



WISSENSCHAFTLICHE  
DIENSTE  
DES  
DEUTSCHEN  
BUNDESTAGES

---

## **Das Meer als Energiequelle**

Wellenkraftwerke, Osmose-Kraftwerke und weitere Perspektiven  
der Energiegewinnung aus dem Meer

- INFO-BRIEF -

**Dr. Daniel Lübbert**

## **Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages**

Verfasser: Dr. Daniel Lübbert

Das Meer als Energiequelle  
Wellenkraftwerke, Osmose-Kraftwerke und weitere Perspektiven der  
Energiegewinnung aus dem Meer

INFO-BRIEF WF VIII - 116/2005

Abschluss der Arbeit: 10.11.2005

Fachbereich VIII: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,  
Bildung und Forschung

Hintergrundinformationen zum Thema dieser Ausarbeitung lieferten Herr Dipl.-Phys. Jochen Bard, Institut für Solare Energieversorgungstechnik Kassel, sowie Prof. Klaus-Viktor Peinemann, GKSS Forschungszentrum Geesthacht.

Ausarbeitungen und andere Informationsangebote der Wissenschaftlichen Dienste geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Die Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste sind dazu bestimmt, Mitglieder des Deutschen Bundestages bei der Wahrnehmung des Mandats zu unterstützen. Der Deutsche Bundestag behält sich die Rechte der Veröffentlichung und Verbreitung vor. Diese bedürfen der Zustimmung des Direktors beim Deutschen Bundestag.

## **Inhalt**

<b>1.</b>	<b>Einleitung - Wasserkraft an Land und auf See</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Gezeitenkraftwerke</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Wellenkraftwerke</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>Strömungskraftwerke</b>	<b>9</b>
<b>5.</b>	<b>Meereswärmekraftwerke</b>	<b>14</b>
<b>6.</b>	<b>Osiose-Kraftwerke</b>	<b>16</b>
<b>7.</b>	<b>Fazit - Meeresenergie</b>	<b>23</b>
<b>8.</b>	<b>Quellen und Literaturangaben</b>	<b>25</b>

## 1. Einleitung - Wasserkraft an Land und auf See

Die Wasserkraft ist eine schon seit langer Zeit bekannte und weltweit bereits intensiv genutzte Form der erneuerbaren Energien. Schon vor Jahrhunderten wurde die mechanische Energie des Wassers in Mühlen genutzt. Seit der Nutzbarmachung des elektrischen Stroms im 19. Jahrhundert sind an zahlreichen Flussläufen in Europa Wasserkraftwerke gebaut worden. Auch weltweit wird das Potenzial genutzt: Das derzeit größte Wasserkraftwerk ist in Itaipú<sup>1</sup> an der Grenze zwischen Brasilien und Paraguay in Betrieb. Mit einer installierten Leistung von 12.600 MW produziert es mehr Strom als 10 große Kohle- oder Kernkraftwerke. Die Turbinen des derzeit im Bau befindlichen Drei-Schluchten-Staudamms in China sollen ab 2009 eine noch deutlich höhere Leistung von 18.200 MW bereitstellen.

Konventionelle Wasserkraftwerke nutzen entweder die hohen Durchflussmengen großer Flüsse (Laufwasserkraftwerke) oder große Höhenunterschiede im Gebirge (Speicherkraftwerke). Sie werden wegen ihrer hohen Zuverlässigkeit und Versorgungssicherheit, geringen Betriebskosten (bei allerdings hohen anfänglichen Investitionskosten) und ihrer langen Lebensdauer geschätzt. Im Unterschied zu vielen anderen Kraftwerksarten produzieren sie Strom weitgehend ohne Freisetzung von Kohlendioxid oder anderen klimaschädlichen Treibhausgasen. Jedoch ist die Nutzung der Wasserkraft nicht völlig unproblematisch. Ökologische Folgen für Flussläufe, aber auch die Folgewirkungen für Anwohner, beispielsweise beim Anlegen von künstlichen Stauseen, können die Umweltbilanz eines Wasserkraftwerks beeinträchtigen.

Von den möglichen Standorten für Laufwasserkraftwerke und Speicherkraftwerke in Europa werden viele der ergiebigeren bereits genutzt. In Deutschland betrug im Jahr 2004 die installierte Leistung von Wasserkraftwerken ca. 4.600 Megawatt, womit 21 Terawattstunden (Milliarden Kilowattstunden) Strom - entsprechend 3,5% des gesamten Stromverbrauchs – erzeugt wurden (BMU 2005). Ein weiterer Ausbau um zusätzliche 3-8 Terawattstunden pro Jahr wäre technisch und ökonomisch voraussichtlich möglich (Heinloth 2003). Allerdings gehen manche Experten aufgrund rechtlicher und politischer Rahmenbedingungen eher von einer Stagnation oder sogar einem Rückgang der Nutzung der Wasserkraft in dieser Form aus.

