

In den Jahren 1997 - 99 erlebten wir die Rotorblattschäden aufgrund stallinduzierter Schwingungen, im Jahre 2000 eher die Getriebeschäden diverser Hersteller, wobei es NEG-MICON /Flender sicherlich am härtesten traf [1 bis 9].

Im folgenden möchte ich 7 Möglichkeiten beschreiben, woran ein Windkraftgetriebe vorzeitig sterben kann. Fast alles ist in den letzten 16 Jahren selbst erlebt.

1. Stallbetrieb-Lasten unterschätzt.

Werden die Blätter in sauberem Zustand auf den Soll-Blattwinkel justiert, wird anschliessend mit dreckigen Blättern die Nennleistung nicht erreicht. Man stellt deshalb etwas positiver in Erwartung der Verschmutzung und die frisch aufgestellte Maschine macht erstmal Überleistung. Im Teillastbereich ist die etwas zu positive Einstellung zumeist auch günstig. Dazu kommt die Sommer-Winter-Problematik. Ein Hochdruckgebiet im Winter liefert 20% mehr Energie als ein Tiefdruckgebiet im Sommer.

Gelegentlich wurde wissentlich auf viel zu hohe Leistung justiert. Es gibt Fälle, bei denen dem Käufer die Überleistung als Verkaufsargument mündlich zugesichert wurde. Der Überleistung überlagert sich noch die Dynamik, Leistungsschwankungen um $\pm 20\%$ sind im Stall völlig normal.

Da Überleistung häufig auch mit zu hohen Öltemperaturen korreliert und die Schmierfähigkeit des Öls dabei stark absinkt, verschärft sich das Problem besonders fürs Getriebe.

Da Passivstall-Anlagen kaum noch gefertigt werden, sind jetzt auftretende Getriebeschäden mit dieser Ursache eher Altlasten. Zusätzlicher Ölkühler und Feinfilter schaden natürlich nicht, lösen aber nicht die primäre Ursache.

Abhilfe: Korrekte Blattwinkleinstellung, Lasten realistischer spezifizieren, eventuelle zusätzliche Temperaturprobleme lösen.

2. Schwingungen im Antriebstrang

Das betrifft nur einige wenige Anlagen, die dynamisch nicht gesund sind. Es gibt Fälle, in denen der mittleren Leistung eine klassische Drehschwingung überlagert ist. Da die Belastung nichtlinear in die Lebensdauer eingeht, ist es ein Unterschied ob eine Anlage 600 kW mit statistischen Schwankungen $\pm 20\%$ oder 600 kW mit sinusförmigen 3P-Schwankungen von 300 auf 900 kW macht.

Abhilfe: leider weitreichend, komplette Umkonstruktion des Getriebes auf andere Steifigkeiten, Verschiebung der Resonanzstelle.

3. Bremsendynamik

Notaus-Bremsvorgänge erfordern bei Passivstall-Anlagen etwa 2 bis 2,5 faches Nennmoment um den Lastfall "kollektives Versagen der drei Blattspitzen" abzudecken. Die Bremse wurde in den Jahren

1988 bis 1993 allgemein auf diese Momente und mit Zufasszeiten von 0,2 sec dimensioniert. Der Generator wird stets weggeschaltet.

Das System Rotor, Getriebe, Bremscheibe +Generator ist ein klassischer 2-Massen-Schwinger. Plötzliches Zufassen der Bremse regt dieses System an, was sehr gering gedämpft ist. Ein weggeschalteter Generator ist ein reines Schwungrad. Der Antriebstrang schwingt also, wobei im Getriebe als Summe vom Bremsmoment und dynamischer Überhöhung dann das 2 fache Bremsmoment entsprechend dem 4 bis 5-fachen Nennmoment (!) auftritt.

Das führte dann zum Beispiel zum Lagerschaden (1000 kW-Anlage, 1996, Deutschland) oder zum Durchrutschen eines internen Schrumpferverbandes im Getriebe (600 kW, 1997, D).

Lösung des Problems ist entweder:

* eine Drosselblende in der Druckleitung zur Bremse, Zufasszeit um 0,6 bis 0,8 sec. Das ist eigentlich aus Sicherheitsgründen nicht zulässig, wenn die Lasten mit nur 0,2 sec gerechnet wurden.

* eine elektronisch geregelte Bremse, z.B. Svendborg-Sobo oder entsprechende selbst aufgebaute Schaltung.

