

Albert Ruprecht

Strom aus dem Meer





Der Schutz unseres Klimas muss ein zentrales Ziel der Politik sein, dafür ist eine nachhaltige Energieversorgung unabdingbar. Es ist unbestritten, dass für den Klimaschutz eine drastische Reduzierung des Ausstoßes von CO₂ notwendig ist. Dieses Ziel erfordert aber den konsequenten Ausbau aller zur Verfügung stehenden regenerativen Energiequellen. Dazu müssen vermehrt Anstrengungen in Forschung und Entwicklung unternommen werden, um Strom aus erneuerbaren Energiequellen kostengünstig, zuverlässig und umweltverträglich gewinnen zu können.

Weltweit liefert die Wasserkraft den größten Beitrag an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. In Abbildung 1 ist die weltweite Stromerzeugung gezeigt, aufgeteilt nach Energiequellen. Man sieht, dass die Wasserkraft ungefähr 17 Prozent der Stromproduktion ausmacht. Der Beitrag der anderen erneuerbaren Energiequellen (Wind, Sonne, Biomasse u. a.) beträgt dagegen nur 1,7 Prozent. Um aber die Ziele des Klimaschutzes erreichen zu können, ist es zum einen notwendig, jede zur Verfügung stehende erneuerbare Energieform zu nutzen. Zum anderen stehen lokal auch unterschiedliche regenerative Energiequellen zur Verfügung, die genutzt werden sollten.

Da große Teile unseres Planeten mit Ozeanen und Meeren bedeckt sind, stellt natürlich auch die Nutzung der Energien aus dem Meer einen wesentlichen Beitrag für eine nachhaltige Energieversorgung dar. In den Meeren stehen im Wesentlichen die folgenden unterschiedlichen Energieformen zur Verfügung:

1. Tidenhub (potentielle Energie, resultierend aus der Anziehungskraft des Mondes und der Sonne)
 2. Gezeitenströmungen (kinetische Energie infolge der Gezeiten, resultierend aus der Anziehungskraft des Mondes und der Sonne)
 3. Wellenenergie (Bewegung der Wasseroberfläche infolge des Windes)
 4. Gradient der Salzkonzentration (Osmotischer Druck)
 5. Temperaturgradient im Meer (Thermodynamischer Prozess).
-

Albert Ruprecht ■
Strom aus dem Meer ■

Die Nutzung des Temperaturunterschieds von kaltem Wasser in großer Tiefe und warmem Oberflächenwasser in einem thermodynamischen Kreisprozess besitzt zwar ein großes Potenzial, aber die technische Realisierung ist sehr aufwendig, da durch die vergleichsweise kleinen Temperaturunterschiede enorm große Anlagen notwendig sind und nur sehr kleine Wirkungsgrade erreicht werden können. Weltweit gibt es wenige Pilotanlagen, die zeigen, dass eine wirtschaftliche Verwertung in absehbarer Zeit kaum möglich ist. Darüber hinaus sind auch die Auswirkungen solcher Anlagen auf die Meeresumwelt noch gänzlich ungeklärt, da es beim Betrieb solcher Anlagen zu einem Austausch von kaltem und warmem Wasser kommt.

Bei der Nutzung der Gradienten der Salzkonzentration wird der unterschiedliche Salzgehalt von Süß- und Meerwasser verwertet. Mittels Osmose wird an einer halb-durchlässigen Membran ein Druckunterschied (ca. 20 bar) aufgebaut, der dann über eine klassische Turbine abgearbeitet und an einem Generator in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Dazu ist aber sowohl Salz- als auch Süßwasser erforderlich. Solche Anlagen können also an Mündungen von Flüssen ins Meer realisiert werden. Das Kernstück dieser Anlagen stellt die Membrane dar, deren Entwicklung heute Gegenstand der Forschung ist.

Für die Wellenenergie wird die vom Wind induzierte Wellenbewegung in der Regel in mechanische Energie umgewandelt. In diesem Bereich gibt es sehr viele Ansätze, Modelle und Patente. Kommerziell realisiert wurden bisher aber nur zwei Prinzipien. Die eine Realisierung basiert auf dem Prinzip einer oszillierenden Wassersäule, dieses Prinzip wird später noch einmal ausführlicher beschrieben. Der zweite Ansatz nutzt die Relativbewegung von Schwimmkörpern infolge der

Wellen, um damit eine Hydraulik-Flüssigkeit auf ein hohes Druckniveau zu bringen, die dann in einem Hydraulik-Motor wiederum in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Eine kommerzielle Realisierung durch die Firma Ocean Power Energy verwendet einen schlangenartigen, unterteilten Schwimmkörper, an den Gelenkstellen befinden sich dann die Hydraulik-Pumpen. Dieser Wellenenergie-Konverter wird Pelamis genannt.

Bei den Gezeitenströmungskraftwerken wird die kinetische Energie der von den Gezeiten induzierten Strömungen ausgenutzt. Dies erfolgt in der Regel mit frei umströmten Turbinen, die Windturbinen ähnlich sind. Es gibt horizontal-achsige und vertikal-achsige Maschinen. Der Vorteil von frei umströmten Turbinen ist, dass keine großen Baumaßnahmen notwendig sind und der Eingriff in die Umwelt sehr gering und lokal begrenzt ist. Ein solches Projekt wird hier ausführlich vorgestellt.

