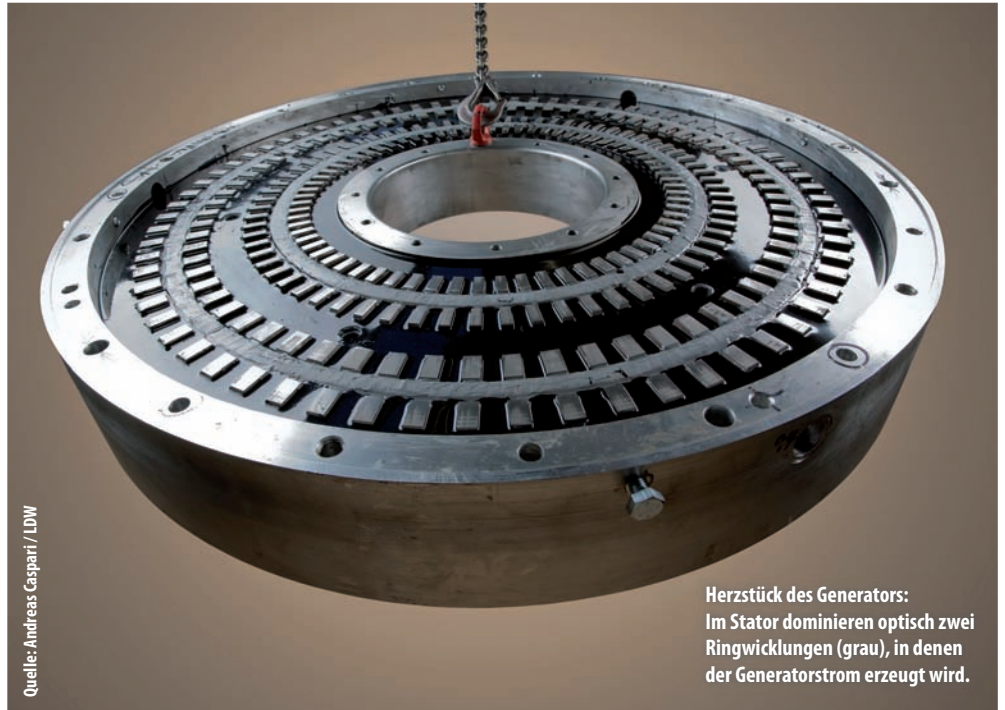


# Hochmoment-Generatoren in Leichtbauweise

In direktgetriebenen Windenergieanlagen Gewicht und Kosten sparen

**Der Direktantrieb von Generatoren hat in Windenergieanlagen viele Vorteile, führt aber zu enormen Kran- und Turmtraglasten. Der hier vorgestellte Hochmoment-Generator in Leichtbauweise wiegt nur ein Viertel eines konventionellen Generators. Erhebliche Kostenreduzierungen bei Turm und Gründung wären die Folge, insbesondere bei Offshore-Anlagen.**

■ Norbert Götschmann



Quelle: Andreas Caspari / LDW

**Herzstück des Generators:**  
Im Stator dominieren optisch zwei Ringwicklungen (grau), in denen der Generatorstrom erzeugt wird.

**F**ür Windenergieanlagen (WEA) bis 1,5 MW Nennleistung haben sich doppelt gespeiste Asynchronmaschinen in Kombination mit Getrieben als wirtschaftliche Lösung durchgesetzt. Die niedrige Windflügeldrehzahl wird bis auf die hundertfache Drehzahl des Generators übersetzt.

Da die Leistung einer WEA etwa proportional mit der Fläche wächst, die von den Rotorblätter bestrichen wird, und die Umfangsgeschwindigkeit an den Blattspitzen nicht erhöht werden kann, wächst das Antriebsmoment (T) überproportional mit der Nennleistung (P):

$$T = \frac{P^{1,5}}{\omega_0 \cdot \sqrt{P_0}} \quad (1)$$

Die Größen mit dem Index „0“ kennzeichnen die Ausgangsgrößen der kleineren Anlage. Anders ausgedrückt: Mit größer werdender Nennleistung wird die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  des Rotors kleiner und das Antriebsmoment muss überproportional steigen, damit die Nennleistung erbracht wird. Das wachsende Antriebsmoment verschärft jedoch mit zunehmender

