

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Kracht, Peter; Bard, Jochen; Panahandeh, Bahram

Auswirkungen der Anlagenkonzepte, Skalierung und Betriebsführungsstrategie auf Generatorsysteme für Wellen- und Meeresströmungsenergieanlagen

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103619>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kracht, Peter; Bard, Jochen; Panahandeh, Bahram (2011): Auswirkungen der Anlagenkonzepte, Skalierung und Betriebsführungsstrategie auf Generatorsysteme für Wellen- und Meeresströmungsenergieanlagen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): *Wasserkraft mehr Wirkungsgrad + mehr Ökologie = mehr Zukunft*. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 45. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 315-324.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Auswirkungen der Anlagenkonzepte, Skalierung und Betriebsführungsstrategie auf Generatorsysteme für Wellen- und Meeresströmungsenergieanlagen

Peter Kracht, Jochen Bard, Bahram Panahandeh

Different concepts to harvest energy from ocean waves and marine currents are currently investigated. The applied generator system has a key role in this energy conversion process. This paper presents a systematic approach to the design process for the generator system by evaluating the requirements resulting from the function principle of the device, in this case an oscillating water column wave energy converter. Additionally the design process for a real device is described to show further impacts like scaling and device specific requirements.

Zurzeit werden verschiedene Konzepte zur Energiegewinnung aus Wellen und Meeresströmungen untersucht. Das Generatorsystem spielt eine Schlüsselrolle in diesem Energiewandlungsprozess. In diesem Bericht wird ein systematischer Ansatz für den Designprozess des Generators vorgestellt, bei dem die Anforderungen an das Generatorsystem aus dem Wirkungsprinzip des Anlagenkonzepts abgeleitet werden. Am Beispiel des Designprozesses für eine reale Anlage werden Einflüsse weiterer Faktoren - wie die Skalierung und anlagenpezifische Besonderheiten - erläutert.

1 Einleitung

Im Zuge des Ausbaus der regenerativen Energien wird zurzeit verstärkt untersucht, wie sich die Energiepotentiale in den Weltmeeren nutzbar machen lassen. Zwei vielversprechende Ansätze sind die Nutzung von Wellen und Meeresströmungsenergie. Für beide Energieformen gibt es unterschiedliche Anlagenkonzepte zur Ausbeutung der Energie. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Anlagen ist jeweils das Generatorsystem, das entscheidenden Einfluss auf Kenngrößen wie Energieausbeute, Investitions- und Instandhaltungskosten und Lebensdauer der Anlage hat. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die unterschiedlichen Anlagenkonzepte zu unterschiedlichen Anforderungen an das Generatorsystem führen, die während des Designprozesses berücksichtigt werden müssen, um ein optimales System zu erhalten.

Am Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) wurden im Rahmen verschiedener Projekte Generatorsysteme für derartige Anlagen untersucht und entwickelt (siehe [1]). Im Folgenden wird anhand eines Konzepts zur Nutzung von Wellenenergie der Designprozess des Generatorsystems schematisch vorgestellt. Die Anwendung wird anschließend am Beispiel einer realen Anlage verdeutlicht.

2 Anlagenkonzept

Die aktuelle Forschung im Bereich Nutzung von Wellenenergie konzentriert sich im Wesentlichen auf drei verschiedene Konzepte (siehe [2]). An dieser Stelle soll nur auf Wellenenergiekonverter, die nach dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule (OWC) arbeiten, eingegangen werden.

OWC-Wellenenergiekonverter bestehen aus einer teilweise getauchten Struktur, mit einer Öffnung unterhalb der Wasseroberfläche. Durch die Wellenbewegung oszilliert der Wasserstand in der Struktur, wodurch sich der Luftdruck in der Struktur ebenfalls zyklisch ändert und eine entsprechende Luftströmung in der Luftaustrittsöffnung entsteht. Mittels einer gleichrichtenden Turbine, deren Drehrichtung unabhängig von der Luftströmung ist, erfolgt eine Umwandlung in mechanische Leistung. Bei der Mehrzahl der existierenden Anlagen werden sogenannte Wellsturbinen eingesetzt. Im Rahmen von aktuellen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten wird alternativ dazu auch der Einsatz von Impulsturbinen untersucht, die eine höhere Energieausbeute versprechen [3]. Als letzter Schritt erfolgt die Umwandlung der mechanischen in elektrische Leistung durch das Generatorsystem.