Gezeitenkraftwerke, welche die potentielle Energie von Ebbe und Flut nutzen, sind seit mehr als vierzig Jahren in Betrieb. Das bekannteste ist La Rance in Frankreich. Dazu wird ein Damm errichtet, der ein entsprechendes Speichervolumen vom Meer abtrennt. Infolge der Gezeiten kommt es dann zu unterschiedlichen Wasserspiegeln zwischen Meer und Speicher. Dieses Gefälle wird zum Betrieb von konventionellen Wasserturbinen genutzt. Die Problematik bei solchen Gezeitenkraftwerken liegt in der Absperrung eines großen Stauraums, was große Baumaßnahmen erfordert und einen relativ starken Eingriff in die Natur darstellt.

Meeresenergieforschung am IHS

Am Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen (IHS)

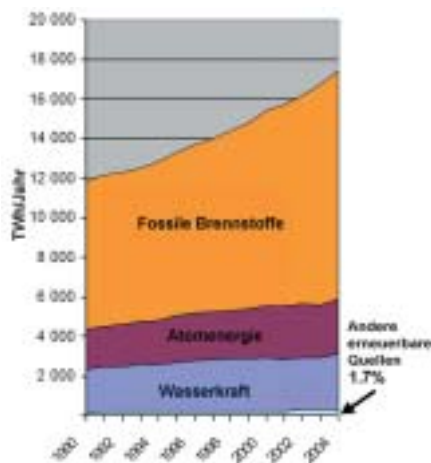


Abb. 1: Weltweite Stromerzeugung nach Quellen aufgeteilt.

Neben den Gezeitenströmungen gibt es auch noch permanente Meeresströmungen, zum Beispiel den Golfstrom. Eine Nutzung dieser Strömungen ist aber problematisch, da die Auswirkungen auf Klima und Umwelt weitgehend ungeklärt sind. Man muss davon ausgehen, dass schon eine leichte Beeinflussung dieser permanenten Strömungen große globale Auswirkungen haben kann.

In Tabelle 1 sind die Potenziale der einzelnen Energiequellen aus den Meeren zusammengefasst. Dazu muss aber gesagt werden, dass es sich bei diesen Zahlen um relativ unsichere Schätzungen handelt, da es zur Zeit noch keine weltweiten zuverlässigen Potenzialerhebungen gibt. Die in Tabelle 1 angegebenen Größen stellen aus heutiger Sicht nachhaltig nutzbare Potenziale dar, das theoretische oder auch technisch nutzbare Potenzial ist deutlich größer. Vergleicht man diese Potenziale mit dem heutigen weltweiten Strombedarf von ca. 16.000 TWh/a (Terawattstunden pro Jahr), so könnten theoretisch mehr als 90 Prozent davon aus dem Meer gedeckt werden.

Tabelle 1: Potenziale für Meeresenergien

Technik	Potenzial
Temperaturgradient	10.000 TWh/a
Gradient der Salzkonzentration	2.000 TWh/a
Wellenenergie	1.700 TWh/a
Gezeitenströmungen	1.000 TWh/a
Gezeitenenergie (potenziell)	400 TWh/a

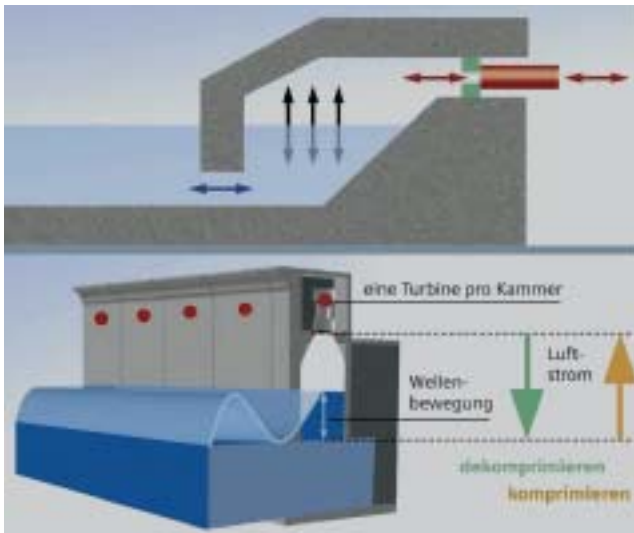


Abb. 2: Schema eines Wellenkraftwerks nach dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule. (Quelle: Voith Siemens Hydro Power Generation)

laufen derzeit Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Wellenenergie und auf dem Gebiet der Gezeitenströmung.

Wellenenergie

Bei der Wellenenergie wird an der Optimierung einer Wellenenergie-Anlage nach dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule gearbeitet. Das Prinzip eines solchen Kraftwerks ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Wellen treffen auf eine unten offene Kammer und bewirken dadurch ein Oszillieren der Wassersäule in der Kammer. Die oszillierende Wassersäule verdrängt beim Aufsteigen die Luft aus der Kammer, bei Absinken zieht sie von außen Luft in die Kammer. Diese beziehungsweise einströmende Luft wird dazu benutzt, eine Luftturbine anzutreiben. Die Strömungsrichtung durch die Turbine wechselt im Sekundenbereich und die Turbine kann deshalb ihre Drehrichtung der Strömung nicht anpassen. Deshalb kommt hier eine spezielle Turbine, die so genannte Wells-Turbine, zum Einsatz. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sie in beiden Strömungsrichtungen ihre Drehrichtung beibehält. Abbildung 3 zeigt das Prinzip der Wellsturbine.

