

# Volle Kraft voraus!

## Permanentmagnet-Wellengeneratoren senken Kraftstoffverbrauch bei Schiffen

Jussi Puranen

*Die Stromerzeugung auf Schiffen findet traditionell mit Hilfsaggregaten oder mit Wellengeneratoren statt, welche direkt mit dem Hauptantrieb verbunden sind. Doch zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs werden immer öfter direktangetriebene Permanentmagnet-Wellengeneratoren eingesetzt.*

Jussi Puranen ist Forschungs- und Entwicklungsleiter bei The Switch in Finnland

Hilfsaggregate, wie sie im klassischen Sinne zur Stromerzeugung auf Schiffen eingesetzt werden, bestehen in der Regel aus einem Viertakt-Dieselmotor mit konstanter Drehzahl, ausgestattet mit einem herkömmlichen Asynchron- oder Synchron-generator. Der Hauptvorteil dieses Konzepts liegt darin, dass durch den Betrieb bei konstanter Drehzahl der Generator eine konstante Spannung und Frequenz in das elektrische Netzwerk des Schiffes einspeist und dadurch keine Leistungselektronik zur Spannungs- und Frequenzumwandlung erforderlich ist. Des Weiteren ist das Konzept unabhängig vom Schiffsantrieb, sodass auch beim Manövrieren und beim Einlaufen in den Hafen Strom erzeugt werden kann. Die größten Nachteile sind, dass die Hilfsaggregate mehr Platz als Wellengeneratoren benötigen und einen höheren Wartungsbedarf haben. Darüber hinaus können sie auch nicht ohne teures Zusatzequipment, z. B. Vorheizern zur Viskositätsreduzierung, mit günstigerem Schweröl betrieben werden.

Während der letzten Jahrzehnte sind Wellengenerator-Systeme zu einer gängigen Option in der Schiffbauindustrie geworden, hauptsächlich aufgrund von steigenden Energiekosten und verschärften Emissionsvorgaben. Bei Handelsschiffen ist die gängigste Lösung zur primären Stromerzeugung ein langsamlaufender Zweitakt-Dieselmotor, der ohne Untersetzungsgetriebe direkt mit der Propellerwelle verbunden ist. Im Vergleich zu einem Viertakt-Dieselmotor bietet ein Zweitakt-Dieselmotor einen höheren thermischen Wirkungsgrad, welcher einen geringeren Kraftstoffverbrauch ermöglicht. Die Tatsache, dass ein Zweitakt-Dieselmotor mit Schweröl betrieben werden kann, stellt einen weiteren Vorteil dar, da Schweröl günstiger als Schiffsdiesel ist.

### Das Wellengenerator-System

Der Verringerung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs wird in der Zukunft eine wichtige Bedeutung zukommen – nicht nur wegen

steigender Kraftstoffkosten, sondern auch wegen der verschärften Emissionsgrenzwerte für Schiffe, z. B. die IMO Tier III-Grenzwerte, welche Anfang 2016 in Kraft getreten sind. Es gibt verschiedene Ansätze, um die neuen Vorgaben zu erfüllen, wie die Verwendung von dualen Brennstoffsystemen, NOx Verringerern oder Abwärmerückgewinnungssystemen. Das wichtigste Ziel bleibt jedoch den Wirkungsgrad zu steigern, denn eine geringere Kraftstoffverbrennung führt automatisch zu geringeren Emissionen.

Ein typisches Wellengenerator-System besteht aus einem elektrisch erregten Synchron-generator, welcher mechanisch mit der Hauptantriebswelle und elektrisch mit dem Schiffsnetzwerk verbunden ist, entweder direkt oder durch einen Frequenzumrichter. Die mechanische Verbindung von Generator und Antrieb erfolgt entweder durch ein Tunnelgetriebe, welches dazu verwendet wird, die Generatorgeschwindigkeit zu erhöhen, oder ohne Getriebe durch eine direkte Verbindung des Generators an die Welle.



Im ersten Fall hat der Generator aufgrund des niedrigeren Drehmoments geringere Abmessungen. Der Nachteil dieser Lösung ist das benötigte Getriebe, welches die Schadensanfälligkeit, die Komplexität sowie den Wartungsbedarf erhöht. Außerdem sind Getriebe relativ kostenintensive Komponenten, die ebenfalls zum Verlust von Energie führen, da sie aufgrund der Reibung in den Getriebekontakten 2 bis 3 % der mechanischen Eingangsleistung in Wärme umwandeln. Dies reduziert nicht nur den Gesamtwirkungsgrad des Systems, sondern es erhöht auch die Wärmebelastung, welche zu einem höheren Bedarf an Kühlleistung führt.

