

$$\Delta M_{YB} = 1377 \text{ Nm}$$

$$\Delta M_{XB} = 164 \text{ Nm}$$

gueltig fuer  $m = 3$  bis  $9$  (!)

#### 4. Festigkeitsnachweise

Extremlasten werden nach Gestaltfestigkeit nachgewiesen, Betriebsfestigkeits-Ersatzlasten gemäss Betriebsfestigkeit. Dabei sind völlig unterschiedliche Festigkeitswerte gueltig. Bei der Betriebsfestigkeit werden Stahlbau- und Maschinenbauteile auf eine zulässige Schwingweite unabhängig von der Mittelspannung nachgewiesen. GFK erfordert Einbeziehen der Mittelspannungen.

Ausfuehrliche Hinweise zu Festigkeitsnachweisen findet man in den klassischen Lehrbuechern wie Dubbel, Huette, Roloff-Matek, und beim GL findet man Grundsätzliches zu den zulässigen Spannungen. GFK-Berechnungen erfordern spezielles Wissen, das Buch von Ehrenstein ist gut, und wer französisch kann, möge sich das Buch von Daniel Gay, *Materiaux composite*, kaufen.

Hier ein einfaches Beispiel.

##### 4.1 Flansch an einem runden Stahltopf als Wurzel eines GFK-Fluegels

Der Blattanschluss sei ein runder gedrehter Stahltopf, der mit einer gegossenen Nabe verschraubt wird. Anschlussdurchmesser sei  $0,18\text{m}$

*Faustformel: Blattanschlussdurchmesser mindestens 4%, besser 5% der Blattlänge bei technisch hochwertiger Ausfuehrung.*

Das maximale Schlagmoment von 10559 Nm wird mit dem maximalen Schwenkmoment von 996 Nm zusammengefasst zu resultierend

$$M_{res} = 10606 \text{ Nm}$$

Das wirkt auf einen Schraubenflansch der folgenden Daten:

Lochkreis	180mm
Schraubenanzahl	16
Schraubengrösse	M12 x 60
Klemmlänge	40 mm
Flanscheinflussbreite	20 mm

Damit fuettern wir ein kleines EXCEL, in dem die Formeln der VDI 2230 programmiert sind. Ergebnis ist eine Sicherheit von ca. 3 gegen Bruch einer Schraube. Die Verbindung ist also gesund, man kann erwarten dass auch andere Lastfälle ohne Schaden ueberstanden werden.

Fuer die Betriebsfestigkeit fuettern wir die Schwingweite des Momentes ein (= 1387 Nm) und bekommen die Schwingweite der Schraube zu rund 8,1 N/mm<sup>2</sup>. Zulässig sind 25 N/mm<sup>2</sup>, somit reichlich Sicherheit an dieser Stelle.

Der Topf selbst muss noch nachgewiesen werden, natuerlich auch die Verbindung zum GFK etc.

## 4.2 Holzblatt-Wurzel

Alternatives Beispiel. Das Blatt ist aus Holz gefräst, hat einen rechteckigen Anschluss 200 x 100mm. Widerstandsmoment des Holzquerschnittes in Schlagrichtung

$$W_B = b \cdot h^2 / 6 = 333\,333 \text{ mm}^3$$

Biegemoment

$$M_B = 10559 \text{ Nm} = 10\,559\,000 \text{ Nmm}$$

Maximale Biegespannung am Rand

$$\sigma_B = M_B / W_B = 10559000 / 333333 = 31,7 \text{ N/mm}^2$$

Das Schwenkmoment fuehrt zu geringen Spannungen, die in den Sicherheiten untergehen.

Die Gestaltfestigkeit von Fichtenholz des Raumgewichtes

	300	500	700 kg/m <sup>3</sup>
beträgt	40	70	120 N/mm <sup>2</sup>

Quelle: Dubbel 13te Auflage erster Band Seite 609.

Es muss also ein ausgesucht gutes astfreies Holz höherer Dichte am Wurzelbereich sein, um mit genug Sicherheit zu halten. Die internen Verleimungen werden als fester als das Holz vorausgesetzt.

Die Betriebsfestigkeit liegt bei 20 N/mm<sup>2</sup>. Da unsere Betriebsfestigkeits-Lastkollektive eine Schwankungsbreite von rund 13% der Extremlast waren und hier die Betriebsfestigkeit 50% der Extremlast ist, gibt es keine Betriebsfestigkeits-Probleme.