Die Forschungsaufgaben am IHS beschäftigen sich zum einen mit der Optimierung der Turbine. Dazu werden Simulationsmodelle und mathematische Optimierungswerkzeuge entwickelt und eingesetzt, um optimale Profile und Strömungsführungen zu finden. Zum anderen

wird versucht, eine möglichst optimale Abstimmung des Kollektors mit der Turbine für entsprechende Wellenklimate zu erreichen. Dazu wird auch an passenden Regelungsstrategien für das Kraftwerk gearbeitet. Diese Forschungsarbeiten erfolgen in Zusammenarbeit mit der Firma Voith Siemens Hydro Power Generation und deren Tochter WaveGen, die auf der Insel Islay in Schottland seit 2000 eine solche LIMPET-Anlage (Abb. 4) betreiben. Dort können auch die gewonnenen Erkenntnisse unter realen Bedingungen erprobt werden.

Das Projekt „Seaturtle“

Die Hauptaktivität des Instituts auf dem Gebiet der Meeresenergie liegt in der Ausnutzung von Gezeiten-Strömungen. Seit mehreren Jahren werden dazu Entwicklungen, unterschiedliche Projektstudien und auch Vorentwicklungen durchgeführt. Daraus hat sich mittlerweile ein konkretes Projekt mit dem Namen „Seaturtle“ entwickelt, das jetzt in Korea realisiert wird. Bevor eine detaillierte Beschreibung des Projekts gezeigt wird, soll zunächst auf die Gezeitenströmungen allgemein eingegangen werden.

Gezeiten und damit auch Gezeitenströmungen entstehen im Wesentlichen durch die Anziehungskraft des Mondes. Aber auch die Anziehungskraft der Sonne spielt dabei eine Rolle. Beide bewirken, dass sich Wasser in Richtung der Anziehungskraft bewegt. Durch den Umlauf des Mondes beziehungsweise durch die Rotation der Erde führt dies lokal zu

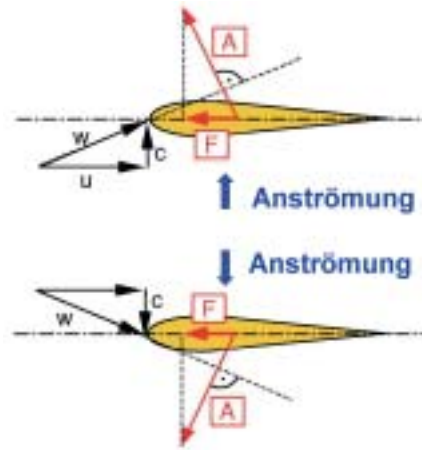


Abb. 3: Prinzipskizze einer Wells-Turbine.

- A Auftriebskraft des Profils
- F Kraftkomponente zum Drehmoment
- C Geschwindigkeit der Luftsäule
- U Umfangsgeschwindigkeit
- W Anströmungsgeschwindigkeit



Abb. 4: Die OWC-Anlage LIMPET von WaveGen. (Quelle: Voith Siemens Hydro Power Generation)

einem Anstieg (Flut) beziehungsweise Absinken (Ebbe) des Wasserspiegels. Gleichzeitig stellen sich dabei natürlich auch entsprechende Strömungen ein.

Bei der Ausnutzung der Gezeitenströmung wird die kinetische Energie mittels einer Turbine in mechanische Energie umgewandelt, die dann am Generator in elektrische Energie umgesetzt wird. Anders als bei Gezeitenkraft, die potentielle Energie nutzt wie zum Beispiel La Rance in Frankreich, wird hier kein Damm gebaut. Stattdessen werden frei umströmte Turbinen, ähnlich Windturbinen, eingesetzt.

Der Name Seaturtle

Der Name Seaturtle lehnt sich an historische Schiffe in Korea an. Diese Schildkrötenboote, koreanisch Kobuksong, werden zum ersten Mal in einem Bericht von 1413 zu Zeiten des Herrschers Taejong erwähnt und waren die ersten eisengepanzten Schiffe. In Abbildung 7 ist ein Nachbau eines solchen Schiffes im War Memorial Museum von Seoul gezeigt. Diese „Seaturtle“-Schiffe erreichen ihre Berühmtheit Ende des 16. Jahrhunderts. Damals wurde Korea von Japan angegriffen. Dabei soll die Zahl der japanischen Schiffe ca. 500 betragen haben, diesen stand die Flotte des koreanischen Admirals Lee mit ca. 50 „Seaturtle“-Schiffen

entgegen. Admiral Lee kannte aber die Gezeitenströmungen an der koreanischen Küste und lockte die japanische Schiffe in die reißenden Strömungen. So gelang es ihm, die gesamte japanische Flotte zu vernichten. Admiral Lee ist bis heute ein Volksheld in Korea. Sein Portrait zierte sowohl Geldscheine als auch Briefmarken.

In den ersten Studien zur Nutzung der Gezeitenströmungen in Korea wurden schwimmende Turbineneinheiten untersucht. Da diese „Schiffe“ wie auch die Schiffe von Admiral Lee ebenfalls die großen Strömungen zu ihrem Vorteil nutzen sollten, wurden sie in Anlehnung an Admirals Lees Schiffe ebenfalls Seaturtle

Die Vorteile bei der Nutzung von Gezeitenströmungen sind zum einen, dass es sich um eine sehr genau vorhersagbare, erneuerbare Energiequelle handelt, deren Nutzung nur eine sehr geringfügige, lokale Beeinflussung der Umwelt beinhaltet. Zum anderen weist sie eine deutlich höhere Energiedichte auf als beispielsweise Windenergie, jedoch in einer extrem technik-feindlichen Umgebung. Wie schon erwähnt gibt es bezüglich des technisch nutzbaren Potenzials keine globalen genauen Zahlen. Jedoch kann man davon ausgehen, dass mindestens 1.000 TWh/a nachhaltig nutzbar sind. Das würde ungefähr sechs Prozent des heutigen weltweiten Strombedarfs entsprechen. Die geeignetsten Regionen sind in Abbildung 5 zu sehen.