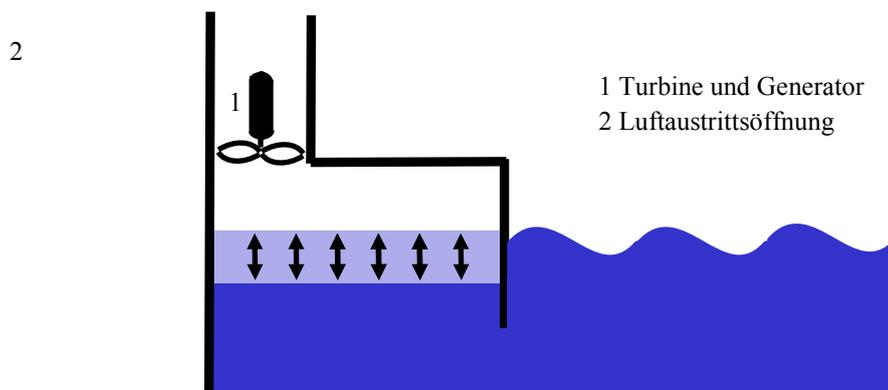


Abbildung 1 Wirkungsprinzip eines Wellenkonverters mit oszillierender Wassersäule

In Bezug auf das Generatorsystem lassen sich aus dem Wirkungsprinzip bereits einige spezifische Anforderungen an das Generatorsystem ableiten. Aufgrund des oszillierenden Leistungseintrages bedingt durch die Wellenform oszilliert

auch die Leistung der Turbine. Dadurch ergibt sich die Anforderung, dass der Antrieb drehzahlvariabel sein muss und einen hohen Teillastwirkungsgrad hat. Wird das Generatorsystem entsprechend des Mittelwertes der Turbinenleistung ausgelegt, ist vorauszusetzen, dass ein temporärer Betrieb im Überlastbereich erlaubt ist. Des Weiteren ist die relativ hohe Drehzahl eine charakteristische Eigenschaft von Luftturbinen, an die das Generatorsystem angepasst sein muss.

Aufgrund der hohen Kosten für die Installation und die Netzanbindung lassen sich Anlagen dieses Typs erst ab einer bestimmten Nennleistung wirtschaftlich betreiben. Für eine kommerziell zu betreibende Anlage kann von einer Mindestnennleistung im Bereich 0.5 – 1MW ausgegangen werden.

3 Designprozess für Generatorsysteme

3.1 Kriterienkatalog für das Generatorsystem

Den Ausgangspunkt für einen systematischen Designprozess des Generatorsystems bildet ein Kriterienkatalog der entsprechend den Anforderungen der konkreten Anlage auszuarbeiten ist. Im vorangegangenen Abschnitt sind bereits die Anforderungen hergeleitet worden, die sich aus dem Wirkungsprinzip der Anlage ergeben. Unabhängig vom Anlagentyp ergeben sich weitere allgemeine Anforderungen, die in der Hauptsache auf die Wirtschaftlichkeit abzielen.

Tabelle 1 Übersicht der Anforderungen an das Generatorsystem

Anlagenspezifische Anforderungen	Allgemeine Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • drehzahlvariabler Antrieb • hoher Teillastwirkungsgrad • Betrieb im Überlastbereich • Anpassung an hohe Turbinen Drehzahl • seewasserfeste Ausführung 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Investitionskosten • geringe Wartungs- und Betriebskosten • hoher Gesamtwirkungsgrad • gute Ersatzteilversorgung • Erfüllung der Anforderungen des Netzbetreibers

Weiterhin ist zu beachten, dass abhängig von der Leistungsklasse unterschiedliche Generatorsysteme das Optimum bilden können. Die Skalierung der Anlage hat somit einen entscheidenden Einfluss auf den Designprozess.