Das heisst nicht, dass die Lebensdauer gesichert ist. In Wirklichkeit gibt es mit Holz Probleme durch Schimmel, Quellen unter Feuchtigkeit, Frostbeständigkeit angeblich frostfester Leimsorten, interne Spannungen in den Verleimungen durch Verzug, Erosion, Korrosion angeschlossener Stahlteile, Gewichtsänderung durch Feuchtigkeitsaufnahme. Fuer Holz muss man also sehr viel know-how mitbringen. Holzblätter sind ähnlich wie ein Holzboot. Schön, aber viel Pflege notwendig.

Noch besser als eine Nabenbefestigung der einzelnen Blätter ist es, die Blätter vor Ort zum kompletten Rotor zu verleimen. Seewasserfeste Sperrholzsscheiben mit AERODUX aufkleben, dann den ganzen Rotor an die Nabe. Dabei vermeiden wir Metall /Holz-Uebergänge an hoch beanspruchten Stellen.

### 4.3 Rotorwelle Extremlast

Wir hatten das maximale Nickmoment zu etwa 10,5 kNm sehr grob gerechnet. Wenn wir mal annehmen, dass das bei der Betriebsbö gerechnete Blattwurzel-Schlagbiegemoment von ca. 10,6 kNm fuer einen Moment allein wirkt, also die beiden uebrigen Blätter gerade nicht da sind, dann wäre das Biegemoment an der Welle eben genau diese ca.10 kNm. Der Wert kann also gar nicht so verkehrt sein. Umgekehrt können wir den Wert fuer die Blattwurzel in grober Näherung auch fuer die Welle nehmen, indem wir uns den Lastfall E 1.1 so vorstellen dass zwei Blätter gerade aerodynamisch unwirksam sind.

Wir nehmen eine 70 mm starke Welle aus blank gezogenem Rundstahl Ck 45 an. Darauf sei eine Nabe geschrumpft, die auch die Bremsscheibe trägt. Aus der Literatur entnehmen wir fuer die Stelle (ggfs nach genauerer Rechnung) eine Formzahl  $\alpha_k = 1,6$  .Literatur: Kollmann,Welle/Nabe-Verbindungen.

Streckgrenze fuer Ck 45 ist  $R_{02} = 480 \text{ N/mm}^2$   
(Dubbel Auflage 17 Seite E 8-3)

Widerstandsmoment gegen Biegung

$$W_B = \pi * D^3 / 32 = 33'674 \text{ mm}^3$$

Biegespannung

$$\sigma_B = M_B / W_B = 10'500'000 \text{ Nmm} / 33674 \text{ mm}^3 = 312 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Lokale Spannungsspitzen } \sigma_{B_{\max}} = \alpha_k * \sigma_B = 1,6 * 312 = 499 \text{ N/mm}^2$$

Die Torsion ist nicht dabei, weil sie von der Bremse direkt in die Nabe geht, wir hatten angenommen dass die Bremse auf eine Scheibe an der Nabe wirkt.

Die Welle hält also rechnerisch erstmal ganz knapp um ein paar Prozent nicht. Dagegen steht die Erfahrung, dass eine Welle mit Durchmesser gleich Rotordurchmesser /100 dann hält, wenn kerbarm konstruiert wurde und der Werkstoff mindestens hochwertigem Baustahl entspricht.

Wir muessen also den Lastfall E 1.1 exakter rechnen oder pauschal die Welle noch dicker machen. Oder die Lagerung mit der Nabe integrieren, dass das Biegemoment von dort direkt in die Lagerung geht. All das muss man aber im Einzelfall sehen.

Betriebsfestigkeit?

Da haben wir zur Zeit kein Kollektiv, können dieses aber nach Studium der GL- Unterlagen selbst erstellen. Bis dahin muss die Faustformel gelten: Wellendurchmesser = Rotordurchmesser/100 bei kerbarmer und geschickter Konstruktion sowie hochwertigem Werkstoff, sonst Rotordurchmesser / 80.

Zum Lastfall E 1.1 sei noch bemerkt, dass eine Windfahne an turbulenten Standorten zum Pendeln der Anlage führt. Es ist dann nur eine Frage der Zeit, bis eine Bö mit Richtungsänderung zufällig in bis zu 90 Grad Abweichung zur gewollten Stellung eintrifft. Das gilt für Nachführen ebenso wie für Sturmstellung. Wer also um 90 Grad seitlich wegschwenkt, muss damit rechnen, dass der Wind irgendwann trotzdem den Rotor nahezu frontal trifft. Das passiert nicht in selbigen Masse an glatteren Standorten.

