

ENTWURF EINES WINDKRAFTGENERATORS

I. Verde, G. Bühler

1 EINLEITUNG

Die Nutzung der Windenergie nahm in den letzten Jahren nicht zuletzt durch die Förderprogramme der Länder und des Bundes sowie durch die Verabschiedung des Stromeinspeisungsgesetzes einen enormen Aufschwung und steht an der Schwelle zur großtechnischen Anwendung in Form ganzer Windparks zu Lande sowie neuerdings auch im Offshore-Bereich. Die Technik der Windkraftanlagen ist relativ jung und bietet noch Potenzial zur Weiterentwicklung und Optimierung. Angesichts der zu erwartenden politischen Vorgaben zur Umweltentlastung besitzt der Strom aus Wind momentan sehr günstige technische und wirtschaftliche Perspektiven, weswegen dieser Energie eine hohe Priorität beizumessen ist. Strom aus Windenergie wird erzeugt, indem der Wind eine Turbine dreht, die ihrerseits (in der Vergangenheit über ein Getriebe, in zunehmendem Maße jedoch auch getriebeles) einen Generator antreibt. Dabei wird der Wind durch die Turbine abgebremst und gibt einen Teil seiner Energie an der Generator ab.

Zur Zeit sind auf dem europäischen Markt Windkraftanlagen (WKA) mit einer elektrischen Nennleistung von 500 bis 1500 kW und einem Rotordurchmesser zwischen 40m und 65m präsent. Als Generatoren für Windkraftanlagen sind mehrere Varianten möglich: doppelt gespeiste Asynchronmaschinen, permanentmagnet- oder elektrisch erregte Synchronmaschinen in axialer oder radialer Bauweise sowie permanenterregte Asynchronmaschinen.

2 VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER AUSLEGUNGEN

Am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen wurde eine permanentmagneterregte Synchron-Radialflussmaschine (RFPM) mit einer elektrischen Nennleistung von 800kW bei einer Nenndrehzahl von 25 U/min für den Einsatz in einer getriebelesen WKA ausgelegt. Zwar erreichen Axialflussmaschinen eine höhere volumenspezifische Kraftdichte, jedoch werden die Risiken beispielsweise beim Handling mit solch großen permanentmagnetbesetzten Scheiben (Durchmesser zwischen 3m und 5m) während des Zusammenbaus als zu groß angesehen, um ein solches Konzept gerade für eine Erstausslegung zu rechtfertigen.

In Anlehnung an die Wünsche des Auftraggebers bzgl. der Leistung ($P_{el} = 800\text{kW}$), des Drehzahlbereiches ($n = 9..27$ U/min), einer Mindestfrequenz von 12 Hz sowie einem aus Transportgründen maximalen Außendurchmesser der fertigen Maschine von 3.8m wurden drei unterschiedliche Varianten gerechnet und zur Auswahl gestellt. Bei allen Ausführungen handelt es sich um permanentmagneterregte Radialflussmaschinen, jedoch mit unterschiedlichen Nutformen und sich daraus ergebenden weiteren geometrischen Abmessungen.

Die ersten beiden Varianten unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Nutform (Variante 1 offen, Variante 2 geschlossen, siehe **Bild 1**).

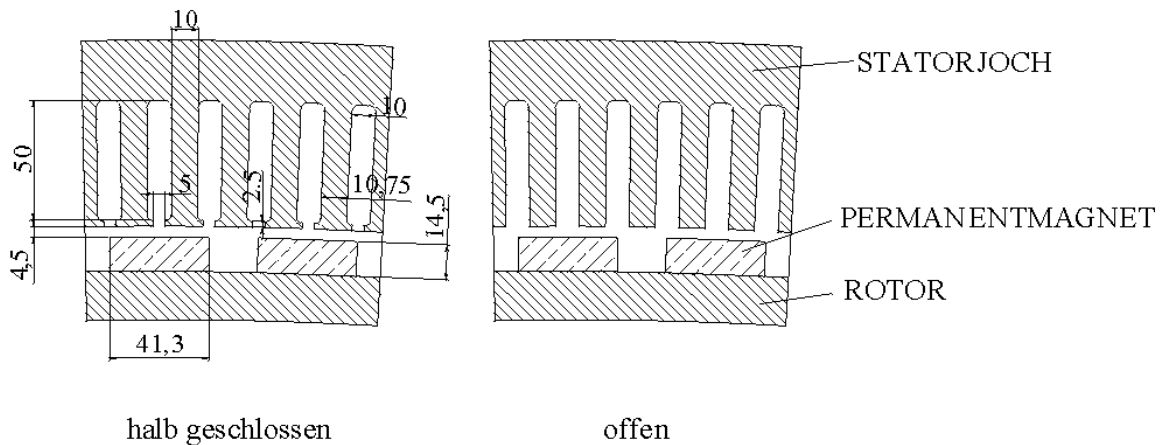


Bild 1: Nutgeometrie der Varianten 'halbgeschlossen' und 'offen'