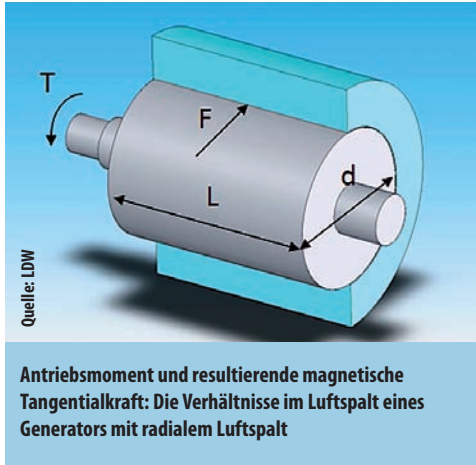
Nennleistung einer Windenergieanlage die Problematik der Dauerfestigkeit der Zahnräder in den Getrieben. Die aus Windböen resultierenden Drehmomentüberhöhungen, die bis das Zweifache des Nennantriebsmoments betragen, können bereits bei kleinen Windrädern zu deutlichen Reduzierungen der Lebensdauer der Getriebezahnäder führen. Dies ist die Hauptmotivation, nach einer Lösung mit Direktantrieb ohne Getriebe zu streben.

Ein weiterer Vorteil des getriebelosen Direktantriebs ist, dass das Getriebeöl und die Zusatzeinrichtungen wie Ölkühler, Ölpumpe, Öltemperaturüberwachung, Ölstandsüberwachung, Ölverrohrung und Ölauffangwanne (Vorsorge gegen Umweltverschmutzung im Fall einer Havarie) nicht mehr benötigt werden.

Nicht mehr auftreten können auch Energieverluste, die eine Drehmomentwandlung im Getriebe mit sich bringen. Ob jedoch der Direktantrieb tatsächlich Windenergie effizienter konvertiert, kann nicht eindeutig vorhergesagt werden. Der Grund dafür ist, dass Elektromaschinen mit kleinerer Drehzahl tendenziell niedrigere Wirkungsgrade aufweisen. Ein genauer Vergleich der Kennwerte realisier-



**Dr. Norbert Götschmann**  
Entwicklungsleiter  
der Lloyd Dynamowerke in Bremen  
T +49/421/4589-293  
F +49/421/4589-255  
goetschmann@LDW.de



ter Anlagen wäre hier für eine Beurteilung erforderlich.

Der Windanlagendesigner Sönke Siegfriedsen kommt in seinem Buch *25 Jahre Aerodyn – Den Wind einfangen*, zum Schluss: „Wir brauchen zum Beispiel direktgetriebene Generatoren, mit denen wir die Anlagen leichter und günstiger bauen können“.

## Stand der Technik

Neben den Windenergieanlagen mit Getriebe hat ein Hersteller von Anfang an konsequent Direktantriebe in großer Stückzahl küstenfern realisiert. Die Anlagengröße blieb dabei begrenzt auf 2 MW. Diese Windräder sind wegen des großen Gondeldurchmessers leicht von Anlagen mit Getrieben zu unterscheiden. Hintergrund ist, dass mit größer werdendem Luftspaltdurchmesser auch das Gegenmoment des Generators vergrößert wird. Das Generatorgegenmoment bildet sich aus dem Produkt des Luftspaltradius mit der tangential im Luftspalt wirkenden Magnetkraft. Mit dem Luftspaltdurchmesser wächst auch die Luftspaltfläche und somit die Tangentialkraft. Diese beiden Zusammenhänge führen zu nachfolgender Bestimmungsgleichung für das Gegenmoment des Generators:

$$T = \frac{d^2 \cdot \pi \cdot L \cdot \sigma_t}{2} \quad (2)$$

Dabei ist  $\sigma_t$  die flächenbezogene Tangentialkraftdichte der Magnetkräfte. Die daraus insgesamt resultierende Tangentialkraft ist mit dem Vektor  $F$  in der Abbildung oben links dargestellt.

Die gemäß Gleichung (1) überproportional wachsenden Antriebsmomente erfordern größere Luftspaltdurchmesser in klassischen Generatoren. Da das Generatorgewicht etwa quadratisch mit dem Generatordurchmesser ansteigt,

gerät man mit Lösungen nach dem Stand der Technik bei den Leistungsgrößen ab 6 MW an die Grenze des technisch Machbaren bei Kran- und Turmtraglasten.