Bisher noch weitestgehend ungenutzt ist eine gänzlich andere Art der Wasserkraft: die Energiegewinnung aus dem Meer (NREL 2005a; EU-Kommission 2005). Die Weltmeere stellen ein enormes Reservoir an Energie dar, für dessen technische Nutzung heute verschiedene, detaillierte Konzepte existieren, das aber in der Praxis noch weitgehend unerschlossen ist. Aufgrund seiner vielfältigen Bewegungsformen enthält

---

1 Weitere Informationen zum Kraftwerk Itaipú unter <http://www.itaipu.gov.br/>.

das Wasser der Weltmeere vor allem erhebliche Bewegungsenergie. Deutlich wird dies nicht nur an Wellen, Gezeiten und Meeresströmungen, sondern besonders bei Sturmfluten und Flutwellen. Konzepte zur technischen Ausnutzung dieser Energieformen existieren teilweise seit Jahrzehnten. Ihre praktische Umsetzung wird in jüngster Zeit aufgrund technischer Fortschritte wieder verstärkt diskutiert.

Die Meeresenergie als eine Form der erneuerbaren Energien hat bereits mehrfach Eingang in die Arbeit des Deutschen Bundestags gefunden (s. BT-Drs. 14/505 und 14/6541, Plenarprotokoll 14/195). Diskutiert wurde vor allem ihre verstärkte Förderung im Rahmen von Programmen wie dem Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union. Im Zeitraum von 1992 bis 2004 wurden insgesamt 26 Forschungsprogramme zur Meeresenergie mit einem Gesamtbudget von 28 Millionen Euro von der EU gefördert<sup>2</sup>.

Im Folgenden werden einige Varianten der möglichen Nutzung von Meeresenergie vorgestellt. Die von den fünf zu behandelnden Kraftwerkstypen ausgenutzten Energieformen lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- mechanische Energieformen (Gezeitenkraftwerke, Wellenkraftwerke, Strömungskraftwerke), die bereits heute teilweise genutzt werden,
- thermische Energie (Wärmeenergie), die zukünftig in Meereswärmekraftwerken („ozeanthermische Gradienten-Kraftwerke“) zur Stromerzeugung genutzt werden könnte,
- und
- Energie aus Unterschieden im Salzgehalt, die möglicherweise in Zukunft in Kraftwerken eines neuen Typs (Osmose-Kraftwerk) nutzbar gemacht werden könnte.

Für jede Kraftwerksart wird kurz die grundsätzliche Funktionsweise und der derzeitige technische Entwicklungsstand erläutert sowie eine Abschätzung des nutzbaren Potenzials gegeben. Im letzten Abschnitt werden noch einmal die Perspektiven für Deutschland zusammengefasst.

## **2. Gezeitenkraftwerke**

Gezeitenkraftwerke nutzen die mechanische Energie, die im natürlichen Wechsel von Ebbe und Flut enthalten ist (World Energy Council 2001c; U.S. Department of Energy 2005). Zum Bau von Kraftwerken werden Flussmündungen oder natürliche Meeresbuchten mit Staumauern vom offenen Meer abgetrennt. Durch Öffnungen, die

---

<sup>2</sup> Weitere Informationen zur EU-Förderung unter [http://europa.eu.int/comm/research/energy/nm/nm\\_rt/nm\\_rt\\_oes/article\\_1131\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/research/energy/nm/nm_rt/nm_rt_oes/article_1131_en.htm) [Stand 29.11.2005]

mit Turbinen versehen werden, kann bei Flut das Meerwasser einströmen, bei Ebbe wieder ablaufen. Die Turbinen können so in beiden Flussrichtungen Strom erzeugen. Bei höchstem und niedrigstem Wasserstand stehen sie für kurze Zeit still, erbringen also insgesamt eine periodisch schwankende elektrische Leistung. Zu dieser kurzfristigen Schwankung (Periode ca. 12,5 Stunden) kommt zudem noch eine längerfristige Schwankung, die dem Rhythmus der Spring- und Nipptiden folgt. Zusätzlich wird die tatsächlich erbrachte Leistung in geringerem Umfang durch die Wetterbedingungen (Wind, Niederschläge, Sturmfluten) beeinflusst.

Ein erstes Gezeitenkraftwerk wurde bereits 1966 an der Mündung des Flusses Rance bei Saint-Malo an der französischen Atlantikküste in Betrieb genommen. Mit Hilfe des hohen Tidenhubs von 12-16 Metern wird eine maximale Leistung von 240 MW erreicht. Hier wird Strom zu Kosten von 10-13 Cent pro Kilowattstunde erzeugt, bei anfänglichen Investitionskosten von etwa 2.000 Euro pro Kilowatt installierter Leistung.

Der Bau eines Gezeitenkraftwerks ist generell nur an Küstenabschnitten mit großem Höhenunterschied zwischen Ebbe und Flut (Tidenhub) wirtschaftlich aussichtsreich. Vielfach wird ein Minimum von 5 m Tidenhub genannt. Nach Schätzungen von Experten wird diese Bedingung von mindestens 100 Standorten weltweit erfüllt; optimistischere Prognosen sprechen von über 100 Standorten allein in Europa. Das weltweite Potenzial wird mit über 30.000 MW angegeben.