Bei einer direkten Verbindung des Wellengenerators mit der Hauptantriebswelle entfällt die Notwendigkeit für ein Getriebe und dementsprechend auch alle mit dem Getriebe verbundenen Herausforderungen. Bei dieser direktangetriebenen Lösung läuft der Generator mit derselben langsamen Geschwindigkeit wie der Hauptantrieb, welche bei einem Zweitakt-Dieselmotor normalerweise unterhalb von  $100 \text{ min}^{-1}$  ist. Der direktangetriebene Wellengenerator liefert ein höheres Drehmoment als das Konzept mit Tunnelgetriebe. Dies führt zu größeren Maschinenabmessungen, da sich die Größe der elektrischen Maschine immer proportional zum Drehmoment verhält. In den meisten Fällen bedeutet dies, dass eine Verwendung von Standardprodukten nicht mehr möglich ist und maßgeschneiderte Konstruktionen benötigt werden.

## Elektrisch erregte Synchrongeneratoren

Elektrisch erregte Synchrongeneratoren sind seit mehr als einem Jahrhundert eine Standardlösung zur Energieerzeugung auf dem Festland, hauptsächlich aufgrund ihrer

Effizienz und weil sie eine wirksame Kontrolle der netzseitigen Blindleistung ermöglichen. Der größte Nachteil von netzgekoppelten Synchrongeneratoren ist, dass diese jedoch nur mit konstanter Geschwindigkeit laufen können. Die Drehzahl wird hierbei von der Netzfrequenz bestimmt und liegt typischerweise bei 50/60 Hz. Bei der klassischen Energieerzeugung auf dem Festland spielt dies aufgrund der Art der primären Energiequellen wie Wärme oder Wasser nur eine untergeordnete Rolle. Da Wellengeneratoren aber idealerweise Systeme sind, die mit variabler Geschwindigkeit laufen, gibt es oftmals Situationen, wo ein geregelter Betrieb des Hauptantriebs notwendig wäre, um z. B. die Kraftstoffkosten zu reduzieren oder einen Betrieb bei geringer Geschwindigkeit zu ermöglichen.

Da die Geschwindigkeit der Hauptantriebswelle wegen der direkten Netzanbindung des Generators konstant gehalten werden muss, kann eine Veränderung des Antriebsschubs nur durch z. B. die Verwendung eines Verstellpropellers vorgenommen werden. Eine Veränderung der Propellerdrehzahl ist nicht länger möglich. Während der drehzahlgeregelte Verstellpropeller eine variable Schubkraft zur Verfügung stellt, die den Betrieb des Schiffes bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen und mit unterschiedlicher Reisegeschwindigkeit ermöglicht, erzielt er jedoch keinen optimalen Wirkungsgrad. Dies ist auf die hohen Leerlaufverluste des Verstellpropellers bei Nenngeschwindigkeit zurückzuführen und bedeutet, dass trotz der reduzierten Anstellwinkel, welche für den Betrieb bei geringeren Geschwindigkeiten benötigt werden, hohe Verluste beim Propeller auftreten, die folglich den spezifischen Kraftstoffverbrauch erhöhen.

Ein maximaler Wirkungsgrad kann nur durch den Betrieb des Systems im Kombi-

nator-Modus erzielt werden. Hierbei werden sowohl Anstellwinkel als auch Geschwindigkeit des Propellers ständig variiert, je nach Wetterbedingungen und Geschwindigkeit des Schiffes. Je geringer der Geschwindigkeitsbedarf, desto größer sind die Vorteile des Kombinator-Modus gegenüber einem System mit drehzahlgeregeltem Verstellpropeller. Der Kombinator-Modus hat sich in den vergangenen Jahren vermehrt durchgesetzt, da er den Kraftstoffverbrauch minimiert, während er gleichzeitig eine hohe Flexibilität beim Betrieb des Schiffes bietet.

Offensichtlich kann dieser Betriebsmodus nicht bei direkt an das Netzwerk angeschlossenen Wellengeneratoren angewendet werden, da diese einen Betrieb bei konstanter Drehzahl erfordern. Zur Überwindung dieses Problems werden heutzutage immer mehr Wellengeneratoren über einen Frequenzumrichter an das Schiffsnetzwerk angeschlossen, sodass auch ein Betrieb mit variabler Drehzahl möglich ist.

Die ersten drehzahlgeregelten Wellengenerator-Systeme verwendeten Thyristorregler, welche eine geringe Leistungsfähigkeit hatten und hohe Störungen auf der Stromnetzseite hervorgerufen haben. Heutzutage sind alle neuen drehzahlvariablen Wellengenerator-Systeme mit Frequenzumrichtern, die IGBT (Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode)-Technologie verwenden, ausgestattet, da diese eine sinusförmige Ausgangsspannung aufweisen und einen Wirkungsgrad von bis zu 97 % erreichen können.