Erstere ermöglicht den Einsatz von vorgefertigten Formspulen aus Profildraht, welche in der Herstellung zwar teurer als Träufelwicklungen sind, jedoch aufgrund des höheren Füllfaktors eine höhere Durchflutung bei gleicher Strombelastung des Kupfers erlauben. Dies führt bei ansonsten unveränderter Nutgeometrie gegenüber der Variante 2 zu höheren Flussdichten im Eisen mit der Folge höherer Verluste bzw. sinkendem Wirkungsgrad. Ein weiterer Nachteil offener Nuten ist die erhöhte Momentenwelligkeit, die u.U. aus Gründen der Schwingungsanregung und Geräuschemission vermieden bzw. durch Schrägung vermindert werden muss. Etwas günstiger verhält sich hier die Version mit halb geschlossenen Nuten, allerdings mit dem Nachteil eines geringeren Füllfaktors aufgrund der in diesem Fall nötigen Träufelwicklung mit Runddraht.

Um die Forderung nach einer Mindestfrequenz von 12 Hz bei 9 U/min zu erfüllen, fiel die Wahl auf 3 Phasen x 84 Polpaare. Dies führt bei dem gewählten Bohrungsdurchmesser von 3.32 m einerseits zu moderaten Polteilungen ($\tau_p = 62\text{mm}$, siehe nachstehende Rechnung) sowie andererseits einer Vielzahl von Verschaltungsmöglichkeiten der Einzelspulen angesichts der Anzahl von möglichen Divisoren (2, 3, 4, 6, 7, 12, 14, 21, 28, 42 und 84). Dies hat entscheidenden Einfluss auf die Auswahl des bzw. der geeigneten Netzeinspeise-Wechselrichter, wenn z.B. aus Redundanzgründen gewissermaßen zwei halbe Generatoren jeweils mit eigenem Wechselrichter realisiert werden müssen.

Polpaare	$p = 84$
Bohrungsdurchmesser	$D = 3.320\text{m}$
Polteilung	$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 3320\text{mm}}{2 \cdot 84} = 62.08\text{mm}$
Aus	$n = \frac{f}{p} \Rightarrow f = n p$

lassen sich die Generatorfrequenzen errechnen, welche in **Tab. 1** für die charakteristischen Werte (Minimum, Nennpunkt, Maximum) zusammengestellt sind.

Tab. 1: Generatorfrequenz in Abhängigkeit von der Drehzahl

Drehzahl [U/min]	Generatorfrequenz [Hz]
9	12.6
25	35
27	37.8

Der erste Teil der **Tab. 2** enthält die Vorgaben (Leistung, Drehzahl, Drehmoment) bzw. die sich aus dem geforderten Generatordurchmesser ergebenden Größen wie Bohrungsdurchmesser und Schubkraft. Kupferfüllfaktor, Polpaarzahl und Durchflutung dienen als Eingabegrößen für die Feldberechnung, deren Ergebnisse im zweiten Tabellenteil zusammengestellt sind. Da das verwendete zweidimensionale FEM-Programm lediglich Feldgrößen für 1mm Objektiefe liefert, wurden die Ergebnisse auf die tatsächlichen Verhältnisse umgerechnet. Es wird deutlich, dass beide Varianten (Nr.1 und Nr.2) das geforderte Drehmoment erreichen allerdings mit erwartungsgemäß unterschiedlicher Maximalinduktion im Zahn ($B_{max1} = 2.03T$ bzw. $B_{max2} = 1.87T$). In den **Bildern 2 und 3** sind die zugehörigen Feldlinienverläufe dargestellt. Vergleicht man die beiden ersten Varianten, so fällt zunächst auf, dass aufgrund der doppelten Durchflutung im ersten Fall die aktive Länge, d.h. die Länge des Statoreisens etwa halbiert werden kann (406mm gegenüber 890mm). Unter der zugegebenermaßen optimistischen Annahme eines erzielbaren Füllfaktors von $k_{Cu} = 0.8$ für Formspulen aus rechteckigem Profildraht werden in beiden Fällen moderate Stromdichten von etwa $3.9 \frac{A}{mm^2}$ erreicht.