Ein großes Gezeitenkraftwerk mit bis zu 5000 MW Leistung wurde in der Fundy-Bucht (Südostküste Kanadas) geplant, jedoch bisher wegen hoher Kosten und ökologischer Bedenken nicht realisiert. Ein noch größeres Kraftwerk könnte bei Bristol an der Mündung des Flusses Severn zwischen England und Wales gebaut werden. Mit Hilfe einer 16 km langen Staumauer könnte hier eine Leistung von 8000 MW erzeugt werden. Damit könnten bis zu 7 Prozent des Stromverbrauchs von England und Wales gedeckt werden. Allerdings wurde auch dieses Projekt bisher nicht realisiert, ebenfalls aufgrund hoher Baukosten und ökologischer Folgewirkungen.

Technische Schwierigkeiten der Gezeitenkraftwerke liegen vor allem in der Korrosionsanfälligkeit der Anlagen, die aufgrund des Salzgehalts von Meerwasser deutlich höher ist als bei Süßwasser. Weiterhin kann die Verstopfung durch Sand und Sedimente problematisch sein. Bedenken wegen der Umweltwirkungen von Gezeitenkraftwerken beziehen sich vornehmlich auf den Bau großer Staumauern, mit denen Flussmündungen versperrt werden. Solch massive Eingriffe in die natürlichen Flussläufe können erhebliche Beeinträchtigungen von Fauna und Flora zur Folge haben. Zur Verminderung der ökologischen Folgewirkungen wurde im Zusammenhang mit dem Severn-Projekt vorgeschlagen, statt einer durchgehenden Staumauer nur einzelne

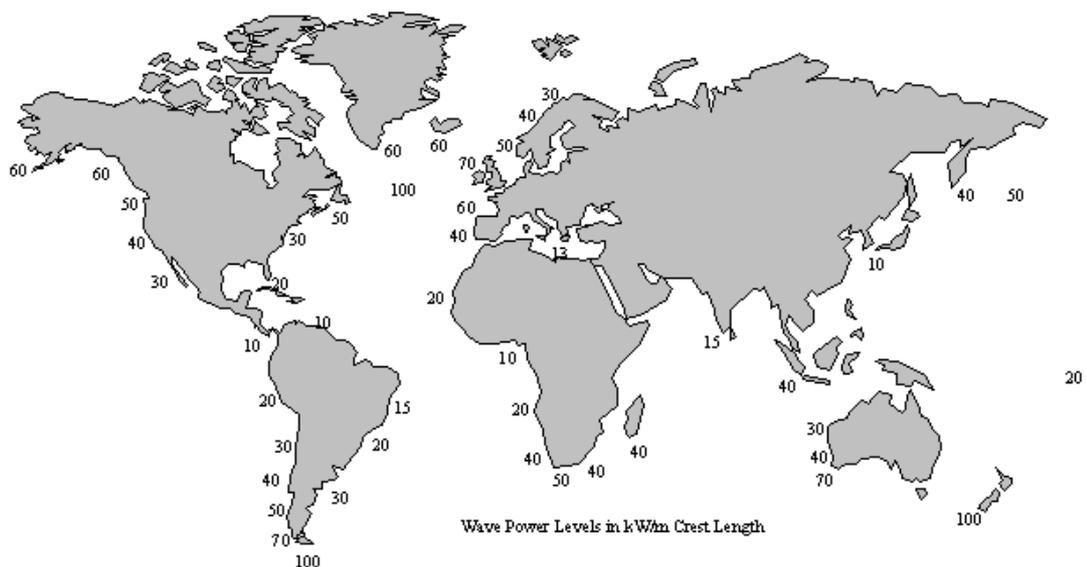
künstliche Inseln in Form von kreisförmigen Staumauern (sog. „tidal lagoons“) in der Flussmündung zu errichten.

Das Potenzial für den Bau von Gezeitenkraftwerken an Standorten in Deutschland wird wegen des relativ geringen Tidenhubs in Nord- und Ostsee von maximal 2 - 3,5 m als sehr gering eingeschätzt.

### 3. Wellenkraftwerke

Wellen stellen eine zeitlich und räumlich weniger regelmäßige, aber nicht weniger energiereiche Art der Meeresbewegung dar (World Energy Council 2001d; EU-Kommission 2002). Schätzungen besagen, dass weltweit durch die Wellenbewegung eine Leistung von 15-30 Kilowatt pro Meter Küstenlinie (kW/m) freigesetzt wird. Könnte diese Energie vollständig zur Stromerzeugung genutzt werden, so würde ein Küstenabschnitt von 30-60 km jeweils ein großes fossiles oder Kernkraftwerk ersetzen. Auf diese Weise könnten etwa 15 Prozent des weltweiten Strombedarfs befriedigt werden.

An deutschen Küsten liegt die Wellenenergie mit 10-20 kW/m (Nordsee) bzw. 5-10 kW/m deutlich niedriger, und so wird das maximale theoretische Potenzial für Deutschland auf 1-2 Terawattstunden (Milliarden Kilowattstunden) pro Jahr geschätzt. In anderen europäischen Ländern existieren jedoch geeignetere Standorte; insbesondere werden die Küsten vor Spanien, Portugal, Irland, Großbritannien und Norwegen als aussichtsreich angesehen.