3.2 Auswahl des Generatorsystems

Die Umwandlung der mechanischen Energie, die vom primären Energiewandler (Turbine) bereitgestellt wird, in elektrische Energie, die ins Netz gespeist werden kann, erfolgt in mehreren Schritten:

1. Drehzahlanpassung mittels eines Getriebes
2. Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie durch den Generator
3. Anpassung an das elektrische Netz, z.B. durch einen Frequenzumrichter.

Im Gegensatz zu Schritt 2 – Umwandlung in elektrische Energie – sind die Schritte 1 und 3 nicht bei allen Anlagen erforderlich, z.B. kann auf eine Drehzahlanpassung verzichtet werden, wenn ein Generator mit einer der Turbinendrehzahl entsprechenden Nenndrehzahl eingesetzt wird.

Da Systeme zur Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie auch in vielen anderen Bereichen wie Industrie und Transport eingesetzt werden, ist eine große Anzahl an verschiedenen Technologien für die unterschiedlichen Wandlungsschritte verfügbar, die sich in ihren Eigenschaften z.B. bezüglich Betriebsverhalten, Anschaffungs- und Wartungskosten, etc. unterscheiden.

Tabelle 2 Beispiele für Komponenten des Generatorsystems

Getriebe	<ul style="list-style-type: none"> - ein oder mehrstufiges mechanisches Getriebe - hydrodynamisches Getriebe - hydrostatisches Getriebe
Generator	<ul style="list-style-type: none"> - Asynchrongenerator (ASG) - doppeltgespeister Asynchrongenerator (DGASG) - Permanentmagnet Synchrongenerator (PMSG)
Umrichter	<ul style="list-style-type: none"> - Frequenzumrichter

In Tabelle 2 sind beispielhaft einige Komponenten aufgelistet, die in einem Generatorsystem eingesetzt werden können. Aufgrund der großen Anzahl der möglichen Konfigurationen besteht der nächste Schritt im Designprozess darin

diejenigen Generatorsysteme zu identifizieren, mit denen eine technische Realisierung der Anlage möglich ist. Die so identifizierten Kandidaten werden anschließend im Detail untersucht und anhand der definierten Kriterien verglichen. Nur auf diese Weise lässt sich eine belastbare Bewertung der einzelnen Systeme durchführen und eine abschließende Auswahl treffen.

Dabei ist zu beachten, dass die unterschiedlichen Systeme jeweils Vor- und Nachteile haben und sich auch die Anforderungen an das Generatorsystem teilweise widersprechen können, d.h. das Ergebnis des Designprozesses ist nicht zwingend eindeutig. In diesem Fall müssen die einzelnen Kriterien gewichtet werden, um zu einem Ergebnis zu kommen.

4 Projekt CORES

Im Folgenden wird der Designprozess anhand des Projektes CORES, eines OWC-Wellenkonverters dargestellt.

4.1 Projektbeschreibung

Im Projekt CORES werden neue Konzepte und Komponenten für Wellenkonverter nach dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule untersucht. Gegenstand der Untersuchungen sind insbesondere Generatorsystem, Turbine, Regelung, Verankerung, Datenerfassung usw.

Ein wichtiger Bestandteil des Projekts - neben dem Aufbau einer Simulationsumgebung für OWC-Wellenkonverter und der Untersuchung und Auslegung der Komponenten für ein Fullscale-System – ist Aufbau, Installation und Betrieb einer runterskalierten Testanlage vor der irischen Küste. Als Basis dient dabei der bereits im Jahr 2006 erfolgreich installierte und getestete OWC-Wellenkonverter OE Buoy der Firma OceanEnergy Ltd. [4]. Im Rahmen eines Reengineerings wird die Anlage mit neuen Komponenten ausgestattet. Dabei kommt eine neu entwickelte Impulsturbine zum Einsatz und es erfolgt die Umrüstung von einem Gleichstrom- auf einen Drehstromgenerator, wie er auch bei Fullscale-Anlagen eingesetzt wird. Ziel ist es diese neuen Komponenten zu testen und den Energieertrag der Anlage zu maximieren.