* Besondere hydraulische Beschaltung der Vingetip-hydraulik derart, dass diese vom Germanischen Lloyd als fail-safe anerkannt wird. Der Lastfall "Versagen aller Tips gleichzeitig" entfällt, man rechnet mit Versagen eines Tips. Das nötige Bremsmoment sinkt auf etwa Nennmoment. Dies Konzept wurde erfolgreich angewandt an einer 750 kW-Maschine aus dem Hause meiner früheren Firma, es ist die beste Lösung. Die Drosselblende in der Bremszuleitung kann zusätzlich rein.

4. Leerlauf und Teillast

Trudelbetrieb bei schwachem Wind wird gern gesehen, um erstens die Lager und Getriebe (bei Tauchschmierung) unter Öl zu halten, zweitens damit der Besitzer stolz sagen kann: "Es ist fast windstill und die Mühle dreht sich trotzdem!".

Der Rotor erfährt in Turbulenz und Windscherung schwankende Momente, der Generator betätigt sich als Schwungrad. Das führt zum zyklischen Reversieren des Getriebes. Der Verzahnung macht das normal nichts, aber Schrägverzahnung verursacht Axialkräfte auf sämtliche Lager. Wenn nun die Lagerung nicht dafür gemacht ist reversierende Axialkräfte aufzunehmen, gibt es Lagerschäden. Besonders betroffen sind Lagertypen die axial weich sind (Pendelrollenlager) oder gar Axialkugellager, die im Rahmen des Einbauspiels lose fallen können. Das Überwinden der Lose erzeugt natürlich starke dynamische Überhöhungen. Weiterhin können Lager unter ihre Mindestlast fallen, was zu Gleitanteilen der Wälzkörper führt und jedes Lager schädigt. Hier sind besonders die Planetenlager gefährdet da sie keine größeren Massen tragen die eine gewisse Mindestlast mit sich bringen.

Lösung des Problems: Trudelbetrieb verbieten. Parkstellung gebremst, Anlauf bei genug Wind für ständige Leistung, Abschalten bei Auftreten von zuviel negativen Momenten. Oder aber Getriebe komplett überarbeiten fürs Reversieren, ggfs beide Massnahmen parallel.

Eine Variante ist das Reversieren des Getriebes beim Bremsen der Anlage mit voller Blattverstellung, aber ohne Bremse. In diesem Fall tritt einige Sekunden lang ein nennenswertes umgekehrtes Moment auf, weil der Rotor den Generator abbremst.

5. Parkstellung

Ein interessantes Phänomen. Wenn die Anlage nur auf der schnellen Seite gebremst wird, arbeitet das Getriebe in sich, da es elastisch ist. Es entstehen Mikrobewegungen im Bereich einiger zehntel Millimeter auf der Verzahnung. Wenn das Getriebe nur Tauchschmierung hat, fallen die Zähne langsam trocken. Steht die Anlage z.B. wegen Reparaturen einen Monat lang und in dieser Zeit sind einige Tage Sturm, kann dies schon eine Riefe auf der Verzahnung verursachen. Von dort ausgehend können sich Folgeschäden ausbreiten.

Lösung: Ölumlaufschmierung nachrüsten, gelegentlich oder gar ständig schmieren. Ist kein Netz vorhanden, (etwa bei längeren Montagen grösserer Windparks) muss man von Hand eingreifen.

6. Die 3-Punkt-Problematik

Die Dreipunktlagerung hat sich bei fast allen Getriebeanlagen durchgesetzt. Die Rotor-Biegemomente stützen sich über die Drehmomentenstütze des Getriebes und natürlich auch dessen Lagerung ab. Zusätzlich zu den berechenbaren Lasten gibt es solche, die gelegentlich nicht ausreichend berücksichtigt wurden.

Die wichtigste davon ist die axiale Deformation des Hauptlagers. Da die Welle kleine Winkelbewegungen macht, ist dort ein Pendelrollenlager im Einsatz. Dieser Lagertyp ist axial weich, wie man an dem geringen Druckwinkel des Lagers unschwer erkennen kann. Im Teillastbetrieb verursachen Windschubschwankungen und Turmdynamik ein axiales Arbeiten des Lagers mitsamt Lagerbock von etwa 1 bis 1,5 mm, im Regelbetrieb wahrscheinlich mehr.

Das Getriebe wird mitgezogen. Diese axiale Verschiebung führt zu Reaktionskräften aus den Gummibuchsen und damit zur Belastung der Lagerung des Planetenträgers. Wenn diese Lager auch halten, so federn sie aber ebenso durch und verursachen axiale Verschiebungen in der Verzahnung. Die Schrägverzahnung macht aus den axialen zyklischen Verschiebungen zusätzliche Drehwinkeländerungen und vergrössert dadurch die Drehmomentenschwankungen.

Was genau passiert, muss man im Einzelfall untersuchen, auf jeden Fall entstehen unerwünschte Zusatz-Lasten.