**Abbildung 1: Verteilung der Wellenenergiedichte in den Weltmeeren. Besonders hohe Werte werden im Nordatlantik, vor Alaska sowie an den Südküsten von Australien, Afrika und Südamerika erreicht. [Quelle: World Energy Council, <http://www.worldenergy.org> ]**

Die technische Umsetzung kann auf verschiedenen Prinzipien basieren. Eine Möglichkeit besteht darin, durch die Wellenbewegung in einem abgeschlossenen Röhrensystem (sog. *oscillating water column*, OWC) mit Hilfe von Wasser oder Luft als Arbeitsmedium eine Turbine antreiben zu lassen. Ein erstes Kraftwerk dieses Typs in Schottland erzeugt seit dem Jahr 2000 eine (noch geringe) Leistung von 500 Kilowatt. Ein größeres Wellenkraftwerk mit bis zu 1,5 Megawatt Leistung ist in Planung.

Ein anderes Konzept für die Ausnutzung der Wellenenergie verfolgt das von der EU geförderte Projekt „Wave Dragon“<sup>3</sup> (Soerensen 2005). Hier läuft das Wasser aufgrund der Wellenbewegung eine wenige Meter hohe Rampe hinauf. Um eine höhere Energieausbeute zu erzielen, wird mit Hilfe langer Ausläufer (sog. Wellenkonzentrator) eine größere Wassermenge in den Behälter geleitet. Beim Rückfluss ins Meer treibt das Wasser eine Turbine an, die über einen Generator Strom erzeugt. Ein Prototyp dieses Kraftwerkstyps wurde in Dänemark im Jahre 2003 in Betrieb genommen. Nach 15.600 Betriebsstunden wurde der Test am 30. Januar 2005 beendet. In den folgenden Projektphasen wird eine weitere Kostenreduzierung angestrebt.

Als besonderer Vorteil des Konzepts wird genannt, dass es nicht an Küsten gebunden sei, sondern auch auf hoher See realisiert werden könne. Allerdings steigt mit der Entfernung zur Küste auch der Aufwand für die Wartung und die Anbindung an das Stromnetz.



Abbildung 2: Foto das „wave dragon“ [Quelle: Wave Dragon ApS]

---

3 Weitere Informationen im Internet unter <http://www.wavedragon.net/> [Stand 20.10.2005]

Es existieren weitere, alternative Konzepte zur technischen Realisierung, so beispielsweise die Ausnutzung der gegenseitigen Bewegung von mehreren am Meeresboden verankerten Schwimmkörpern (Bojen).



**Abbildung 3: Alternatives Konzept der Energiegewinnung aus Wellen: Mehrere am Boden verankerte Schwimmkörper bewegen sich aufgrund der Wellen gegeneinander. Die Energie dieser Bewegung soll zur Stromerzeugung genutzt werden.**

Eine generelle Einschränkung beim Betrieb von Wellenkraftwerken könnte in den zu erwartenden zeitlichen Schwankungen der Stromproduktion liegen: Ähnlich wie bei Windkraftwerken unterliegt die erzielbare Leistung eines Wellenkraftwerks Variationen aufgrund des Wetters, die nicht vorhersehbar und nur schwer auszugleichen sind.

#### **4. Strömungskraftwerke**

Strömungskraftwerke nutzen die im Meer natürlich auftretenden Bewegungen großer Wassermassen, um deren Bewegungsenergie in elektrische Energie umzuwandeln (World Energy Council 2001; Uhlenbrock 2003; Bard 2004). Das Prinzip ist analog der Windkraft, bei der die Bewegungsenergie von Luftmassen zur Stromerzeugung eingesetzt wird. Tatsächlich erinnern aktuelle Prototypen von Strömungskraftwerken an unter Wasser aufgestellte Windräder.

Strömungen treten in den Weltmeeren aufgrund einer Vielzahl von Ursachen auf. Sie können durch Temperaturunterschiede bedingt sein, wie beispielsweise der Golfstrom im Nordatlantik. Die starke Verdunstung im Mittelmeer führt zu einer Strömung durch die Straße von Gibraltar, die verdunstetes Mittelmeer-Wasser durch frisches Atlantik-Wasser ersetzt. Schließlich verursacht auch der Wechsel der Gezeiten Bewegungen

großer Wassermengen. Vor allem diese Gezeiten-Strömungen könnten in Zukunft durch küstennahe Strömungskraftwerke zur Energiegewinnung genutzt werden. Insofern hängt das Konzept eng mit dem der Gezeitenkraftwerke zusammen. Doch ist die eigentliche Energiequelle hier nicht die unterschiedliche Wasserstandshöhe (Lageenergie des Wassers), sondern die durch den Wechsel der Gezeiten verursachte Bewegung des Wassers (Bewegungsenergie). Daher ist ein Strömungskraftwerk mit geringerem Aufwand – vor allem ohne den Bau einer Staumauer – zu realisieren. Zugleich wirkt es sich voraussichtlich auch weniger stark auf die marine Umwelt aus als ein Gezeitenkraftwerk.