Im Anschluss an die Testphase werden sowohl das Design des Generatorsystems wie auch die Auslegung der Impulsturbine anhand der aufgenommenen Messdaten validiert. Um eine entsprechende Datenbasis zu generieren wird die Anlage mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet.

Tabelle 3 Daten zum Projekt CORES

Projektbezeichnung	Components for Ocean Renewable Energy Systems
Projektleitung	Hydraulics and Maritime Research Center, University College Cork
Förderung	Europäische Union, 7th Framework Programme
Standort	Galway Bay Wave Energy Test Site
Skalierung	Testanlage im Maßstab 1:4 (15kW)

4.2 Designprozess Generatorsystem

Die allgemeingültigen Anforderungen an das Generatorsystem, die sich aus dem Anlagentyp ergeben, wurden bereits in Abschnitt 3.1 zusammengestellt. Zusätzlich muss die Skalierung der Anlage betrachtet werden. Die Impulsturbine wurde speziell für dieses Projekt entwickelt, angepasst an die Geometrie der Anlage und die vorhandenen Wellendaten am Standort. Die Kenngrößen der Turbine sind:

- Nenndrehzahl: 785 min^{-1}
- Maximaldrehzahl: 1300 min^{-1}
- Nennleistung: 15kW.

Eine erste Bewertung der Anforderungen ergibt, dass aufgrund der relativ hohen Drehzahl der Turbine keine Drehzahlanpassung durch ein Getriebe notwendig ist. Als Generator kommen sowohl ASG, wie auch DGASG und PMSG in Frage. Unabhängig vom eingesetzten Generator ist ein Frequenzumrichter notwendig, um ein drehzahlvariables System zu erhalten.

Anschließend wurden die drei Systeme entsprechend des Kriterienkatalogs bewertet. Die Leistungsdaten der untersuchten Maschinen zeigen, dass der DGASG den höchsten Wirkungsgrad im Volllastbereich hat, der PMSG hat dort einen geringfügig niedrigeren Wirkungsgrad. Im Teillastbereich liegt der Wirkungsgrad des PMSG über dem des DGASG. Der ASG hat sowohl den niedrigsten Voll- wie auch Teillastwirkungsgrad, wobei die Unterschiede zwischen den System jeweils im niedrigen Prozentbereich liegen. Für alle drei

Varianten gilt, dass die Anforderung eines Betriebs im Überlastbereich erfüllt ist. Bezüglich der Wartung ergeben sich keine gravierenden Unterschiede zwischen PMSG und ASG. Beim DGASG müssen regelmäßig die Schleifringe des Generators gewechselt werden, was sich aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit der Anlage als unwirtschaftlich herausstellen könnte. Eine Marktanalyse zur Ermittlung der Investitionskosten zeigte, dass aufgrund der Tatsache, dass ASG den Standardantrieb in industriellen Applikationen bilden, diese am besten verfügbar sind. Dies spiegelt sich zum einen in den Investitionskosten - in diesem Leistungsbereich ist der ASG mit Abstand die kostengünstigste Lösung - und zum anderen auch in der Verfügbarkeit von Antrieben für Marineapplikationen, die bei DGASG und PMSG nur bedingt gegeben ist.

Tabelle 4 Entscheidungsmatrix für die Auswahl des Generatorsystems

	ASG	DGASG	PMSG
Wirkungsgrad (Voll- und Teillast)	-	+	++
Überlastbarkeit	+	+	+
Investitionskosten	++	-	-
Wartungs- und Betriebskosten	+	-	+
Verfügbarkeit	++	-	-

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Untersuchungen in Form einer Entscheidungsmatrix dargestellt. In einer abschließenden Bewertung wurde entschieden im Rahmen dieses Projektes einen ASG einzusetzen. Der Vorteil einen Standardantrieb einzusetzen und damit sowohl Entwicklungsaufwand und die einhergehenden Risiken zu vermeiden, wurde dabei höher bewertet als der Nachteil des etwas geringeren Wirkungsgrads. Zumal die Ergebnisse aus den Messungen, die während des Testbetriebs der Anlage durchgeführt werden, auch dann für die Auslegung der Fullscale-Anlage verwendet werden können, wenn dort ein anderes Generatorsystem zum Einsatz kommt. Als Ergebnis des Designprozesses wurde ein 6-poliger Asynchrongenerator der Firma ABB mit 15kW Nennleistung und passendem Frequenzumrichter spezifiziert.

Da für den geplanten Testzeitraum am Standort der Anlage noch keine Netzverbindung installiert sein wird, muss der Wellenkonverter mit einem Bordnetz ausgerüstet sein, das einen autarken Betrieb der Anlage ermöglicht. Neben dem Aufbau eines 3-phasigen Netzes zum Betrieb des Frequenzumrichters, der über keine Netzbildungsfunktion verfügt, müssen dabei vor allem die Leistungsflüsse in dem System beherrscht werden. In dem dazu entwickelten Bordnetzkonzept (siehe Abbildung 2) wird das 3-phasige Netz durch Inselnetzumrichter (INU) der Firma SMA gebildet. Diese Umrichter wurden für den Aufbau von Inselnetzen in abgelegenen Gebieten entwickelt. Bei geringem Wellengang oder abgeschalteter Turbine wird das Netz aus den Batterien gespeist. Da somit Verbraucher und Hilfsaggregate wie die Anlagensteuerung und Bilgepumpen versorgt werden, ist die Sicherheit der Anlage gewährleistet. Übersteigt die Turbinenleistung die abgenommene Leistung, dreht die Steuerung der INUs den Leistungsfluss um und lädt die Batterien. Sind die Batterien vollgeladen und damit nicht mehr in der Lage weitere Energie zu speichern, wird überschüssige Leistung in den Lastwiderständen in Wärme umgewandelt. Dazu wird ein Verfahren eingesetzt, das in Kooperation zwischen SMA und IWES entwickelt wurde. Durch die Steuerung der INUs wird dazu die Frequenz des Netzes angehoben, die Netzfrequenz wird wiederum von den Lastumrichtern ausgewertet und als Sollwert für die Leistung verwendet, die an die Lastwiderstände abgegeben wird. Damit ist keine weitere Kommunikation zwischen den INUs und den Lastumrichtern notwendig.

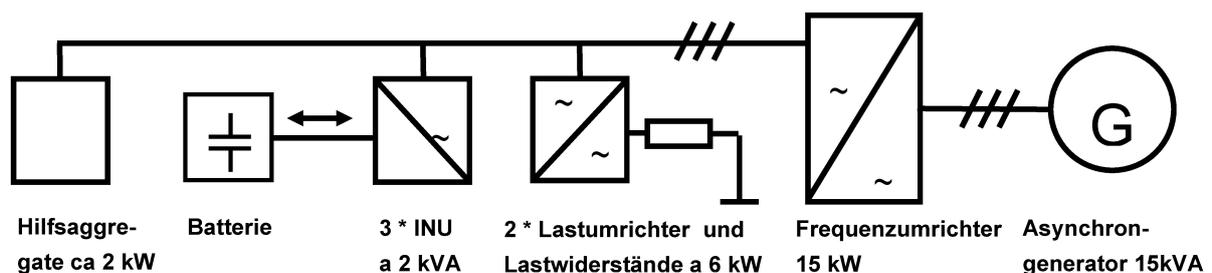


Abbildung 2 Generatorsystem und Bordnetz des Wellenkonverters

Zur Absicherung des Konzepts wurde das oben beschriebene System bestehend Generator und Bordnetz im Rahmen eines Laborversuchs aufgebaut und erfolgreich getestet. Die Turbine wurde dabei durch eine Antriebsmaschine mit entsprechenden Kenndaten simuliert. Die Installation, Inbetriebsetzung und eine anschließender 6-monatiger Testbetrieb ist für März 2011 geplant.

4.3 Skalierung der Anlage

Neben der Auslegung des Generatorsystems für die Testanlage soll an dieser Stelle auch die Auswirkungen der Skalierung auf eine Fullscale-Anlage betrachtet werden. Wird die Testanlage um den Faktor vier auf die Fullscale-Anlage hochskaliert, ergibt sich eine Leistung im Megawattbereich – die Leistung ist proportional zur 3. Potenz der Skalierung. Dadurch ergibt sich eine deutlich niedrige Turbinendrehzahl. Ein Generatorsystem basierend auf einem ASG ist dann nur noch mit einem Getriebe zur Drehzahlenanpassung realisierbar, wodurch zum einen der Gesamtwirkungsgrad des Systems weiter sinkt und zum anderen der Wartungsaufwand, z.B. zum Wechseln des Getriebeöls, steigt. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass Standardgetriebe der Drehmomentpendelung aufgrund des periodischen Leistungseintrags im Dauerbetrieb nicht gewachsen sind.

Mit einem PMSG mit hoher Polzahl lässt sich auch für niedrige Turbinendrehzahlen ein Generatorsystem ohne Getriebe aufbauen. Der bei kleinen Leistungen sehr deutliche Unterschied in den Investitionskosten, verringert sich erheblich bei Maschinen im höheren Leistungsbereich. Somit kommen dann der höhere Wirkungsgrad im Voll- und Teillastbereich in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung voll zum Tragen. Da sich unter anderem in Bereichen wie der Windenergie ein Trend hin zum Einsatz von PMSG abzeichnet [5], werden diese von den Herstellern vermehrt entwickelt und ins Programm genommen, wodurch die Verfügbarkeit deutlich steigen wird. Es ist also davon auszugehen, dass sowohl technisch wie auch in Bezug auf Investitions- und Wartungskosten und Verfügbarkeit für einen Fullscale-OWC-Konverter ein PMSG deutliche Vorteile gegenüber ASG und DGASG hat.

5 Zusammenfassung

Am Beispiel OWC-Wellenkonverter wurde gezeigt, dass durch das Anlagen- und Betriebsführungskonzept einer Meeresenergieanlage bereits ein Großteil der Anforderungen an das einzusetzende Generatorsystem festgelegt ist. Es ist also möglich für den jeweiligen Anlagentyp einen quasi allgemeingültigen Kriterienkatalog auszuarbeiten. Bei der Betrachtung einer realen Anlage kommt als zweiter wichtiger Einflussfaktor die Skalierung der Anlage hinzu.

Bei der OWC-Testanlage stellte sich die Verfügbarkeit der Komponenten als ein entscheidender Faktor heraus. Als Generatorsystem wurde ein Asynchron-generator gekoppelt mit einem Frequenzumrichter gewählt. Eine Betrachtung der Skalierung des Systems zeigt, dass bei Fullscale-Anlagen ein Permanentmagnet-Synchrongenerator bessere Ergebnisse liefert. Dieser

grundlegende Wechsel im Generatorprozess verdeutlicht den Einfluss der Skalierung auf den Designprozess. Für den geplanten Testbetrieb wird am Standort der Anlage keine Netzverbindung zur Verfügung stehen. Derartige Herausforderungen sind typisch für die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien und erfordern innovative Lösungen. Im konkreten Fall wurde ein Konzept zum Betrieb von Inselnetzen auf die Anwendung in einer Meeresenergieanlagen übertragen.

Literatur

- [1] Bard, J.; Regelungssysteme für Meeresströmungsturbinen. In: Tagungsband "Zwölftes Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik", Seite 157 - 166
- [2] de O. Falco, A. F.: The Development in Wave Energy Utilisation. In: International Energy Agency on Ocean Energy Systems Annual Report 2008,
- [3] Mala, K.; Badrinah, S.N.; Chidanand, S.; Kailash, G.; Jayashankar, V.: Analysis of power modukes in the Inian Wave Energy Plant, In: India Conference (INDICON), 2009 ANNUAL IEEE
- [4] www.oceanenergy.ie
- [5] Shrestha, G; Polinder, H.; Ferreira, J.A.: Scaling laws for direct drive generators in wind turbines. In: Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC 09, IEEE International

Autoren:

Dipl.-Ing. Peter Kracht
Dipl.-Phys. Jochen Bard
Dipl.-Ing. Bahram Panahandeh
Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
Königstor 59
D-34119 Kassel
Tel.: +49 – 561 – 7294 – 285
peter.kracht@iwes.fraunhofer.de