Tab. 2: Charakteristische Größen für drei unterschiedliche Generatorauslegungen

		Daten		
		Variante Nr.1	Variante Nr. 2	Variante Nr. 3
Nutform		offen	halb geschl.	offen
mech. Leistung	$P_{elektr.}$ [kW]	800	806	806
Drehzahl	n [U/min]	25	25	25
erforderl. Drehmoment	M_I [kNm]	305	325	325
erforderl. Schubkraft	F_I [kN]	184	196	196
Bohrungsdurchmesser	D [m]	3.32	3.32	3.32
Polpaarzahl	p	84	84	84
Kupferfüllfaktor	k_{Cu}	0.8	0.4	z.B. 0.8
Durchflutung	Θ_{smax} [A]	2421	1210	1261
Stromdichte	S_{rms} [$\frac{A}{mm^2}$]	3.94	3.93	4.1

FEM – Ergebnisse				
Schubkraft pro mm Statorlänge und Polpaar	$F_x \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$	5.39	2.65	2.65
Gesamtkraft	$F \text{ [kN]}$	184	198.11	198.11
Drehmoment	$M_2 \text{ [kNm]}$	305.4	328.8	328.8
max. Flussdichte im Zahn	$B_{max} \text{ [T]}$	2.03	1.87	1.79
Statorlänge	$L \text{ [m]}$	0.406	0.890	0.890
Kraftdichte	$F' \left[\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right]$	43.45	21.34	21.34

In der dritten Variante wurde untersucht, inwieweit die Durchflutung gegenüber Nr.2 erhöht werden müsste, um das gleiche Drehmoment zu erreichen. Es zeigt sich, dass dabei die Stromdichte im Kupfer lediglich von $3.93 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ auf $4.1 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ steigt. Die Momentenwelligkeit lässt sich möglicherweise auch durch magnetisch leitende Nutverschlusskeile minimieren, allerdings besteht wenig Erfahrung beim Einsatz solcher Bauteile in Bezug auf deren Langzeitstabilität.

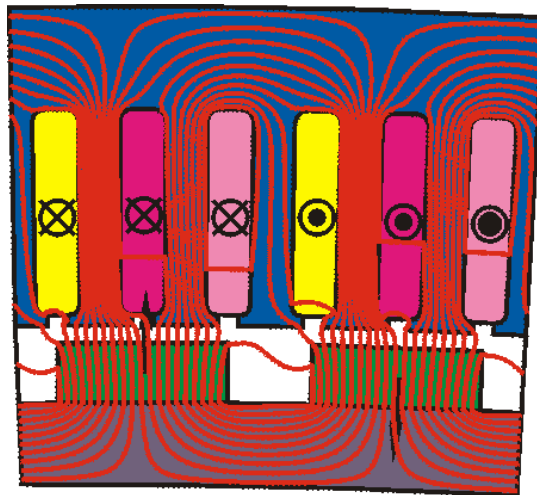


Bild 2: Feldverlauf in einem Ausschnitt der RFPM mit halbgeschlossenen Nuten (dargestellt sind zwei Pole)

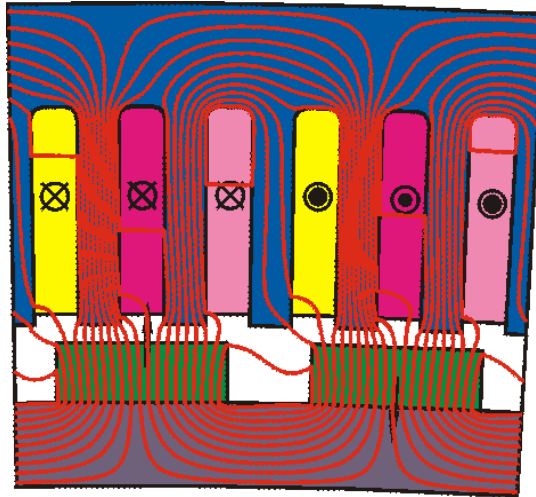


Bild 3: Feldverlauf in einem Ausschnitt der RFPM mit offenen Nuten (dargestellt sind zwei Pole)

3 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Auslegung konnte gezeigt werden, dass eine permanentmagneterregte Synchron-Radialflussmaschine hinsichtlich der Abmessungen, der Materialkosten sowie des Entwicklungsrisikos ein geeignetes Generatorkonzept für den Einsatz in WKA darstellt. Da sich der Entwurf lediglich auf die Auslegung des aktiven Teils beschränkt, nicht jedoch auf die tragende Struktur, so kann dennoch angenommen werden, dass das Radialflusskonzept bei derartigen Generatordimensionen weniger Risiken beim Zusammenbau sowie Betrieb in einer WKA in sich birgt.