Technisch kann die Energiegewinnung mit Hilfe von Rotoren realisiert werden, die durch die Wasserbewegung in Drehung versetzt werden und dadurch einen Strom erzeugenden Generator antreiben. Das Prinzip folgt dem der Windräder, wobei ein wichtiger Unterschied zwischen den Arbeitsmedien Luft und Wasser existiert: Aufgrund seiner höheren Dichte enthält Wasser wesentlich mehr Bewegungsenergie pro Kubikmeter bewegten Volumens als Luft. Ein Unterwasser-Rotor erzielt daher eine deutlich höhere Leistung als ein Windrad derselben Größe. Für dieselbe angestrebte Leistung kann ein Unterwasser-Rotor erheblich kleiner dimensioniert werden als ein Windrad. Zudem bereitet das Eigengewicht der Rotorblätter aufgrund des Auftriebs im Wasser weniger Probleme als bei Windrädern. Allerdings ist wegen der größeren Kräfte, die das strömende Wasser auf die Rotoren ausübt, eine stärkere Verankerung und eine größere mechanische Stabilität der Bauteile von Unterwasser-Rotoren erforderlich.



**Abbildung 4: Mögliches Meeresströmungskraftwerk, bestehend aus einer Reihe von im Meeresgrund verankerten Turbinen-Masten. Ein Rotor-Paar ist zu Wartungszwecken über Wasser gehoben. [Quelle: Marine Current Turbines Ltd., <http://www.marineturbines.com>]**

Insgesamt gelten die technischen Anforderungen an die Unterwasser-Rotoren als überschaubar, da bei ihrer Entwicklung auf Technologien nicht nur aus dem Bereich der Windenergie, sondern auch aus dem Schiffbau zurückgegriffen werden kann. Bei Fragen der Verankerung und Stabilität können teilweise sogar Erfahrungen aus dem Betrieb von Bohrinseln mit einbezogen werden.

Ein Strömungskraftwerk vor der Küste des englischen Distrikts North Devon wurde von einem britischen Ingenieurbüro in Zusammenarbeit mit deutschen und internationalen Partnern realisiert und von der EU-Kommission, dem englischen Department for Trade and Industry sowie der deutschen Bundesregierung gefördert (BINE 2004). Das Pilotprojekt mit dem Namen „Seaflow“ hat eine Nennleistung von 300 Kilowatt – die bisher jedoch nicht abgeführt wird, da keine Anbindung an das Stromnetz existiert - und ging am 16.06.2003 in Betrieb. In der ersten Projektphase hat es den beteiligten Wissenschaftlern bereits wichtige Daten für die weitere Optimierung der Konstruktion zukünftiger Strömungskraftwerke geliefert (Bard 2004). So hat sich der Einbau einer Hebeeinrichtung, mit deren Hilfe der Rotor zu Wartungszwecken über die Wasseroberfläche gefahren werden kann, als sinnvoll erwiesen. Der befürchtete Bewuchs durch Algen konnte mit Hilfe eines speziellen Anstrichs vermieden werden. Die nächste Projektphase („SeaGen“) soll bis 2006 zum Bau eines Prototyps einer kommerziellen Anlage mit einer höheren Leistung von 1,2 Megawatt führen. Die Hoffnungen der Projektpartner richten sich darauf, bis 2013 mehrere Kraftwerkparks mit einer Gesamtleistung von 100 MW zu errichten.



**Abbildung 5: Foto der Strömungsturbine „Seaflow“ während einer Wartungsphase. Die Turbine mit einer Nennleistung von 300 kW ist seit 2003 bei Lynmouth, Devon (GB), 3 km vor der Küste in der Nordsee installiert. [Quelle: Marine Current Turbines Ltd. ]**

Nach bisherigem Stand wird der so erzeugte Strom mit 15-20 Cent pro Kilowattstunde relativ teuer sein. Die Projektpartner erwarten jedoch im Zeitraum der nächsten 5-10 Jahre eine deutliche Kostenreduktion durch technologischen Fortschritt und Serienfertigung, die die Stromgestehungskosten auf 5-10 Cent pro Kilowattstunde drücken könnte. Die Investitionskosten für einen ersten Kraftwerkspark mit 20 Anlagen werden sich nach aktuellen Prognosen auf etwa 1.750 Euro pro Kilowatt installierter Leistung belaufen. Hauptkostenfaktor bleiben dabei hochwertige Materialien, die dem Strömungsdruck und der Korrosion durch Salzwasser widerstehen können.

Das Potenzial zur zukünftigen Stromerzeugung wird, sobald die Technologie einmal entwickelt ist, als hoch betrachtet. Schätzungen variieren von 140 bis zu 1500 Milliarden Kilowattstunden elektrischer Energie, die pro Jahr weltweit durch Strömungskraftwerke erzeugt werden könnten. Dies entspricht der Leistung einiger Dutzend bis einiger Hundert Kernkraftwerke. Die große Unsicherheit der Schätzungen ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Strömungsverhältnisse in den Weltmeeren nur an der Oberfläche gut bekannt sind. Für den Kraftwerksbau kommt es jedoch vor allem auf die Verhältnisse in 10-20 m Wassertiefe an, die weit weniger gut erforscht sind. Allgemein ist der Bau von Strömungskraftwerken überall dort aussichtsreich, wo das Wasser möglichst gleichmäßig und mit durchschnittlichen Geschwindigkeiten von mindestens 2-3 Metern pro Sekunde (knapp 10 km/h) fließt. Dies ist vor allem an Landspitzen, zwischen Inseln und in Meerengen der Fall. Die Meerestiefe muss an einem Kraftwerks-Standort auch bei Ebbe mindestens 10 m betragen, damit der Rotor immer von Wasser bedeckt bleibt, sollte aber gleichzeitig ein

Maximum von etwa 25 m nicht überschreiten, um die Verankerung auf dem Meeresboden nicht zu erschweren.