Deshalb sei auch empfohlen, den Rotor lieber nach oben als zur Seite zu schwenken, sofern eine Windfahne die Richtung vorgibt. Hochschwenken erfordert aber Sonderdichtungen am Getriebe.

Schräganströmung ist jedoch das Schlimmste, was man einem Rotor antun kann, wir provozieren nämlich ständige E1.1 Fälle, sodass Extremlasten zu Betriebsfestigkeits-relevanten Lasten werden. Schrägstellen eines drehenden Rotors um die Leistung zu begrenzen ist ein grober Konzeptfehler und führt nach kurzer Zeit zum Schaden an der Anlage.

## 5. Kurz zur Blattzahl

Einflügler sind für den Selbstbauer zu schwierig, da er die Berechnung des Schlagwinkelbereiches und die konstruktive Ausführung der Pendelnabe nicht im Griff hat.

Zweiflügler sollte man nur dann bauen, wenn rechtwinklig zum Rotor ein Massenträgheitsmomentenausgleich angebracht ist, der die Dynamik eines Vierflüglers hervorruft.

Ein Zweiflügler ohne Massenträgheitsmomentenausgleich verursacht bei Windrichtungsnachführung durch Windfahne erhebliche dynamische Zusatzlasten, man muss dringend von diesem Konzept abraten! Bei motorischer Windnachführung und Azimutbremsen wird der Turm sehr hoch dynamisch in Torsionsrichtung beansprucht, man muss mit Instabilitäten rechnen (Projekt A 100, 1994).

Das Problem lässt sich mit einer Pendelnabe lösen, die dann die Problematik des Schlagwinkelbereiches mit sich bringt (Projekt A 1200 1995).

Also Finger weg vom 1 und 2 Flügler!

Die Blattzahl richtet sich nach der Schnellaufzahl und der Blattbauweise. Ein Rotor mit Schnellaufzahl 5-6 kann man nur in GFK oder sehr hochwertigem Holz bauen. Die Profile sind ausgesuchte echte Tragflügelprofile, die Genauigkeit etwa im Bereich weniger zehntel mm. Die Anforderungen an die Wuchtung und Blattwinkelgenauigkeit sind hoch.

Wer mit einfachen gebogenen Blechen oder Jedelsky-Profilierungen auskommen will, soll 12 bis 16 Blätter auf einem Stahlgestell bauen. Der Wirkungsgrad eines solchen Rotors kann ohne weiteres genauso hoch sein wie der schnelllaufende, das wird häufig falsch eingeschätzt.

Segeltuch ist problematisch weil es zum "killen" neigt, speziell in Sturmstellungen. Normalerweise müssen solche Bespannungen jährlich erneuert werden, der Kostenaufwand ist hoch. Dagegen sind auf ein Holzgerippe aufgebrachte Bespannungen aus Lastwagenplane erstaunlich gut. Die Bauweise

entspricht dem eines Holz-Segelflugzeuges, z.B. K8. Aber nur die Bauweise selbst, die Struktur ist beim Windrad erheblich massiver und dickwandiger.

## 6. Kurz zum Sicherheitskonzept

Es hat in den letzten 20 Jahren eine Art Evolution der Sicherheitsphilosophie gegeben, sodass sämtliche Hersteller und Institutionen die in Abschnitt 2 erwähnten Sicherheitsstandards gutheissen und anwenden. Hier in Stichworten.

Es muessen zwei Sicherheitssysteme da sein, zum Beispiel:

- Bremse und Pitch,
- Bremse und Hochschwenken (problematisch!)
- Kollektivpitch und Hochschwenken
- Bremse und Fliehkraft-Drehzahlbegrenzer
- Einzelblatt-Pitch (nur ab drei Blätter)
- Bremse und Bremse

Die Sicherheitssysteme muessen regelmässig automatisch ueberwacht werden. Fuer den Fall, dass sie aktiv sind, (zB hydraulische Bremse), muss die Energieversorgung (hier Druck) ueberwacht werden. Die Sicherheitssysteme duerfen keine uebergeordnete gemeinsame Verbindung haben. Beispiel: Eine Hauptsicherung sichert Bremse und Pitch ab, brennt diese durch sind beide unwirksam.

Die Versagenslastfälle sind stets so zu kombinieren, dass das Versagen eines Systems vom anderen abgedeckt wird. Beispiel: Versagen des Pitches wird durch nicht ausreichende Drehzahlabnahme ueberwacht und erkannt und sofort die Bremse ausgelöst.

Zwei Bremsen auf derselben Scheibe sind nicht als 2 Sicherheitssysteme anerkannt, weil diese verölen könnte. Eine Bremse an der Nabe und eine Bremse an der schnellen Welle sind anerkannt (TW 600, HSW 250) und haben sich bewährt.