Abhilfe:

- * Lagerbock steifer machen sofern möglich und
- * Gummibuchsen axial weich machen, radiale Steifigkeit dabei aufrechterhalten.
- * Wenn das nicht ausreichend gelingt, ggfs sogar die Gummibuchsen in Gleitlagern führen.

Wälzlager werden immer "weicher" je grösser sie gebaut werden. Die Lager verlangen eine genügend steife und exakt bearbeitete Anschlusskonstruktion [11, 12]. Arbeitet die Anschlusskonstruktion in sich, wird das Lager unrund gedrückt und die Lebensdauer erheblich verkürzt. Nach Meinung einiger Wälzlagerexperten wird zur Zeit zuviel Wert auf die Festigkeitsoptimierung gelegt und das Problem der Deformation der Wälzlagersitze unterschätzt [10]. Heisst also: FEM-Analyse, Lager mit modellieren.

7. Sonstiges

Hier die eher seltenen Fälle zusammengefasst.

7.1 Stromdurchgang durch Lager

Eine Maschine von 1,5 MW erhielt einen Generator mit umrichtergespeistem Läufer. Dieser Generatortyp versucht besonders starke Lagerströme zu erzeugen. Die Generatorlager waren isoliert und der Läufer mit einem Erdungsschleifring geerdet. Trotz Erdungsschleifring (!) gingen Ströme über die Kupplung ins Getriebe und führten zu Getriebelagerschäden.

Abhilfe: isolierende Kupplung.

7.2 Sonderstandorte

Eine Windmühle wurde in Nähe einer Steilküste in Griechenland aufgestellt. Diese verursachte aussergewöhnliche Turbulenzen und Windscherungen, was die Anlage stark beanspruchte. Zusammen mit anderen Problemen ergaben sich Getriebeschäden. Abhilfe: Standort auf Besonderheiten prüfen (übrigens in Wüstengebieten auf Sandstaub, Luftfilter!)

7.3 Motoranlauf

Eine kleinere Windkraftanlage wurde mit einem Motoranlauf ausgerüstet. Der Generator wurde aber nicht über Phasenanschnitt, sondern direkt per Schütz ans Netz geschaltet. Ergebnis: Der Generator/Motor brummte laut auf, die Lichter wurden dunkler, das Getriebe kreischte, Besucher sprangen entsetzt davon, die Kühe auf der Weide wurden verrückt.

Abhilfe: Den Kerl entlassen der das angeordnet hat.

7.4 Achsneigung

Ein Getriebe mit Tauchschmierung wurde waagrecht geprüft und für ok befunden. Im realen Betrieb war aber 5 Grad Achsneigung vorhanden. Das Öl lief nun nicht mehr intern so wie gewünscht und ein Lager lief trocken und überhitzte.

Abhilfe: In Einbaulage prüfen.

Und :Umlaufschmierung ist ohnehin der Tauchschmierung vorzuziehen, siehe Punkt 5

7.5 Stillstand

Eine gebrauchte Anlage wurde wiederaufgebaut, das Getriebe hatte aber in der Stillstandszeit aufgrund Kondenswasser bereits interne Rostnarben angesetzt. Insbesondere die Wälzlager waren geschädigt und wurden laut. Der Besitzer kippte eine grössere Menge Grafit ins Öl und das Getriebe lief dann trotzdem noch mehrere Jahre.

Abhilfe: Bei Stillstand konservieren. Randvoll mit Öl, oder Schutzgas und Trockenmittel, oder regelmässig durchdrehen.

7.6 Transportschäden (diesen Fall nicht selbst erlebt, sondern geschildert bekommen)

Transport mit einem hart gefederten LKW auf einer Schlaglochstrasse führte zu Stillstandserschütterungen, das Getriebe /der Generator kamen mit vorgeschädigten Wälzlagern am Ziel an.

Abhilfe: Luftfederung verlangen, Getriebe auf Gummi verpacken, Genolager verspannen.

7.7 Ölprobleme

Eine Ölpumpe saugte Öl mit Luft, schäumte das Öl auf und die Schmierung bei weitem nicht wie sie sollte. Die Ölversorgung wurde umgebaut, keine Schäden.

Anderes Projekt. Unverträgliche Ölsorten verursachten Ölschlamm, der sofort den Filter verstopfte. Dieser war elektrisch rückgemeldet. Das Problem wurde deshalb umgehend bemerkt, auch hier gab es keinen Schaden.

7.8 Fertigungstechnische Mängel, zB. lokale Überhitzungen beim Schleifen oder Vorschädigung der Lager durch zu grobe Montage.

Weitere Detailprobleme und beliebige Kombinationen der geschilderten Ärgernisse sind natürlich möglich.