Europaweit wurden über 100 Standorte identifiziert, die diese Bedingungen erfüllen könnten. Dazu zählen die Straße von Messina zwischen Sizilien und dem italienischen Festland, Seegebiete um die griechischen Inseln und vor der norwegischen Küste sowie die Meerenge zwischen den britischen Inseln (Irische See). Schätzungen besagen, dass allein vor den britischen Küsten 30-60 Milliarden Kilowattstunden Strom pro Jahr erzeugt werden könnten. Damit wären 20% des britischen Stromverbrauchs gedeckt. In Deutschland gibt es hingegen kaum Potenzial für Strömungskraftwerke, da an Nord- und Ostsee nur eine relative geringe Bewegung der Wassermassen auftritt. Als einziger möglicher Standort wird die Südspitze der Insel Sylt genannt, wo pro Jahr etwa 150 Millionen Kilowattstunden elektrischer Energie erzeugt werden könnten. Als möglicher positiver Nebeneffekt eines Strömungskraftwerks an dieser Stelle wird auch der Küstenschutz genannt, da hierdurch die Strömung gedämpft und die Auswaschung von Sedimenten vermindert wird.

Insgesamt gelten Strömungskraftwerke nach bisherigem Kenntnisstand als sehr umweltverträglich, da Lärmemissionen oder Beeinträchtigungen der Wasserqualität, der Fisch- und Vogelwelt, der Fischerei und Schifffahrt nur in sehr geringem Maße auftreten. Bis zur kommerziellen Anwendungsreife ist allerdings noch ein weiter Weg

zurückzulegen.



**Abbildung 6: Einige geeignete Standorte für Strömungskraftwerke in Großbritannien und Frankreich. [Quelle: Marine Current Turbines Ltd.]**

Optimierungsbedarf besteht vor allem noch bei der Technologie des Triebstrangs, der Verankerung und der Anbindung an das Stromnetz per Unterwasser-Kabel. Vorteile könnten sich hierbei durch die Kombination von Strömungskraftwerken mit Offshore-Windparks ergeben, beispielsweise durch eine gemeinsame Netzanbindung.

Auch wenn der Bau von Kraftwerken an deutschen Küstenstandorten wenig aussichtsreich ist, könnten sich daher aus einer

Weiterentwicklung der Technologie interessante Perspektiven für Deutschland ergeben. Vor allem aufgrund der führenden Rolle deutscher Hersteller von Komponenten von Windkraft-Anlagen sind Exportchancen auch im Bereich der Strömungskraftwerks-Technologie für deutsche Firmen zu erwarten. Die Situation fügt sich insofern in den Rahmen der „Exportinitiative Erneuerbare Energien“, die nach Debatte im Deutschen Bundestag im Jahr 2002 beschlossen und mit deren Durchführung die Deutsche Energie-Agentur (DENA) beauftragt wurde<sup>4</sup>.

## 5. Meereswärmekraftwerke

Der Begriff „Meereswärmekraftwerk“ (engl. „Ocean thermal energy conversion“, OTEC) bezeichnet Anlagen, die aus der Temperaturdifferenz zwischen warmem Oberflächenwasser und kälterem Tiefenwasser Energie gewinnen und daraus Strom erzeugen (Vega 1999; DBEDT 2005). Als aussichtsreich gilt die Nutzung dort, wo der Temperaturunterschied zwischen den Oberflächenschichten in 0 bis 50 m Wassertiefe und dem Wasser in 800 bis 1000 m Tiefe etwa 20°C oder mehr beträgt (World Energy Council 2001b; NREL 2005b).

Technisch realisiert werden kann die Energiegewinnung mit Hilfe einer so genannten Wärmekraftmaschine. Ein geeignetes flüssiges Arbeitsmedium (z.B. Ammoniak) wird durch Kontakt mit dem wärmeren Wasser zur Verdampfung gebracht und leistet bei der dadurch verursachten Ausdehnung mechanische Arbeit, die über einen Generator zur Stromerzeugung genutzt wird. Danach wird das Arbeitsmedium durch Kontakt mit dem kälteren Wasser wieder abgekühlt und verflüssigt, wonach der Zyklus von vorne beginnt. Die Bauart ist analog der eines konventionellen Dampfkraftwerks, wobei ein Unterschied darin besteht, dass hier nur Arbeitsmedien verwendet werden können, die schon bei niedrigen Temperaturen sieden. Wasserdampf ist daher ungeeignet. In bisherigen Anlagen wurden vor allem Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Kohlenmonoxid (CO) verwendet. Diese Stoffe sind jedoch unter Umweltaspekten nicht unproblematisch.