### Sicherheitsschleife

Unabhängig von der Betriebsfuehrung (z.B. SPS oder hartverdrahtet oder Industrie PC ) muss eine hartverdrahtete Sicherheitsschleife da sein, die dem BF-Rechner uebergeordnet ist. Der kann die Schleife unterbrechen aber nicht ruecksetzen. In der Schleife ist ein selbthaltendes Relais. Ein kurzes Unterbrechen der Schleife fuehrt zum Abfall des Relais und damit zum Auslösen beider Sicherheitssysteme. In die Schleife werden sicherheitsrelevante Sensoren eingebunden, und zwar die folgenden.

Drehzahl zweifach redundant. Drehzahl messen, möglichst direkt am Rotor, aber auch einmal am Rotor und einmal am Generator ist zulässig. Die Drehzahlschaltgeräte muessen unabhängig arbeiten, drahtbruchsichere Ausgänge haben. Also den Schliesser der Relais in die Schleife einbinden. Ausfall der Versorgungsspannung ist dann Fehlalarm. Es muessen keine elektronischen Drehzahlschaltgeräte sein, es geht auch ein mechanischer Fliehkraftschalter.

### Unwucht und Schwingungen

Ruettelschalter oder elektronisch realisierter Schwingungswächter. Sehr wichtig, da eine Anlage durch Eisbehang, Wasser in den Blättern oder Verlust eines Blattstueckes sonst beliebig lange laufen wuerde und sich zerruettelt.

Versagen eines Sicherheitssystemes.

Der Betriebsfuehrungsrechner stellt z.B. Pitchversagen fest und löst die Bremse aus und umgekehrt. Der Betriebsfuehrungsrechner kann eine SPS sein, oder eine BASIC-STAMP-Steuerung oder auch ein PC sein, aber auch rein hartverdrahtet werden. Wenn ich es bauen sollte, wuerde ich es "hartverdrahten", also eine spezielle Betriebsfuehrungsschaltung selbst entwerfen.

#### Notaus-Knopf

Manuell, falls Bedarf ist die Anlage sofort zu stoppen. Hinweis: ein zweiter Knopf soll in sicherer Entfernung angebracht sein. Wenn eine Anlage durchgeht oder umzufallen droht, traut sich niemand mehr zum Notausknopf am Turmfuss.

#### Verdrehung der Leistungskabel

Es kann passieren, dass diese durch Drehung der Anlage auf dem Turm sich bis zum Kurzschluss verwinden. Also entsprechender Schalter. Meiner persönliche Meinung nach ist das uebertrieben bei Kleinanlagen. Der Hintergrund ist die Personengefährdung durch offenliegende Kupferleiter bei zerstörten Kabeln, deswegen hat der GL das in der Vorschrift.

#### Leistungstrenner

Sofern durch Kurzschluss die Hauptsicherung des Generatorsystems auslöst, ist die Anlage ohne Last. Dann soll die Sicherheitsschleife auslösen. Also Hilfskontakt einbinden.

Die uebrigen Betriebsdaten wie Wind, Leistung, brauchen nicht direkt in die Sicherheitsschleife.

Grundsätzlich muss die Sicherheitsschleife und ihre Sensorik nicht nur Ausfall, sondern beliebige Fehlfunktionen des Betriebsfuehrungsrechners abdecken. Wir hatten einen Fall, wo durch nicht fuer möglich gehaltene Fehlprogrammierung der Betriebsfuehrungsrechner es tatsächlich schaffte, die Anlage während einer plötzlichen Sturmbö bei gleichzeitigem Netzausfall in einen Betriebszustand zu bringen, den das Sicherheitskonzept nicht abdeckte. Die Anlage zerstörte sich, ein Monteur starb (3.4.1997). Die Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse entsprachen dem eines Lottogewinns.

Bei sehr kleinen Anlagen wie Batterieladern, ist der geschilderte Aufwand uebertrieben, man kann entsprechend einer speziellen Norm den Aufwand etwas verringern.

Bei Anlagen ueber ca. 2 m Durchmesser empfehle ich dringend, den Aufwand zu treiben und das Sicherheitskonzept von anderen möglichst sachverständigen Leuten gegenpruefen zu lassen. Fuer den Fall eines Schadens kann man zumindest nachweisen, nicht fahrlässig gehandelt zu haben. Der Kostenanteil ist erstaunlich gering, da etwas Elektronik im Vergleich zu Getriebe oder Generator preiswert ist.