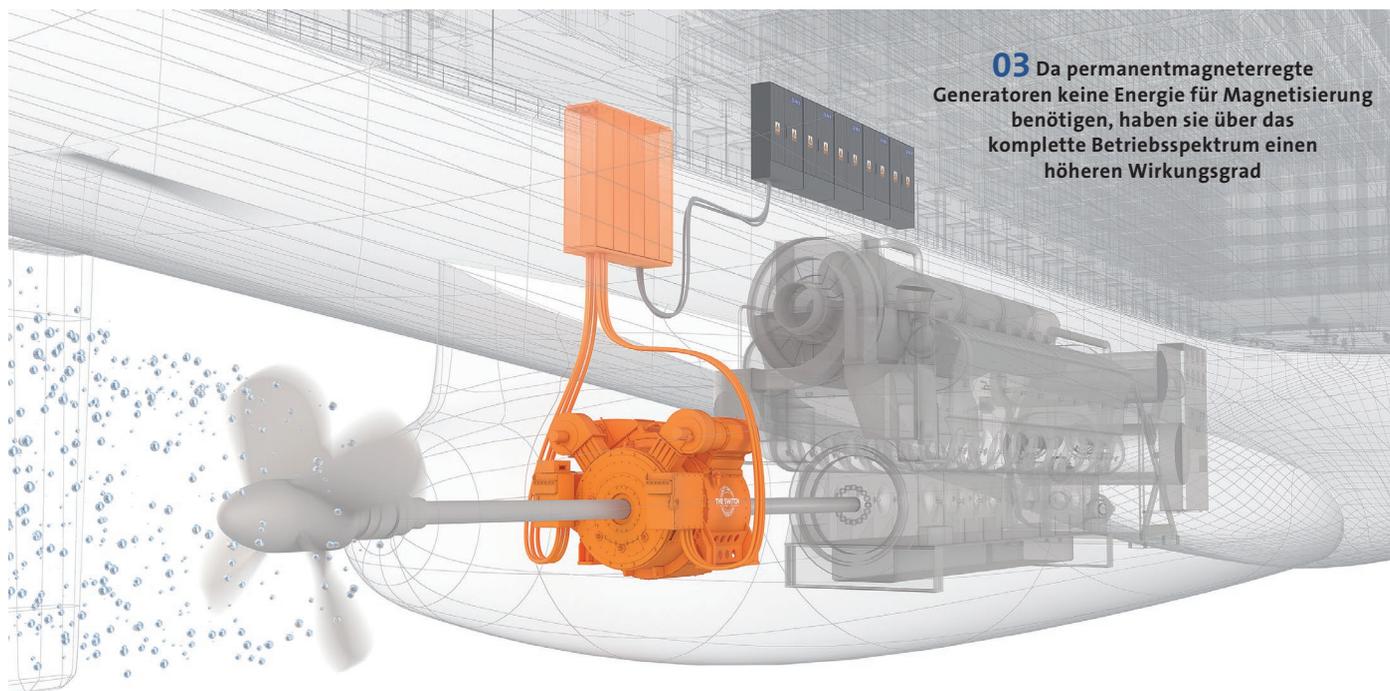
Allerdings ist ein langsam-laufender elektrisch erregter Synchronwellengenerator im Hinblick auf den Generator-Wirkungsgrad weit von der optimalen Lösung entfernt, da dieser aufgrund seines Betriebs bei geringen Drehzahlen einen relativ geringen Wirkungsgrad hat. Bei der traditio-

**01** Testaufbau von 1,5 MW direktangetriebenen, permanentmagneterregten Wellengeneratoren



**02** Der Rotor eines permanentmagneterregten Wellengenerators ist zum Großteil hohl, was zur Verringerung des Trägheitsmoments und der Rotationsmasse des Antriebsstrangs beiträgt





**03** Da permanentmagneterregte Generatoren keine Energie für Magnetisierung benötigen, haben sie über das komplette Betriebssystem einen höheren Wirkungsgrad

nellen Energieerzeugung auf dem Festland im Nenndrehzahlbereich können Synchrongeneratoren einen Wirkungsgrad von bis zu 98-99 % erzielen. Bei Wellengeneratoranwendungen im niedrigen Drehzahlbereich liegt ihr Wirkungsgrad jedoch nur zwischen 92 und 94 %. Beim Einsatz eines Frequenzumrichters für den Betrieb im Kombinator-Modus kann der Gesamtwirkungsgrad bei der Umwandlung von elektrischer Energie sogar bis unter 90 % sinken. Da Kraftstoffkosten kontinuierlich ansteigen, wird stets nach einer noch effektiveren Lösung geforscht. Eine der vielversprechendsten Lösungen ist, den elektrisch erregten Generator mit einem deutlich effizienteren Permanentmagnet-Generator zu ersetzen.