Allgemeine physikalische Prinzipien besagen, dass der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine umso höher liegt, je größer der Temperaturunterschied zwischen den beiden Wasserreservoirs ist. Nimmt man Temperaturen von 26°C an der Oberfläche und 6°C in 1000 m Tiefe an, dann ergibt sich, dass maximal ein Anteil von 6,7 Prozent der Wärmeenergie in Strom umgesetzt werden kann. Aufgrund technischer Beschränkungen wird von einem realen Wirkungsgrad von nicht mehr als 3 Prozent

---

<sup>4</sup> Einrichtung: siehe BT-Drs. 14/8278, 14/9120. Bericht der Dena zum Handlungsbedarf bei der Exportförderung: siehe BT-Drs. 15/1862, 15/4868, 15/5938 sowie Plenarprotokoll 15/157. Weitere Informationen unter <http://www.exportinitiative.de>

ausgegangen. Hinzu kommt, dass ein Teil des gewonnenen Stroms wieder für Pumpen aufgewendet werden muss, mit denen das Tiefenwasser zur Oberfläche befördert wird. Dies bedeutet, dass für ein Kraftwerk mit nennenswerter Leistung große Durchflussmengen erforderlich sind. Die Anlagen haben daher im Verhältnis zu ihrer Energieausbeute notwendigerweise eine beträchtliche Größe.

Das grundlegende Prinzip wurde bereits im 19. Jahrhundert erkannt, unter anderem von dem Schriftsteller Jules Verne. Ein französischer Ingenieur führte 1930 auf Kuba ein erstes – noch erfolgloses – Pilotprojekt durch. In den siebziger Jahren stellte die US-Regierung erhebliche Fördermittel für die weitere Erforschung des Prinzips bereit. Daraufhin wurde 1979 auf Hawaii eine Pilotanlage mit 50 Kilowatt Generatorleistung in Betrieb gestellt; davon wurden 40 kW von den Pumpen aufgezehrt. 1981 wurde auf Nauru eine Anlage mit 100 kW Generatorleistung gebaut, deren Pumpen wiederum 90 kW verbrauchten. Von 1993 bis 1998 war auf Hawaii eine noch größere Anlage in Betrieb, die bei 210-250 kW Generatorleistung insgesamt 200 kW für Pumpen aufwenden musste. Der Netto-Energieertrag dieser Anlagen war also insgesamt sehr gering.

Meereswärmekraftwerke können prinzipiell entweder an Land oder auf See gebaut werden. Ein landgestützter Standort im küstennahen Bereich bietet Vorteile beim Bau und bei der Netzanbindung des Kraftwerks. Allerdings wird ein Betrieb nur dort möglich sein, wo bereits in Küstennähe Meerestiefen von mindestens 1000 m (und damit niedrige Wassertemperaturen) erreicht werden. Dies ist nur an ausgewählten Standorten in der Karibik, vor West- und Ost-Afrika, in Ozeanien und vor Indonesien der Fall. Ein Bau auf See erlaubt hingegen eine viel größere Flexibilität bei der Standortwahl, doch bereitet die sichere Verankerung in großer Tiefe sowie die Netzanbindung erhebliche Probleme und verursacht beträchtliche Kosten. Ein Ausweg für das Problem der Netzanbindung könnte im Zusammenhang mit einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft darin liegen, dass die gewonnene Energie nicht als elektrischer Strom, sondern in Form von Wasserstoff mit Tankschiffen abtransportiert wird. Generell liegen Bereiche hoher Oberflächen-Wassertemperaturen und damit großer Temperaturdifferenzen zum kalten Tiefenwasser ausschließlich in tropischen Breiten (s. Abbildung 7). Geeignete Standorte für den Bau von Meereswärmekraftwerken sind daher rund um den Äquator zu finden, vor allem in pazifischen und karibischen Inselstaaten, aber auch in den US-Staaten Hawaii und Florida. Für Deutschland und Europa stellt diese Art der Energiegewinnung dagegen keine realistische Option dar.