Serienmässig üblich ist die Überwachung von:

- Öltemperatur Getriebesumpf
- Temperatur schnellaufendes Lager
- Schwingwege der Gummibuchsen
- Funktion Schmierpumpe (Drossel, Druckschalter)
- Ölstand im Öltank
- gelegentlich Filterbypass (Filter verstopft)

Eine Schwingungsanalyse ist eher selten. Sie kann selbstverständlich keine Schäden ursächlich verhindern, aber Folgeschäden vermeiden. Wenn ein Lager ausgelaufen ist und wird laut, kann man es wechseln bevor es zerplatzt und das Getriebe dadurch Totalschaden erleidet.

Die in den letzten Jahren aufgetretenen Getriebeschäden werden nun unterschiedlich bewertet. Die Allianz Hamburg erklärte in einem Workshop sogar, dass man für die heute in Betrieb befindlichen Getriebe nur etwa 5 Jahre Lebensdauer schätzen würde. Das stimmt natürlich nachdenklich, ist aber nach Meinung anderer eher pessimistisch formuliert.

In der Diskussion nach den Ursachen der diversen Komponentenschäden kann man festhalten, dass keine groben Fehlauslegungen vorliegen (diese wären spätestens bei der Prüfung durch den GL aufgefallen), sondern dass hier Sondereffekte am Werke sind, die nicht in vollem Umfange in Spezifikation oder Konstruktion berücksichtigt wurden.

Praktisch alle in der Branche in den letzten Jahren geschehenen Schäden und Unfälle wären beim genauen Durchdenken vermeidbar gewesen !

Das Grundproblem liegt darin, dass der Windkraftanlagenhersteller eine Baugruppe in höchster Qualität zum Spottpreis möglichst gestern haben will. Die für eine 100% sichere Ausarbeitung nötigen Arbeiten sind sowohl vom Terminplan als auch von den Kosten her nicht möglich. Es bleibt ein Restrisiko, was sich bei schnellem Wachstum auf hunderte von Anlagen verschleppen kann.

Man mag sich die Frage stellen, ob sich langfristig der getriebe lose Direktantrieb durchsetzt. Die Diskussion führt hier zu weit. Ich möchte nur erwähnen, dass sich nachweisen lässt, dass der Direktantrieb mit steigender Anlagengrösse immer unwirtschaftlicher wird und für Anlagen im Multimegawattbereich unter gleichen Voraussetzungen verglichen ganz klar im Nachteil ist [13]. Somit wird man auch in Zukunft für die grossen Offshore-Maschinen sicherlich Getriebe anwenden, vermutlich mit Sonderlösungen für Hauptwelle und Lagerung [14,15].

Literatur:

- [1] K. Josef, L. Bäckermann: Getriebeschaden-was nun? Windkraft Journal 3/2000 S.12
- [2] P.Bollmann, H. Krüger, Allianz: Getriebeschäden gehen weiter Windkraft-Journal 2/2000 S. 8
- [3] NEG-MICON, Randers, DK: NEG-MICON's Retrofit Programm, WKJ 2/2000 S.12
- [4] H.L. Pedersen, VESTAS und J. Virtanen, VALMET: Kein Serienschaden bei 600 kW-Getrieben. WKJ 3/99 S.10
- [5] P.Lübker u.a. NEG-MICON, M. Eggelwisse u.a., Flender: NEG-MICON und Flender unterzeichnen Kooperationsvertrag, das grösste Serienproblem...WKJ 6/99 S. 36
- [6] E. de Vries: No simple solutions to gearbox problems, Windstats 4/1999 S.1
- [7] S.Skriver, T.Möller: Gears wearing too fast, Windstats 2/1999 S.5
- [8] D. Koennemann: Getriebeschäden unter der Lupe Sonne Wind und Wärme 2/2000
- [9] T.Möller: Another gear box failure warning Windpower Monthly 12/ 2000 P.29
- [10] SKF-Systemanalyse mit FEM, WKJ 3/2000 S. 68
- [11] Brändlein, Eschmann u.a. Die Wälzlagerpraxis, Vereinigte Fachverlage GmbH, Kap. 6
- [12] HRE-Handbuch Grosswälzlager S. 32 (Hinweise zur Anschluss-Steifigkeit)
- [13] G.Böhmeke, R.Boldt, H. Beneke: Direct drive, geared drive, intermediate solutions..EWEC 1997 conference proceedings
- [14] Flender: Windkraft besser nutzen, WKJ-Sonderausgabe 2000 (In die Nabe integriertes Getriebe)
- [15] S.Siegfriedsen u.a.: MULTIBRID technology...EWEC 1999 proceedings