## Permanentmagneterregte Wellengeneratoren

Permanentmagnet-Maschinen sind seit Jahrzehnten bekannt, typische Anwendungen für kleine elektrische Motoren sind z. B. Servomotoren. Aufgrund der Erfindung von Neodym-Magneten zu Beginn der Achtzigerjahre haben sie in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten ebenfalls ihren Durchbruch in Hochleistungsanwendungen erzielt. Neodym-Magnete haben eine hohe Energiedichte, die es ermöglicht, hocheffiziente und leistungsstarke Generatoren und Motoren im Megawattbereich zu bauen. Heutzutage überschreiten die größten Permanentmagnet-Generatoren bereits 10 MW in Leistung und die Einsatzbereiche reichen von Windenergiegewinnung, Schiffsantrieben und Aufzügen bis zu Hybridautos und vielen anderen Anwendungen. Permanentmagnet-Generatoren sind für langsamlaufende Anwendungen geeignet, bei denen Asynchronmaschinen aufgrund ihrer ge-

ringen Leistungsfähigkeit und niedrigen Leistungsfaktors nicht eingesetzt werden können.

Das bedeutet, dass es bisher für langsamlaufende Anwendungen nur möglich war, elektrisch erregte Synchrongeneratoren einzusetzen. Dies war die Standardlösung für die Stromerzeugung auf Schiffen, einschließlich Wellengeneratoren und Aggregaten. Die Konstruktion von elektrisch erregten Synchrongeneratoren für langsamlaufende Anwendungen wie Wellengeneratoren führt jedoch zu einem geringen Energieumwandlungswirkungsgrad, welcher aber wegen der steigenden Kraftstoffpreise und strikterer Umweltbestimmungen immer kritischer wird. Der Betrieb bei niedriger Drehzahl führt zu einer schwachen elektromagnetischen Induktion in den Generatorwicklungen, welche durch das Hinzufügen zahlreicher zusätzlicher Spulenwindungen zur Rotorwicklung kompensiert werden muss, um eine ausreichende magnetische Induktion zu erzeugen. Eine große Anzahl von Spulenwindungen in der Rotorwicklung führt demzufolge zu einem hohen elektrischen Widerstand. Während der Strom durch die Rotorwicklungen fließt, werden große Strom-Wärme-Verluste generiert, die zu einem geringen Wirkungsgrad führen. Diese Verluste müssen ebenfalls von der Maschine abgeführt werden und dementsprechend wird eine Kühlkapazität benötigt.

In einem permanentmagneterregten Generator wird das Magnetfeld schlichtweg durch am Rotor befestigte Permanentmagnete hergestellt. Das heißt, dass weder Rotorwicklungen noch Magnetisierungsvorrichtungen benötigt werden. Das Fehlen der Rotorwicklungen und der damit verbundenen Energieverluste gibt Permanentmagnet-Generatoren drei entscheidende

Vorteile gegenüber elektrisch erregten Synchrongeneratoren: eine deutlich einfachere Konstruktion, einen überragenden Wirkungsgrad sowie eine geringe Rotorträgheit und ein geringes Rotorgewicht.

Permanentmagnet-Maschinen gelang der Durchbruch bereits in industriellen Hochleistungsanwendungen, z. B. in Pumpen, Lüftern, Förderbändern, in der dezentralen Energieerzeugung – Wind, Gezeiten, Kleinwasserkraftanlagen –, in Anwendungen mit begrenztem Platzangebot, Gewichtseinschränkungen oder beschränktem Trägheitsmoment (Aufzüge, Servomotoren, Hybridautos etc.). Während sie in Anwendungen für Schiffsantriebe bereits an Popularität gewonnen haben, ist ihnen bei der Stromerzeugung auf Schiffen jedoch erst jetzt der Durchbruch gelungen.

Der Einsatz von permanentmagneterregten Wellengeneratoren mit Frequenzumrichtern garantiert eine hohe Flexibilität bei der Optimierung des Antriebs und der Propellerleistungsfähigkeit, da sowohl die Geschwindigkeit als auch der Anstellwinkel des Propellers beim drehzahlregulierten Verstellpropeller mit dem Kombinator-Modus unabhängig variiert werden können. Die optimale Kombination von Propeller-geschwindigkeit und -anstellwinkel reduziert den spezifischen Kraftstoffverbrauch auf ein Minimum. Sogar bei Navigation auf hoher See kann beim drehzahlregulierten Verstellpropeller eine Absenkung der Motordrehzahl bei gleichzeitiger Verwendung einer geringeren Propellersteigung zu drastischen Einsparungen im Kraftstoffverbrauch führen.

Foto: Aufmacher Fotolia

[www.theswitch.com](http://www.theswitch.com)