## Magnetflussverstärkung

Um im Luftspalt eine möglichst große Tangentialkraftdichte zu erzeugen, muss an möglichst vielen Rotorpolen ein möglichst starkes Magnetfeld vorhanden sein. Hierfür werden Magnete aus Neodym-Eisen-Bor mit einer Remanenz verwendet, die auch bei hohen Temperaturen noch oberhalb von 1,2 Tesla liegt. Das Magnetfeld dieser bereits sehr starken Magnete wird noch weiter durch Flusskonzentration in Sammleranordnung verstärkt (Abbildung unten).

Auf der Statorseite des Luftspaltes wird der Magnetfluss im Aktivblech quer zur Bewegungsrichtung abgelenkt und führt um die Statorwicklung herum. Daher stammt der Begriff „Transversalflussmaschine“ (TFM). Die Magnetflussrichtungen konventioneller, drehender Elektromaschinen liegen parallel zur Ebene, die senkrecht zur Drehachse ausgerichtet ist. Sie verlaufen nicht quer zur Bewegungsrichtung, wie dies bei der TFM abschnittsweise der Fall ist.

Diese grundsätzlich geänderte Magnetflussführung hat drei wesentliche Vorteile hinsichtlich der Erzeugung großer Drehmomente:

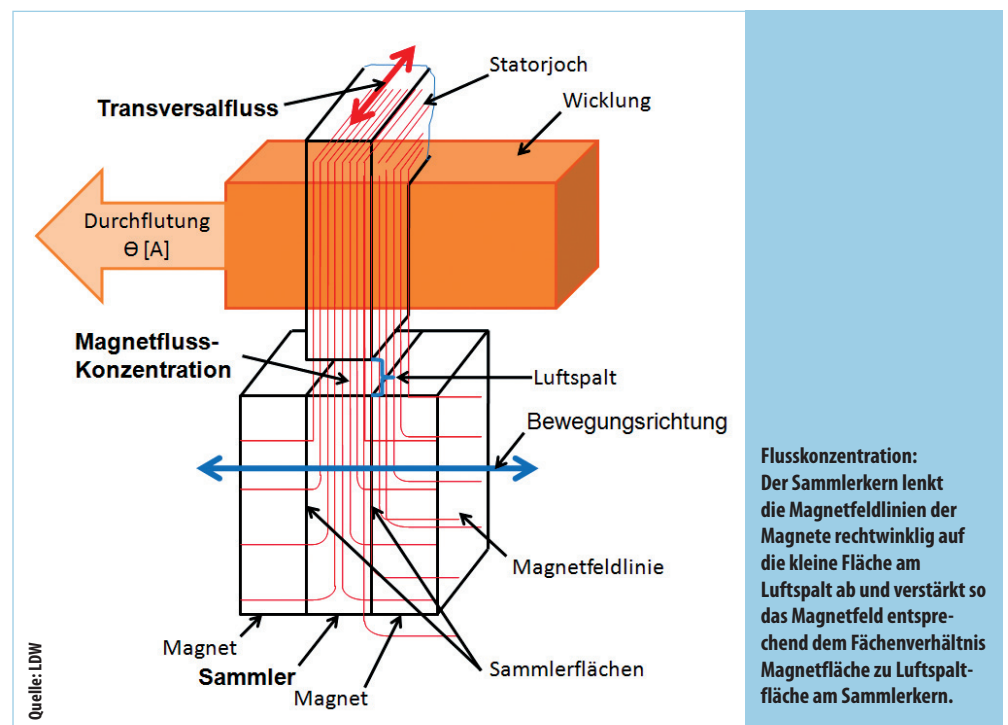
- Wickelkupfer und Aktivblech konkurrieren nicht in der Polteilung. Große Kupferquerschnitte und Windungszahlen kön-

nen in einem Bauvolumen außerhalb der Polteilung untergebracht werden. Große Durchflutungen sind somit möglich, die den starken Magnetfeldern des Rotors entsprechende Feldstärken gegenüberstellen.

- Das von Kupfer frei gehaltene Bauvolumen in der Polteilung ermöglicht gleich große Polzahlen, wie sie die Sammleranordnung des Läufers ermöglicht. Hohe Polzahlen sind das Kennzeichen langsam laufender Elektromaschinen mit großem Drehmoment.
- Die Wicklung der TFM hat keinen Wickelkopf. Außerhalb der Pollücken ist die Wicklung überall mit dem kühlenden Aktivblech elektrisch isoliert verklebt. Die Aktivbleche sind wiederum mit dem Aluminiumgehäuse verbunden, in welchem die Kühlwasserkanäle liegen (siehe Abbildung auf Seite 44 oben rechts). Im Gegensatz dazu benötigen Maschinen mit Wickelkopf einen zusätzlichen Kühlluftstrom, für den zusätzliche Antriebsenergie verloren geht.

Weiterer Vorteil: Bei der TFM entfallen die Widerstandsverluste, die bei konventionellen Maschinen im Wickelkopf entstehen.

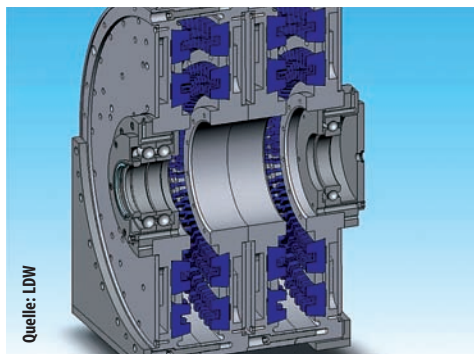
Der Erwärmungslauf mit dem gebauten TFM-Generator ergab: Bei einer Kühlwassertemperatur von 19 °C stellte sich bei Dauerbetrieb mit Nennstrom die Wicklungstemperatur bei 30 °C ein. Da für die Wicklung und die Magnete Temperaturen bis 120 °C zulässig sind, hat der Generator eine große thermische Reserve. >





Quelle: Andreas Caspari / LDW

**Scheibenläufer:** Je Magnetspur sind 140 Sammlerkerne und 140 Magnete eingeklebt.



Quelle: LDW

**Keine Kühlluft nötig:** Aktivbleche im Aluminiumgehäuse mit Kühlwasserkanälen führen Wärme ab.

## Überwundene Probleme

Die Transversalflusstechnologie mit Permanentmagneterregung in Sammleranordnung ist schon jahrzehntelang in Fachkreisen bekannt und diskutiert worden. Zwei wesentliche Probleme haben bisher die breite praktische Umsetzung verhindert:

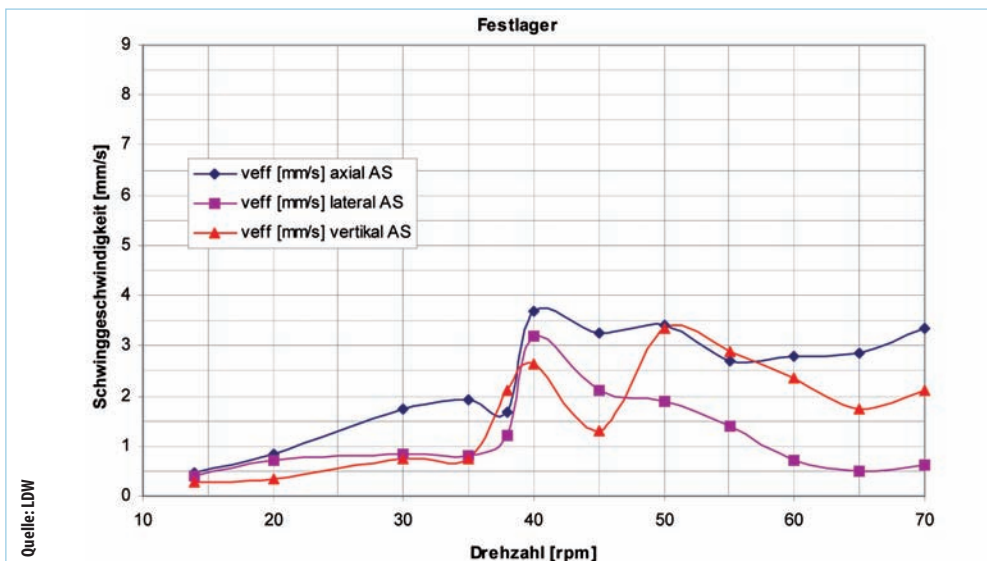
- Wirbelstromverluste führten zu inakzeptablen Wirkungsgraden.
- Die sehr großen Kraftdichten, gepaart mit nahezu rechteckförmigen Rastmomenten verursachen Strukturschwingungen, welchen die Maschinenstrukturen nicht gewachsen waren.

Mit einem geklebten Metallschichtverbund wurde einerseits die gute Wärmeleitfähigkeit und die große Struktursteifigkeit von Metallen genutzt und gleichzeitig durch eine isolierende Klebschicht eine unüberwindbare Barriere für Wirbelströme geschaffen. Das zwischen den

Aktivblechen eingebrachte schwingungsdämpfende Polymer (schwarze Flächen in der Abbildung auf Seite 42) versteift den Stator zusätzlich. Bei der Nenndrehzahl von 55 U/min lagen sämtliche Schwinggeschwindigkeiten unterhalb von 3 mm/s, das heißt der in der Norm (IEC 34-14) vorgegebene Grenzwert von 2,5 mm/s wurde fast erreicht. Die Berücksichtigung axialer Eigenschwingungsformen der Statoren wird das Ergebnis zukünftig weiter verbessern.

In jedem Magnetkreis sind zwei Luftspalte angeordnet, damit sich die Kraftamplituden außerhalb der Maschinenstruktur gegenseitig aufheben. Für diese Anordnung ist der Scheibenläufer besonders geeignet. Die Magnetspuren werden durch Klebschrumpfen eingespannt, was eine sehr hohe Strukturfestigkeit garantiert. Bei radialer Anordnung ist dies nicht möglich.

Verbliebene Welligkeiten im Drehmoment werden mit einer neuen Umrichtertechnik eliminiert, die vom Institut für Antriebe und Leistungselektronik Bremen (IALB) im Rahmen des Projektes entwickelt wurde.



Quelle: LDW

**Schwinggeschwindigkeiten am Festlagergehäuse:** Bei mehr als 50 U/min nehmen radiale und axiale Schwingungen ab.

## Ergebnisse

Mit dem gebauten Transversalflussgenerator ist die praktische Realisierbarkeit dieser Technik nachgewiesen worden. Wie bereits im Abschnitt „Stand der Technik“ ausgeführt, lassen sich große Drehmomente durch große Luftspaltdurchmesser generieren. Für einen Technologievergleich ist daher der Vergleich der tatsächlich zur Momentbildung erzeugten Tangentialkräfte, bezogen auf das Maschinengewicht, besser geeignet. Für klassische Maschinen werden Werte bis 6 kN pro Tonne Maschinengewicht erreicht.

Die gebaute TFM hat ein Gewicht von 1,2 Tonnen und bringt eine Tangentialkraft von 27,6 kN auf. Somit liegt der gewichtsspezifische Wert bei 23 kN/Tonne. Mit der TFM lässt sich somit das Maschinengewicht bei gleicher Tangentialkraft auf nahezu ein Viertel reduzieren. Konkret hieße das: Das Gewicht eines direkt angetriebenen 6-Mega-Watt-Generators ließe sich mit der vorgestellten Technik um ca. 270 Tonnen reduzieren.

Die Wicklungen der TFM sind vollständig im Polymer eingegossen und zusätzlich vor Seeluft von einem Gehäuse mit dem Schutzgrad IP54 geschützt. Die Magnete sind zwischen Metallringe eingefasst und am Luftspalt mit einer Epoxidharzschicht versiegelt. Dieser doppelte Schutz der Komponenten macht die Technik für die Offshore-Anwendung sicher. Auch die Reduzierung auf eine Baukomponente hinter dem Rotorlager der Windenergieanlage würde besonders offshore erhebliche Montagekosten sparen.

## Ausblick

Der nächste Meilenstein soll ein Generator für eine direktgetriebene Windenergieanlage mit 1 MW Leistung sein. In diesem Entwicklungsschritt ist geplant, bereits einen Windanlagenbauer einzubinden, bei dem der Generator im realen Einsatz getestet wird. Mit weiteren Industriepartnern zusammen soll dieses Entwicklungsprojekt realisiert werden. Derzeit gibt es jedoch noch keinen Projektförderer.

## Danksagung an den Projektförderer

Der Bau des 8,7-kNm-TFM-Generatorsystems wurde von der Bremer Investitions-Gesellschaft (BIG) im Rahmen des Landesprogramms PFAU gefördert. Die Lloyd Dynamowerke (LDW) danken der BIG für diese Förderung. ■

Weiterführende Infos auf [energy20.net](http://energy20.net):
[more @ click](http://energy20.net) **E2118451**