Freistrom-Turbinen nutzen die kinetische Energie der Strömung. Die Turbine kann aber nicht die gesamte Strömungsenergie umsetzen, da ja das Fluid auch wieder abströmen muss. Nach Betz ist das Maximum der erzielbaren Leistung gegeben durch

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \rho \cdot A \cdot v^3$$

dabei ist ρ die Dichte des Fluides, v die Strömungsgeschwindigkeit und A die Rotorfläche. Man sieht also, dass die Leistung mit der dritten Potenz der Strömungsgeschwindigkeit ansteigt.

In Abbildung 6 wird das noch einmal verdeutlicht. Dort ist die maximal erzielbare theoretische und die elektrische Leistung über der Strömungsgeschwindigkeit für einen Rotor mit 16 Metern Durchmesser aufgetragen. Man sieht, dass an geeigneten Standorten eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens zwei bis 2,5 Metern pro Sekunde herrschen sollte, andernfalls ist die Leistungsausbeute zu gering.



Abb. 5: Geeignete Regionen zur Nutzung von Gezeitenströmungen. (Quelle: Statkraft)

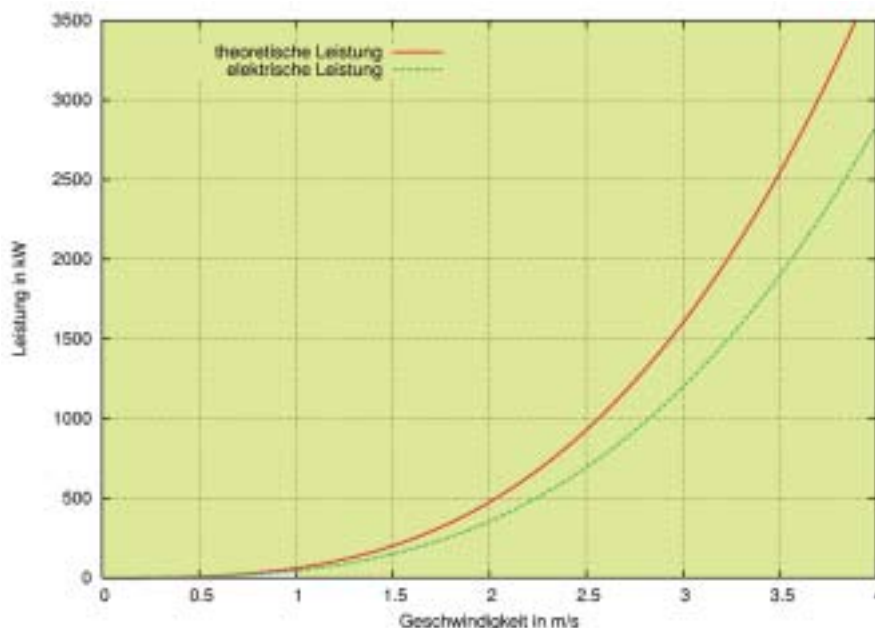


Abb. 6: Leistungsausbeute in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit bei einem Rotor mit 16 Metern Durchmesser.

getauft. Da der jetzige Standort des Projektes in einem taifungefährdeten Gebiet liegt, wurde von den schwimmenden Einheiten Abstand genommen und stattdessen eine Brückenkonstruktion als Haltestruktur gewählt. Der Projektname „Seaturtle“ wurde aber beibehalten.

Das Seaturtle-Projekt soll an der Südspitze von Südkorea in der Provinz Wando gebaut werden. Der geplante Standort befindet sich in einer Meerenge zwischen dem Festland und der Insel Wando (Abb. 8), dadurch herrschen dort relativ hohe Strömungsgeschwindigkeiten. Die maximale Geschwindigkeit bei Springflut – das bedeutet, dass die Anziehungskräfte vom Mond und Sonne in der gleichen Richtung wirken – beträgt 3,4 Meter pro Sekunde bei ansteigendem Wasser und 3,1 Meter pro Sekunde bei Ebbe. Bei Nippflut jedoch, wenn die Anziehungskräfte vom Mond und Sonne senkrecht aufeinander stehen, ergeben sich lediglich 1,5 Meter pro Sekunde beziehungsweise 1,4 Meter pro Sekunde. Der idealisierte Geschwindigkeitsverlauf ist in Abbildung 9 dargestellt.

Da sich die Leistung, wie oben erläutert, proportional zur dritten Potenz der Strömungsgeschwindigkeit verhält, hat dieser Geschwindigkeitsverlauf eine starke Schwankung der zur Verfügung stehenden Leistung zur Folge. In Abbildung 10 ist der entsprechende Verlauf der elektrischen Leistung aufgetragen, diese Werte gelten ebenfalls für einen Propeller mit 16 Metern Durchmesser. Darin enthalten sind die Wirkungsgrade des Propellers, des Generators und des Frequenzumrichters.

Der gezeigte Geschwindigkeitsverlauf ist nur idealisiert. In Wirklichkeit sind dem Verlauf Turbulenzen überlagert. Diese bewirken schnelle Geschwindigkeits- und damit auch Leistungsänderungen an der



Abb. 8: Lage des Seaturtle-Projekts.