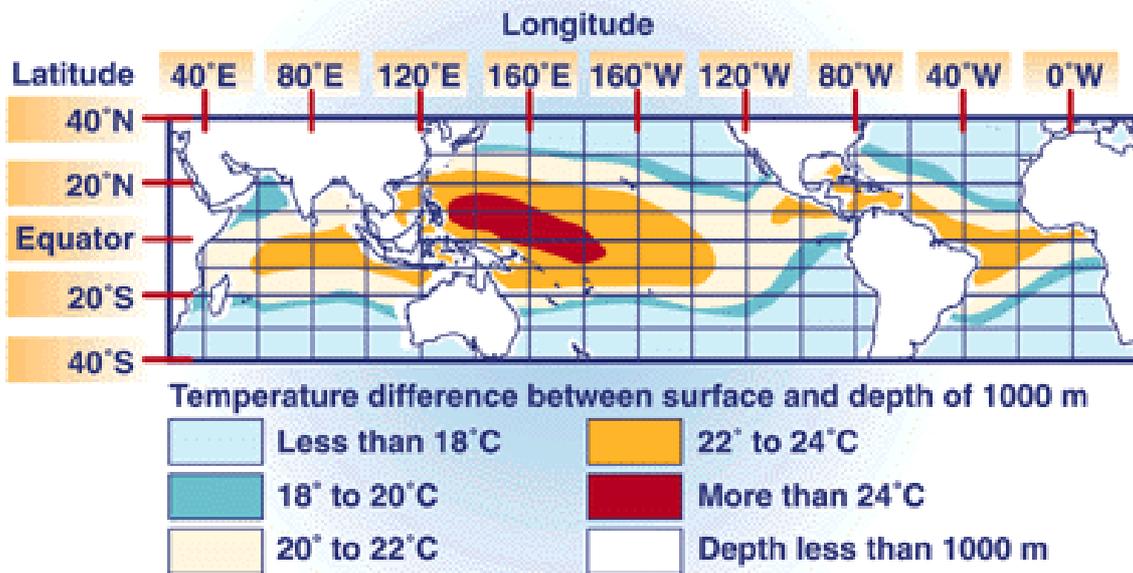
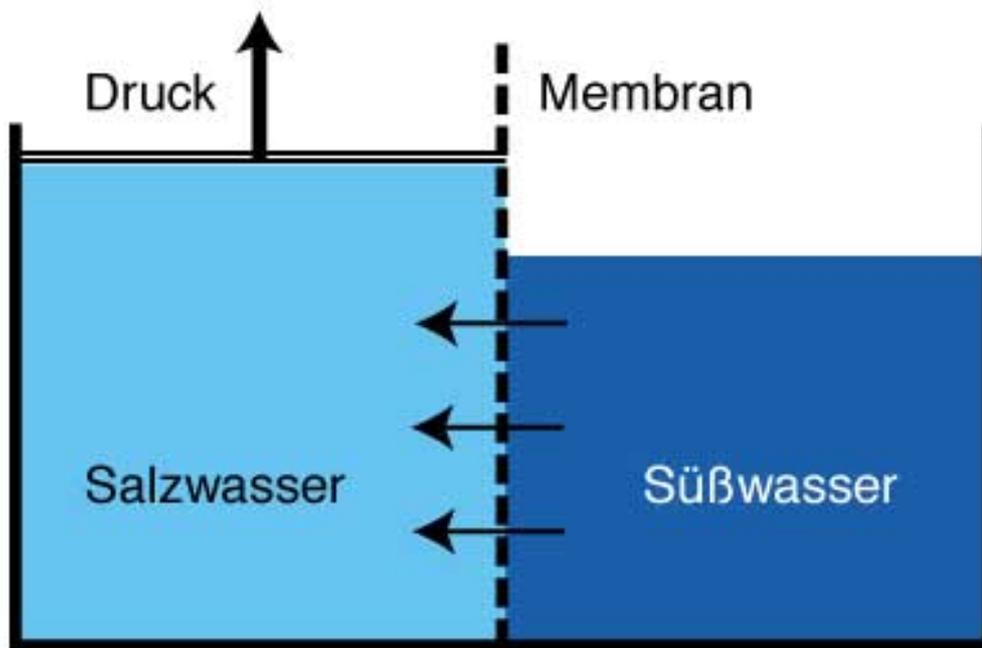


Abbildung 7: Weltweite Verteilung der Temperaturunterschiede zwischen Oberflächenwasser und Meereswasser in 1000 m Tiefe. Meereswärmekraftwerke erfordern Temperaturdifferenzen von 20°C oder mehr. Geeignete Gebiete finden sich in tropischen Breiten, insbesondere in der Karibik, im Pazifik / Ozeanien, und im Indischen Ozean. [Quelle: National Renewable Energy Laboratory (NREL) des US-Energieministeriums, <http://www.nrel.gov/otec> ]

## 6. Osmose-Kraftwerke

Osmose-Kraftwerke nutzen Konzentrationsunterschiede zwischen verschiedenen Salzlösungen, wie z.B. den unterschiedlichen Salzgehalt zwischen Süßwasser und Meerwasser, um Energie zu gewinnen und daraus Strom zu erzeugen (GKSS 2005; Harrysson, Lönn und Svensson 2005; Hillmer 2005; Meyer 2005). Osmose-Kraftwerke könnten u.a. an Flussmündungen gebaut werden. Die Funktionsweise eines Osmose-Kraftwerks beruht auf dem physikalischen Phänomen der ‚selektiven Diffusion‘. Im Unterschied zu konventionellen Wasserkraftwerken, bei denen Höhenunterschiede („Lageenergie“) oder Strömungen („Bewegungsenergie“) von Wasser ausgenutzt werden, ist bei Osmose-Kraftwerken die unterschiedliche Salzkonzentration („Mischungsentropie“) die treibende Kraft für die Energiegewinnung. Osmose tritt allgemein dann auf, wenn zwei verschieden konzentrierte Lösungen über eine Membran miteinander in Kontakt gebracht werden. Die zwei Lösungen haben dann die Tendenz, ihre Konzentrationen aneinander anzugleichen. Ist die Membran halbdurchlässig, d.h. selektiv durchlässig nur für das Lösungsmittel Wasser, nicht jedoch für das gelöste Salz, so kann ein Konzentrationsausgleich nur durch Übertritt (Diffusion) von Wasser von

der niedriger in die höher konzentrierte Lösung stattfinden. Dies bewirkt eine Verdünnung der höher konzentrierten Lösung und erhöht gleichzeitig den Druck auf dieser Seite der Membran. