

WWF Dams Initiative: Improving Outcomes by Comprehensive and Integrated Water and Energy planning

Jian-hua Meng, Jörg Hartmann

Der WWF unterstützt mit seiner 'Dams Initiative' international die Entwicklung nachhaltiger Wasserkraft. Einer der Tätigkeitsschwerpunkte ist die Arbeit im "Hydropower Sustainability Assessment Forum" (HSAF). In diesem Forum wird eine Neufassung des "Hydropower Sustainability Assessment Protocol" entwickelt. Dieses novellierte Protokoll wird im Juni 2009 zur öffentlichen Erprobung und Konsultation veröffentlicht werden.

1 WWF' Dams Initiative

The World Wide Fund for Nature (WWF) is one of the largest conservation organisations in the world. We work in more than 50 countries in both the developed and developing world and our mission is stop the degradation of the planet's natural environment and to build a future in which humans live in harmony with nature. We aim to achieve this by working to conserve the world's biological diversity, by ensuring that the use of renewable resources is sustainable, and by promoting the reduction of pollution and wasteful consumption. Key decision-makers see WWF as an organization that engages with a wide variety of partners in an effort to find solutions. We work with governments, the corporate sector and other NGOs. There is no other conservation organization in the world today that has the on-the-ground field experience of WWF. This work on the ground allows us to base our policies on sound science and to constantly incorporate the lessons learned from the field into this work.

WWF has been working on sustainable freshwater management for many years and across the world. The main targets of the global freshwater program include promoting the conservation of major river basins, the sustainable use of freshwater resources for human development and poverty alleviation, and the sustainable management of freshwater habitats. The program links field projects with policy and market activities. From local demonstration sites to landscape-

zeitliche Variation der Strömungsgeschwindigkeit, Wassertiefe, Wellenklima usw. gibt es auch Spezialisten unter den Konzepten, die für bestimmte Standortcharakteristika z.B. als schwimmende Anlage für sehr tiefes Wasser oder mit oszillierendem Profil für seichteres Wasser entwickelt werden. Dabei sind diejenigen Lösungen, die besonders flexibel einsetzbar sind, grundsätzlich im Vorteil. Dies sind insbesondere Anlagen mit aktiver Blattverstellung und variabler Drehzahl - sie haben aber den Nachteil der höheren technischen Komplexität. In Windkraftanlagen - auch für den Offshore Einsatz - sind diese Merkmale aber bereits Stand der Technik. So lassen sich auch die regelungstechnischen Lösungen moderner Windkraftanlagen auf Meeresströmungsturbinen anwenden. Durch den drehzahlvariablen Betrieb soll einerseits ein strömungsgeführter Betrieb zur Erhöhung des Anlagenertrages und andererseits das Ausregeln von dynamischen Strömungsvorgängen durch Wellen und Turbulenzen ermöglicht werden. Für die langfristige Entwicklung spielen neue Regelungskonzepte zur dynamischen Strukturenlastung auch für die Auslegung der Struktur eine bedeutende Rolle.

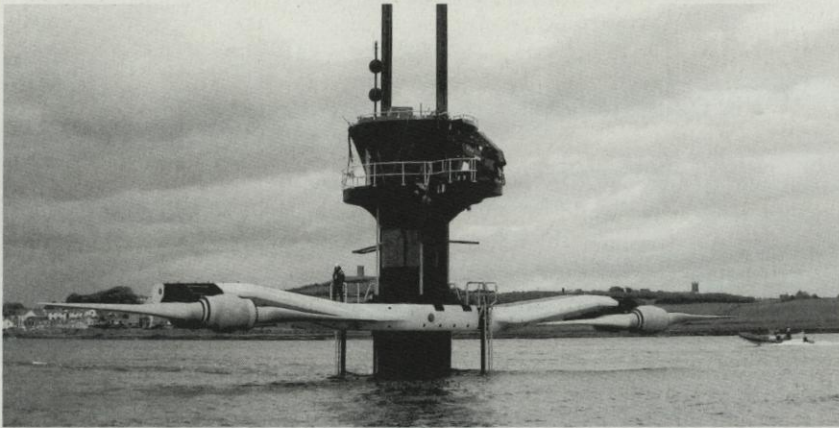


Abbildung 1 1,2 MW Seagen-Anlage von MCT bei Strangford, Nodrirland. Die Rotoren mit Einzelblattverstellung laufen drehzahlvariabel.

Im Rahmen dieses Beitrages soll zunächst auf die Charakteristika von Meeresströmungen im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf in Folge der Gezeiten und lokaler Effekte, die vertikale Geschwindigkeitsverteilung, kleinskalige zeitliche und räumliche Variationen (Turbulenz) sowie die Wechselwirkungen von Wellen und Strömungen eingegangen werden. Dabei werden geeignete Modelle vorgestellt, die die Berücksichtigung dieser Effekte im Rahmen von dynamischen Simulationen mit Matlab Simulink ermöglichen.

Darüber hinaus werden die für die Anlagenmodelle verwendeten Modellbausteine dargestellt. Diese Kombination schafft den Rahmen für die Entwicklung von Betriebsführungs- und Regelungsalgorithmen. Beispielhaft wird dabei aufgezeigt, welche dynamischen Lasten beim Betrieb der Anlagen auftreten und welche Reduktionen in den dynamischen Lasten durch regelungstechnische Optimierung möglich sind. Es werden in begrenztem Umfang auch Beispiele aus den Betriebserfahrungen von Prototypen und in einem Ausblick auf die Erfordernisse zur Entwicklung geeigneter Messtechnik hingewiesen.

2 Dynamik von Meeresströmungen

Es gibt unterschiedliche Mechanismen, die zur Ausbildung von Meeresströmungen führen. Eine der bekanntesten ist der Golfstrom, sein Antrieb sind vor allem Temperaturunterschiede infolge der solaren Einstrahlungsverteilung auf dem Globus. Die ebenfalls durch solare Einstrahlung verursachte hohe Verdunstung im Mittelmeerraum führt zu einer Ausgleichsströmung aus dem Atlantik durch die Meerenge von Gibraltar. Auch unterschiedliche Salzkonzentrationen haben Einfluss auf Meeresströmungen. In Küstenregionen mit großem Tidenhub dominieren in der Regel die Gezeitenströmungen. Deren zeitlicher Verlauf wird zunächst durch die Gravitationskräfte von Mond und Sonne bestimmt. Dabei kommt es aber zu Ungleichheiten, die aus der Himmelsmechanik resultieren. Es ist üblich die lokalen Tiden als eine Überlagerung von harmonischen Schwingungen mit standortspezifischen Perioden, Phasen und Amplituden, den sog. Partialtiden darzustellen. Auf Grund der Bedeutung der Kenntnis des Tidengeschehens für die Schifffahrt und andere Nutzungen sind die Parameter der Partialtiden an vielen Standorten bekannt. Daraus lässt sich dann der theoretische zeitliche Verlauf der Tidenströmungen errechnen.

Allerdings ist auch die Bathimetrie des Meeresgrundes auf Grund von Reibung und Morphologie der Meeresbecken für die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten ausschlaggebend. Bei komplexer Topologie können gute und schlechte Standorte dicht beieinander liegen. Durch Überlagerung der beschriebenen Effekte bilden sich teilweise sehr komplizierte unsymmetrische Strömungsverhältnisse aus. Für die Beurteilung und Auswahl von Standorten zur energetischen Nutzung der Strömungen sind Messung z.B. mittels eines ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) notwendig. Die Messungen müssen in aller Regel nur für die Periodendauer der 14-tägigen Mondtide durchgeführt werden, um eine Extrapolation auf das gesamte Jahr zu ermöglichen. Wegen der räumlichen Variationen der Strömungen sind

Fernerkundungsmethoden z.B. auf Grundlage von Radarmessungen von großem Nutzen – bisher aber für diese Anwendung kaum eingesetzt worden.

Ein weiterer wichtiger dynamischer Lasteffekt resultiert aus der Variation der Strömungsgeschwindigkeit mit der Wassertiefe. An der Oberfläche sind die höchsten Geschwindigkeiten zu finden, am Meeresgrund geht diese gegen Null. Dazwischen findet sich ein exponentieller Zusammenhang ähnlich dem Gesetz für die Höhenabhängigkeit von Windgeschwindigkeiten. Tatsächlich treten an der Wasseroberfläche Abweichungen von diesem Profil insbesondere bei starkem Wind auf. Im Mittel findet sich aber eine gute Übereinstimmung realer Strömungsprofile mit diesem Ansatz. Durch die Variation der Strömungsgeschwindigkeit über die Wassersäule ergibt sich ein Lastzyklus bei jedem Umlauf des Rotorblattes.

Auch Wellen können einen starken Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten haben. Wasserteilchen bewegen sich beim Durchgang von Wellen auf Kreisbahnen, deren Radius mit der Wassertiefe abnimmt. Diese Orbitalgeschwindigkeiten überlagern sich mit der Gezeitenströmung und verändern dabei Betrag und Profil der Strömung. So können Wellen mit etwa 1 m Hs und einer Periode von 4s noch in 10 m Wassertiefe zu einer Halbierung der Strömungsgeschwindigkeit im Wellental bzw. Verdopplung im Wellenberg führen. Das verursacht weitere Lastzyklen für Rotor und Struktur.

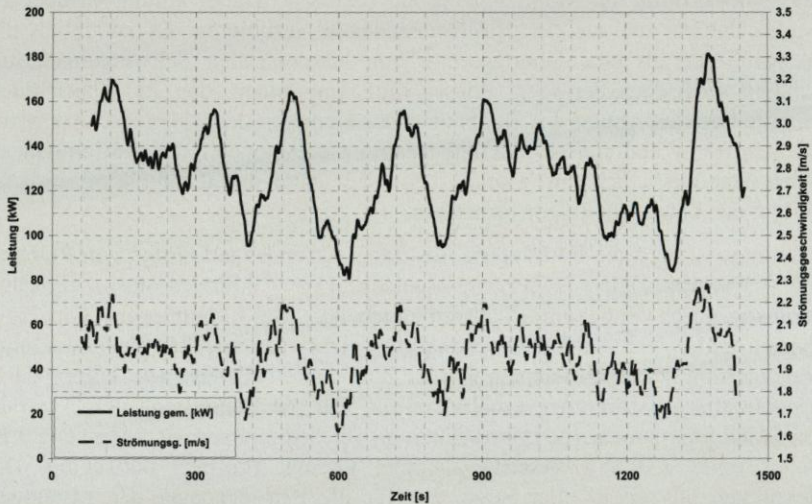


Abbildung 2 Zeitlicher Verlauf von Strömungsgeschwindigkeit (untere Kurve) unmittelbar vor dem Rotor und Wellenleistung der Anlage

Schließlich sind insbesondere starke Strömungen durch ein hohes Maß an Turbulenz gekennzeichnet. Dabei handelt es sich um stochastische über einen weiten Frequenzbereich verteilte räumliche und zeitliche Variationen der Strömungsgeschwindigkeit. Turbulenzen mit Frequenzen weit oberhalb der Eigenfrequenzen von Rotorblatt und Struktur führen nicht zu mechanischen Anregungen und sind daher wenig bedeutend. Es finden sich aber auch sehr großräumige Strudel und andere niederfrequente Turbulenzphänomene, die durchaus Lastzyklen mit großen Amplituden erzeugen können (vgl. Abb. 2).

3 Dynamische Simulationen

Das wichtigste Entwicklungstool für die Regelung und Betriebsführung ist die dynamische Simulation der Anlage. Die Entwicklung des Modells der Meeresströmungsturbine (MST) am ISET geht ursprünglich auf ein Modell einer Windkraftanlage mit einem Rotormodell auf Basis der Blattelementmethode zurück. Das Modell setzt sich zusammen aus

- Strömungsmodell, das Gezeitenverlauf, Profil, Turbulenz und Wellen umfasst,
- hydrodynamischem Modell, das die hydrodynamischen Kräfte auf die Rotoren der Anlage beschreibt,
- mechanischem Modell, das die Schwingungen der Struktur als Mehrkörpermodell (MKS) beschreibt,
- Triebstrangmodell, das die Schwingungen / Lasten im Triebstrang beschreibt
- Generator-Frequenzumrichtermodell, das die Drehmomentregelung beinhaltet
- Betriebsführungsmodul, das Regelung und Betriebsführung übernimmt.

Mit Hilfe dieses Modells einer Meeresströmungsturbine können umfangreiche Berechnungen für Entwicklung und Test der Betriebsführung durchgeführt werden, wie z.B. Pitchgeregelter -drehzahlgeregelter Betrieb, Durchgehen und Abbremsen des Rotors, unterschiedliche Rotorauslegungen, der Einfluss von Kavitation auf das Betriebsverhalten, Berücksichtigung von Wellen unterschiedlicher Höhe und Periode.

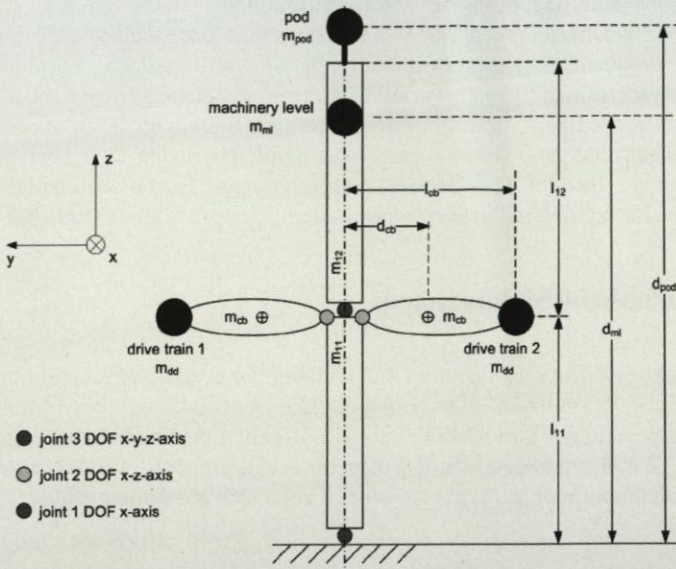


Abbildung 3 Mehrkörpermodell der Seagen-Anlage

Im Betriebsführungsmodell werden die verschiedenen Betriebsmodi (Start, Stopp, geregelter Betrieb, Leistungsbegrenzung, Nothalt) sowie der Wechsel zwischen den Betriebsarten und die Rotor- Drehzahlregelung implementiert.

Die Simulation ermöglicht somit den Test komplexer Regelalgorithmen wie z.B. Schubregelung, Lageregelung der Rotoren, dynamische Strukturentlastung, ertragsoptimierende Regelverfahren etc. Die Kopplung von Simulation und Hardwarekomponenten im Rahmen eines HIL-Tests ermöglicht eine echtzeitfähige Variante mit reduziertem Simulationsumfang.

Zur Untersuchung von dynamischen Effekten wie Schwingungen der Struktur wurde ein Mehrkörpermodell entwickelt. Diese Modellbeschreibung wurde ebenfalls von derjenigen für Windkraftanlagen abgeleitet. Dabei werden die wichtigsten Strukturkomponenten durch Gelenke und durch steife Abschnitte repräsentiert. Durch Einbau einer Dämpfung in die Gelenke und geeigneter Massenträgheitsmomente der steifen Komponenten kann so ein Schwingungsmodell der realen Anlage erstellt werden. Dies ermöglicht die Berechnung der wichtigsten Schwingungsmoden der Anlage infolge der Anregungen durch die Rotoren. Das echtzeitfähige Mehrkörpermodell wird dazu mit der Blattelementmethode zur Berechnung der Biegemomente der einzelnen Blattsegmente gekoppelt. Als Eingangsgrößen dient die Strömungsgeschwindigkeit mit einem WCI-Modell sowie einem Turbulenzansatz.

Aus ADCP Messdaten können hierfür durch harmonische Analysen (Fourierzerlegung) die Strömungsanteile von Wellen aus den zeitlichen Verläufen extrahiert werden. Dazu sind geeignete Modelle für die Wechselwirkungen von Strömungen und Wellen erforderlich (Wave-Current-Interaction-Modelle), um auf die Strömungen ohne Wellen, bzw. die ungestörten Wellenspektren zurückrechnen zu können. Dies ergibt für das betrachtete Messintervall das Wellenspektrum sowie die ungestörten Strömungsverläufe infolge der Gezeiten.

Schließlich erscheint die Turbulenz am Messstandort als Rauschen in der harmonischen Analyse und kann mit geeigneten Modellparametern quantifiziert werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise lassen sich für ein Messintervall die Anteile der Strömungen, der Wellen sowie der Turbulenz separieren. Aus der Kenntnis dieser verschiedenen Anteile lassen sich wiederum die Modelle so parametrieren, dass standorttypische Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeiten in den unterschiedlichen Wassertiefen generiert werden können. Diese Zeitreihen werden zur Berechnung der dynamischen Lasten auf die Anlage sowie die Optimierung der Regelung eingesetzt. Es ist auch vorgesehen, diese Methode der Standortuntersuchung in die Entwicklung einer Norm für die Vermessung von Meeresströmungsturbinen im Rahmen der IEC TC114 einzubringen.

4 Ergebnisse

Zur Untersuchung der dynamischen Strukturbelastungen wurden Simulationen des drehzahlstarrten und des drehzahlvariablen Betriebs jeweils für identische Strömungsbedingungen durchgeführt. In Abbildung 4 sind Leistung, Schubkraft und Rotordrehmoment bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s, einer Wellenamplitude von 3,5 m und einer Periodendauer von 5,6 s dargestellt.

Die Simulationen zeigen, dass bei drehzahlvariablem Betrieb mit geringeren Variationen im Generator Drehmoment größere Drehzahlschwankungen auftreten. Dies führt zu höheren Leistungen und höherem Schub auf die Anlage. Der Mittelwert der Leistung erhöht sich um etwa 10%, der Schub um etwa 8%. Die Amplitude der Leistungsvariation wächst dabei nur um 4%, die Amplitude beim Schub verringert sich sogar um 6%. Das Rotordrehmoment ist im Mittel gleich, der Maximalwert und die Amplitude der Variation sind aber um 13,5% bzw. 18,5 % reduziert. Das bedeutet, dass trotz erhöhter Leistung im drehzahlvariablen Betrieb das Getriebe ein deutlich geringeres maximales Drehmoment und gleichzeitig niedrigere Lastwechselamplituden aufzunehmen hat. In Abbildung 32 sind die Ergebnisse der Lastsimulationen

zusammengefasst. Entsprechendes gilt für das Schwenkbiegemoment der Rotorblätter.

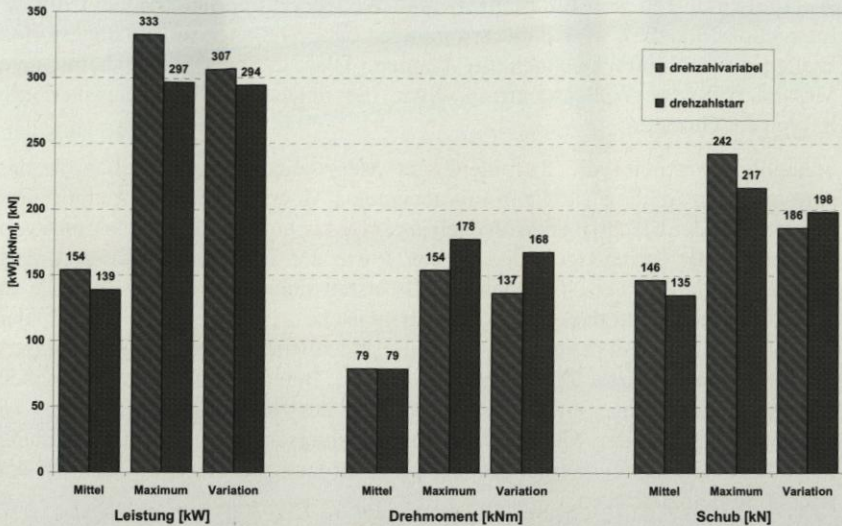


Abbildung 4 Vergleich von Leistung, Drehmoment und Schubkraft bei drehzahlstarrer und drehzahlvariablem Betrieb bei der 300 kW Seaflo-Anlage

Alle Lasten, die im Zusammenhang mit der Leistung stehen, wie z.B. die Schubkraft und die Schlagbiegemomente der Rotorblätter erhöhen sich zwangsläufig mit der höheren Leistung.

Für die Seagenanlage wurde untersucht, wie sich unsymmetrische turbulente Strömungen bzw. durch schräg anlaufende Wellenfronten auf die Strukturdynamik auswirken. Unter Ausnutzung der Rotor- und Drehzahlregelung konnte dabei gezeigt werden, dass es möglich ist, den Schub beider Rotoren stets gleich zu halten. Daraus resultiert ein ausgeglichenes Biegemoment auf beide Tragarme, sodass das resultierende Drehmoment auf den Turm zu Null wird. Abbildung 5 zeigt für unsymmetrische Strömungsvariationen den zeitlichen Verlauf der Schubkräfte beider Rotoren mit und ohne Kompensation. Bei eingeschalteter Kompensation ergeben sich nahe zu vollkommen gleiche Schubverläufe. Die Schubbelastung selbst ist für die Anlage keine kritische Last - es kann auch ein Rotor alleine betrieben werden - diese Beispiel zeigt aber deutlich, welche Möglichkeiten in lastreduzierenden Regelungsverfahren stecken.

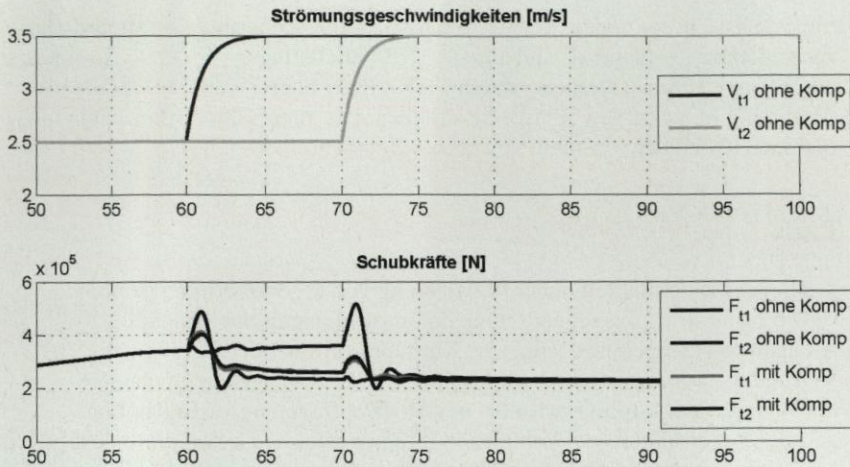


Abbildung 5 Auch bei stark unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten für beide Rotoren (oben) lassen sich die Schubkräfte (unten) fast vollständig kompensieren

Ein weiterer regelungstechnisch Ansatz liegt in der Vergleichmäßigung und sauberen Begrenzung der in das Stromnetz eingespeisten elektrischen Leistung.

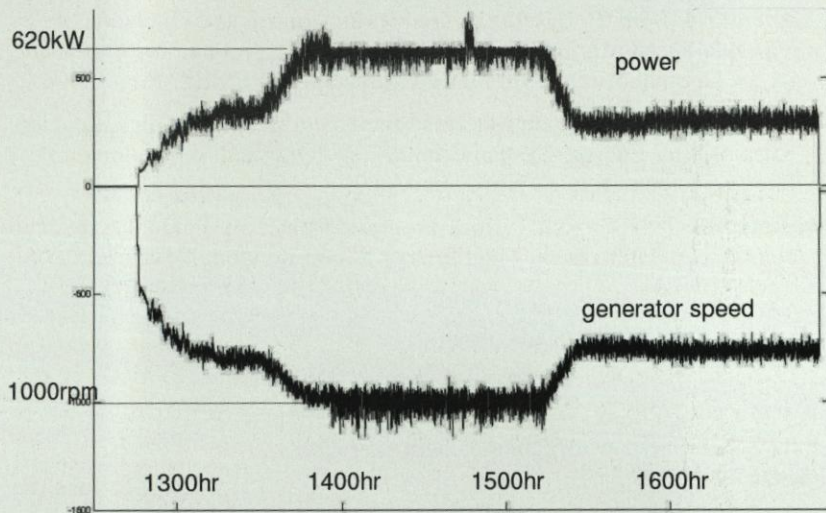


Abbildung 6 Netzseinspeisung eines Rotors der Seagenanlage am 14.11.2008

Dabei wird die Rotor- und Drehzahlregelung so kombiniert, dass eine eingestellte maximale Leistung nicht überschritten wird. Kurzzeitige

Strömungsschwankungen werden zunächst durch Änderung der Rotordrehzahl ausgeglichen, länger anhaltende Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten werden durch die Rotorblattverstellung kompensiert. Abbildung 6 zeigt das Einspeiseverhalten bei unterschiedlichen Regelungsoptionen über einen Zeitraum von etwa 4 Stunden.

Fazit

Nach mehr als 10 Jahren in der Entwicklung von Meeresströmungsturbinen stehen heute sowohl geeignete Modelle für die dynamische Simulation der Anlagen sowie regelungstechnische Konzepte zur Lastreduzierung zur Verfügung. Voraussetzung dafür ist aber, dass die Anlagen auch über die notwendige Ausrüstung zur Rotor- und Drehzahlregelung verfügen. Ein genaueres Verständnis der komplexen Strömungsfelder an Standorten mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten und potenziell starkem Seegang wird in der Praxis noch weitere Verbesserungen ermöglichen. Hierfür müssen aber noch geeignete Messverfahren und genauere Strömungsmodelle entwickelt werden.

Literatur/References

- G. Mattarolo, J. Bard, P. Caselitz, J. Giebhardt, Control and Operation of Variable Speed Marine Current Turbines: results from a project funded by the German Ministry for the Environment, OWEMES, Rome 2006
- J. Bard, Regelungssysteme für Meeresströmungsturbinen, Zwölftes Kasseler Symposium - Energie-Systemtechnik, Regelungstechnik für dezentrale Energiesysteme, Kassel, November 2007
- Peter Fraenkel, Tidal Stream Turbine Progress: from experimental systems to commercial deployment, Tidal Energy Summ London, November 2008

Autoren/Authors:

Dipl. Phys. Jochen Bard
Inst. für Solare Energieversorgungstechnik
Königstor 59 , 34119 Kassel