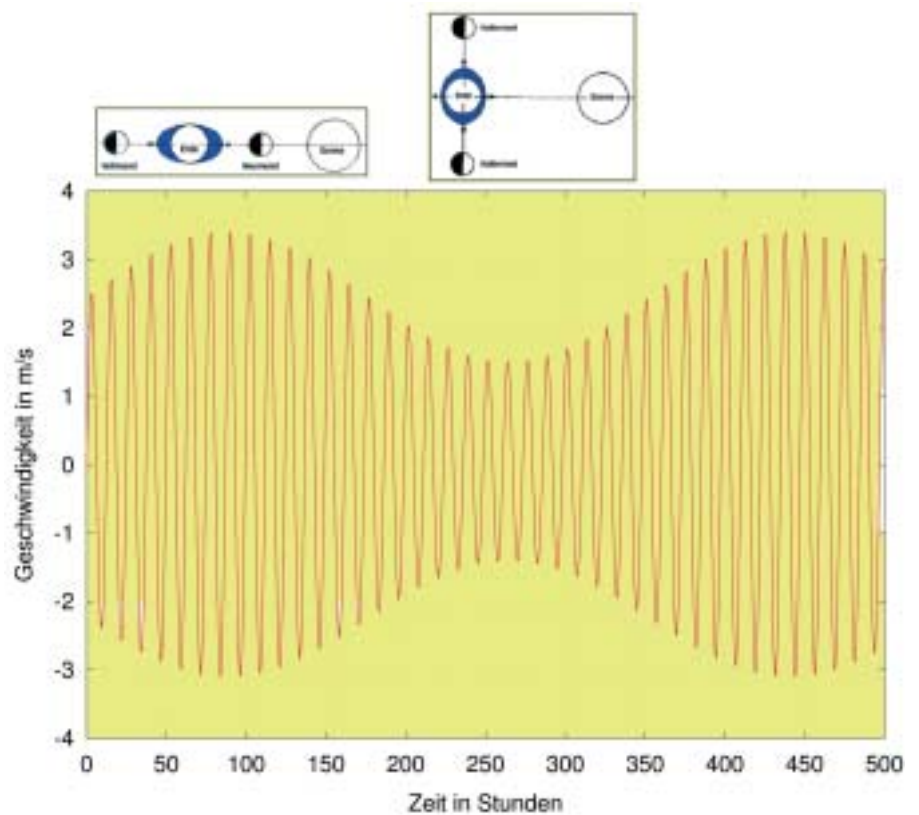


Abb. 9: Erwarteter Geschwindigkeitsverlauf am Standort.



Abb. 7: Nachbau eines Seaturtle-Schiffs im War Memorial Museum in Seoul, erster Entwurf einer schwimmenden Turbineneinheit.

kungen, was ebenfalls zu dynamischen Lasten auf den Rotor führen würde. Bei einer Wassertiefe von 30 Metern, wie sie in Wando vorliegt, kann ein Rotor-Durchmesser von 16 Meter sinnvoll realisiert werden. Dies ist in Abbildung 12 noch einmal dargestellt.

Wie erwähnt bewirken sowohl das Grenzschichtprofil als auch die örtlichen Geschwindigkeitsschwankungen dynamische Belastungen auf die Rotorblätter und auch Kippmomente, die von der Haltestruktur aufgenommen werden müssen. Es ist deshalb sehr wichtig, die genauen Strömungsverhältnisse zu kennen. Am Standort in Wando werden deshalb zur Zeit ausführliche Strömungsmessungen durchgeführt. Zum einen werden hochauflösende Langzeitmessungen an ausgewählten Stellen mittels am Boden verankerten „Akustik-Doppler-Current-Profiler“ (ADCP) gemacht. Zum anderen

werden von einem Schiff aus in verschiedenen Querschnitten Geschwindigkeitsprofile ermittelt, um die genauen Strömungsverhältnisse zu kennen und damit auch den genauen Standort der einzelnen Turbinen festlegen zu können.

In einem ersten Schritt soll ein Prototyp gebaut werden, der aus drei Turbinen mit je 16 Metern Durchmesser und einem Megawatt Leistung besteht. Abbildung 13 zeigt das mögliche Aussehen einer solchen Anlage. Sie soll aus einer „Brückenkonstruktion“ mit zwei Pfeilern und einem Querträger bestehen, an dem die drei Turbineneinheiten befestigt werden. Gegenwärtig werden aber auch andere Halterungsstrukturen, zum Beispiel „Monopiles“, untersucht und am Ende soll natürlich die kostengünstigste Lösung gewählt werden. Dies ist jedoch abhängig von der Wassertiefe, der Beschaffenheit des Untergrunds usw.

Turbine. In Abbildung 11 sind reale Strömungsmesswerte an einem vergleichbaren Standort (Standort des Seaflow-Projekt nahe Bristol) gezeigt.

Für das Seaturtle-Projekt werden ähnliche Schwankungen erwartet, allerdings wurde dort mit ausführlichen Strömungsmessungen erst begonnen und es liegen demzufolge noch keine endgültigen Messwerte vor. Außerdem weist die Strömung natürlich auch einen Profilverlauf über die Wassertiefe auf. In Bodennähe bildet sich eine Grenzschicht mit niedriger Geschwindigkeit aus. Dieser Bereich ist zur Nutzung ungeeignet und man muss einen gewissen Abstand zum Boden einhalten.

In der Nähe der Oberfläche wirkt zum einen der Einfluss der Gezeiten, das heißt der Wasserspiegel bewegt sich mit Ebbe und Flut auf und ab. Zum anderen wirken dort auch die Wellen, das heißt der Wasserspiegel hebt und senkt sich durch die Wellen. Da der Propeller aber stets völlig eingetaucht sein muss – sonst würden sehr große dynamische Kräfte auf Propeller, Lager und Struktur wirken –, muss zur Wasseroberfläche ebenfalls ein gewisser Abstand eingehalten werden. Die Wellen bewirken dabei nicht nur eine Auf- und Abbewegung der Wasseroberfläche, sie führen auch zu Geschwindigkeitsschwän-

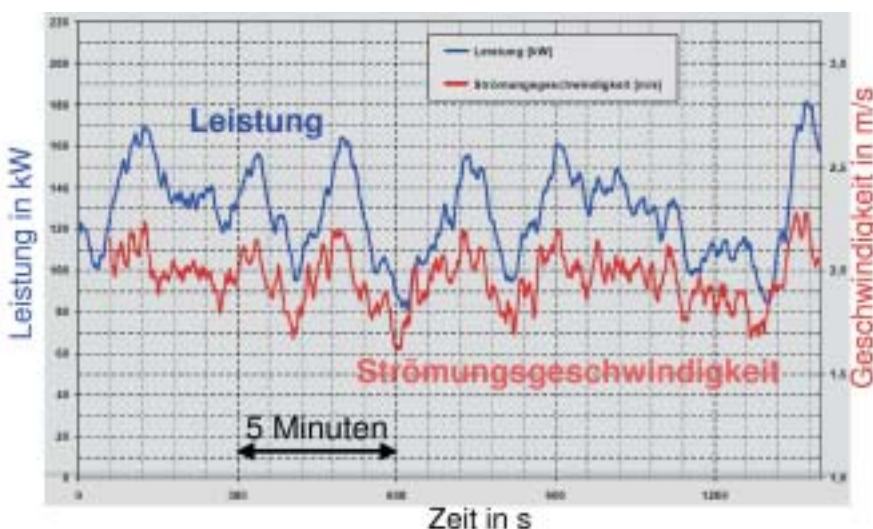


Abb. 11: Gemessener Geschwindigkeitsverlauf für das Seaflow-Projekt. (Quelle: ISET,Kassel)

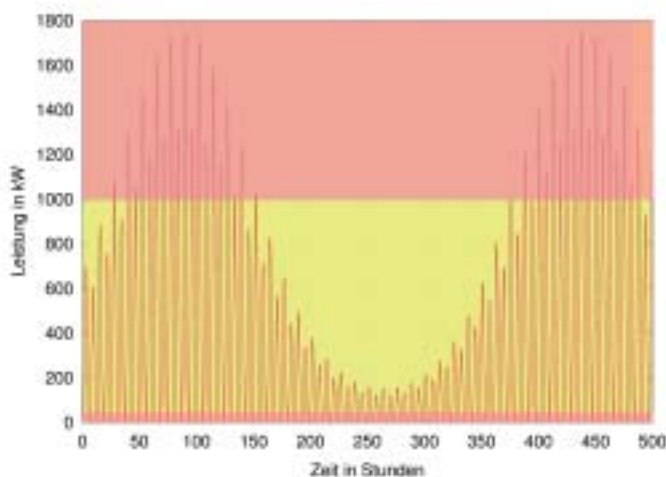


Abb. 10: Erwarteter Leistungsverlauf.

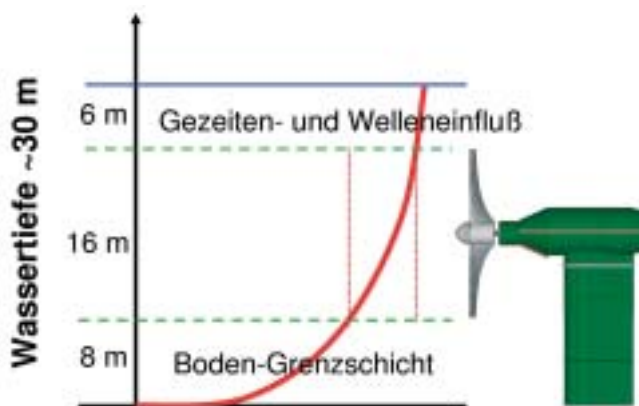


Abb. 12: Schematischer Geschwindigkeitsverlauf über die Wassertiefe.

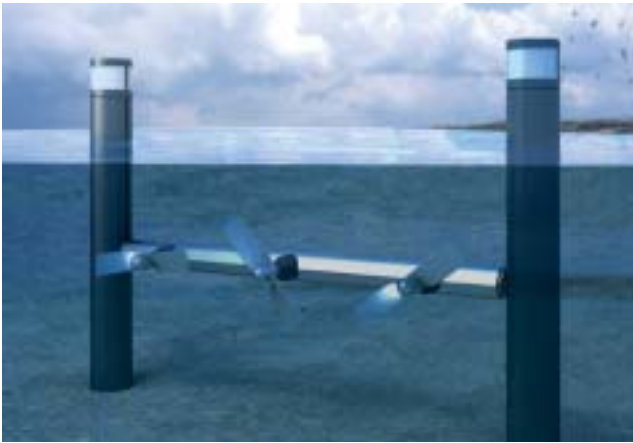


Abb. 13: Aussehen des Prototypen.

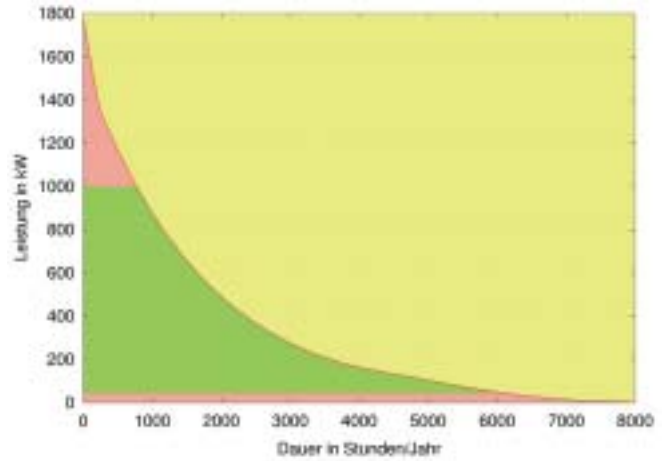


Abb. 14: Dauerlinie einer Turbine.

Die Auslegung der Turbine kann natürlich nicht auf die maximal auftretende Leistung erfolgen, diese wäre ja nur sehr selten vorhanden und die Turbine würde demzufolge fast ausschließlich im Teillastbetrieb arbeiten. Es muss also die Leistung entsprechend begrenzt werden. In Abbildung 14 ist die Dauerlinie der Anlage aufgetragen. Diese gibt an, wie lange eine entsprechende Leistung im Jahr zur Verfügung steht. Als Beispiel liegt eine Leistung von mehr als 500 Kilowatt ca. 2.000 Stunden im Jahr vor.

Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade aller Komponenten ergibt sich eine optionale Auslegung für eine maximale Leistung von einem Megawatt. Die größeren auftretenden Leistungen können dann nicht mehr genutzt werden. Bei zu kleiner Strömungsgeschwindigkeit ist das Drehmoment der Turbine zu klein und sie läuft nicht an. Damit ergibt sich das in Abbildung 14 eingezeichnete Arbeitsband.

Da es sich im off-shore-Bereich um eine sehr technik-feindliche Umgebung handelt und notwendige Wartungsarbeiten extrem aufwändig und teuer sind, muss bei einer Anlage auf ein äußerst robustes Design geachtet und das Ausfallrisiko minimiert werden. Gleichzeitig muss auf eine hohe Lebensdauer Wert gelegt werden, da die Investitionskosten sehr hoch sein werden. Natürlich muss auch auf die Umweltverträglichkeit geachtet werden. Da beim Betrieb des Prototyps noch kein Spezialwerkzeug (zum Beispiel Jack-up-rig) zur Verfügung stehen wird – durch die hohen Kosten kann das erst beim Bau vieler Anlagen wirtschaftlich werden –, muss zunächst auch auf einen relativ leichten Zugang zu den Turbinen und auf einen möglichst hohen Wirkungsgrad geachtet werden.

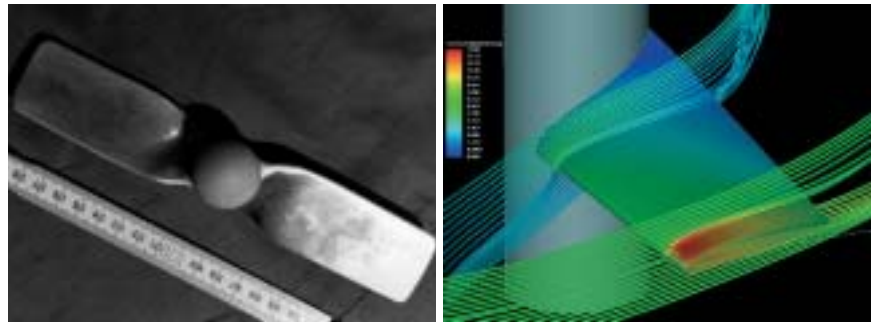


Abb. 15: Modellrotor und Simulationsergebnisse der Strömung um ein Rotorblatt.

Aus diesen Forderungen ergeben sich die folgenden Kriterien für die Konstruktion:

- Feste Schaufeln, keine Pitch-Verstellung, damit reduziert man die Antriebe und Dichtungen usw.,
- variable Drehzahl, damit kann der stark veränderlichen Anströmungsgeschwindigkeit Rechnung getragen werden,
- robustes Blattdesign, man verzichtet auf hochgezüchtete Laminarprofile, um auch bei leichter Verschmutzung und Muschelbesatz des Rotors keinen starken Wirkungsgradeinbruch zu erhalten,
- Verwendung von getesteten Standard-Teilen, um das Ausfallrisiko gering zu halten,
- Verwendung eines „Turbinenlifts“, um die Turbine an die Wasseroberfläche zu bringen,
- Drehen der gesamten Turbineneinheiten, um den wechselnden Strömungsrichtungen Rechnung zu tragen, dazu wird der Tragbalken an den beiden Pfeilern drehbar gelagert, beim Wechsel der Strömungsrichtung werden die drei Einheiten über den Kopf gedreht.

Die Turbinenauslegung wurde mit Hilfe von Strömungssimulationen durchge-

führt. Am Luftversuchsstand des Instituts wurden zudem Luftversuche durchgeführt, um die Simulationen zu validieren. In Abbildung 15 sind ein Modellrotor sowie die Ergebnisse einer Strömungssimulation dargestellt. Abbildung 16 zeigt die berechneten Kennlinien für einen optimierten Rotor. Dargestellt sind Leistungsbeiwert und Drehmomentbeiwert über die Schnelllaufzahl, dies ist eine Kennlinienform, wie sie auch bei Windturbinen üblich ist. Der Leistungsbeiwert gibt dabei die Leistungsausbeute bezogen auf die gesamte kinetische Energie der Strömung im Rotorquerschnitt an. Die

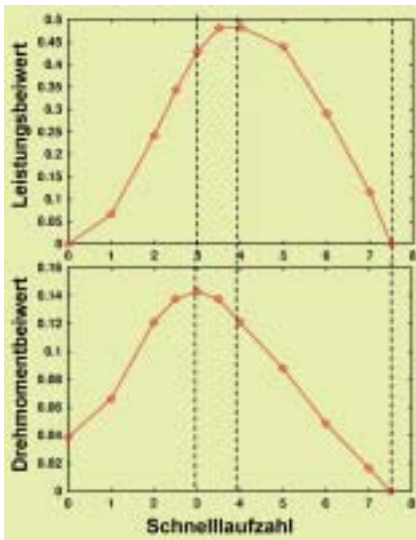


Abb. 16: Berechnete Propellerkennlinien.

Schnellaufzahl ist das Verhältnis von Umfangsgeschwindigkeit an der Blattspitze zu ungestörter Anströmgeschwindigkeit. Sie stellt also eine normierte Drehzahl dar. Wie oben erwähnt, kann der Leistungsbeiwert maximal $16/27$ betragen, mehr Energie kann der Strömung nicht entzogen werden. Das bedeutet, dass der Rotor bei einem Leistungsbeiwert von 0,49 einen Wirkungsgrad von 83 Prozent besitzt.

Es ist wünschenswert, einen Rotor mit möglichst hoher Schnellaufzahl und damit hoher Drehzahl auszulegen, da dann der Generator beziehungsweise das Getriebe kleiner werden. Dann sind auch die auftretenden Momente kleiner und die Kosten von Welle, Lager usw. werden gesenkt. Die erreichbare Schnellaufzahl wird jedoch durch die Kavitation an der Flügelspitze begrenzt. Wählt man eine zu hohe Drehzahl, ist die Umfangsgeschwindigkeit an der Blattspitze so groß, dass durch die sich ergebende Druckabsenkung der Dampfdruck des Wassers erreicht wird und es somit zum Verdampfen (Kavitation) kommt.

Der Drehmomentbeiwert zeigt das entsprechend bezogene Drehmoment. Im Verlauf sieht man, dass das Drehmoment zu langsamen Drehzahlen hin ein Maximum besitzt und dann wieder abnimmt. Der Propeller kann deshalb nur im rechten Teil der Kennlinie stabil betrieben werden. Der linke Teil der Kennlinie ist instabil.

Betrachtet man die Rotorblattform, so fällt auf, dass sie an der Blattspitze eine deutlich längere Profildicke besitzt, als dies zum Beispiel bei Windturbinenblättern üblich ist. Der Grund dafür liegt darin, dass man versucht, ein möglichst hohes Anfahrtdrehmoment zu realisieren. Da die Rotorblätter zur Blattspitze hin hoch belastet bleiben, würde sich ein Spitzenwirbel aus der Umströmung der Blattspitze von der Druck- zur Saugseite einstellen. Dies kann durch das Anbringen eines Winglets auf der Druckseite des Flügels unterbunden werden, wie dies zum Beispiel auch bei den Tragflügeln moderner Verkehrsflugzeuge üblich ist. Man erreicht dadurch eine Wirkungsgradverbesserung von etwa zwei Prozent.

Wie oben erwähnt, sollen für den Triebstrang möglichst ausgereifte Standard-Bauteile verwendet werden. Abbildung 17 zeigt den Triebstrang. Er besteht aus der Welle, die mittels U-Boot-Dichtung gegen das Gehäuse abgedichtet ist. Die Welle ist konventionell gelagert. Die Verbindung zum Getriebe ist über eine flexible Kupplung realisiert, um Belastungsstöße auf das Getriebe zu vermeiden. Das Getriebe ist wiederum über eine flexible Kupplung mit integrierter Bremse mit dem Generator verbunden. Eine Bremse ist notwendig, da sonst die Turbine in einem Störfall nicht stillgesetzt werden könnte.

Derzeit wird eine Pilotanlage realisiert, an der ausführliche Tests durchgeführt werden. Nach dem erfolgreichen Testen

der Pilotanlage soll anschließend ein Anlagenpark mit ca. 600 Turbinen installiert werden. In Abbildung 18 ist eine Computeranimation des Parks dargestellt, wie er voraussichtlich im Jahre 2018 installiert sein könnte.

Im Oktober 2007 wurde im Beisein von Wirtschaftsminister Michael Glos ein „Memorandum of Understanding“ zum Kauf der ersten Turbinen für den Prototyp unterzeichnet.

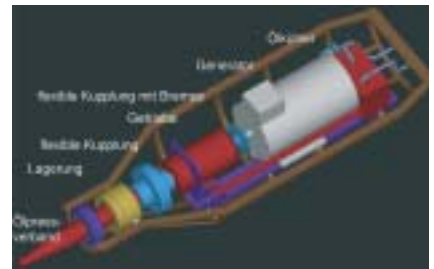


Abb. 17: Schematischer Aufbau des Turbinentriebstrangs.



Abb. 18: Vorgesehener Meeresströmungspark.



Unterschrift des „Memorandum of Understanding“ über den Kauf der ersten Turbinen (sitzend von links nach rechts) Soo-Yang Han, Geschäftsführer von Posco Engineering & Construction, Dr. Hubert Lienhard, Chef von Voith Siemens Hydro, und Jong-Seon Park, Geschäftsführer von Renetec. Im Hintergrund: Bundeswirtschaftsminister Michael Glos. (Quelle: Voith Siemens Hydro Power Generation)



Dr.-Ing.
Albert Ruprecht

Geboren am 8. Januar 1955 in Sigmaringen, studierte an der Universität Stuttgart Maschinenbau. Nach seinem Diplom 1981 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am damaligen Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen auf dem Gebiet der numerischen Strömungsmechanik. Nach seinem Forschungsaufenthalt am Imperial College in London bei Prof. D. B. Spalding promovierte Albert Ruprecht 1989 in Stuttgart bei Prof. Günter Lein. Heute ist er stellvertretender Institutsleiter am Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen. Er leitet dort die Forschungsbereiche Numerische Strömungsmechanik, Meeresenergie und Anlagendynamik.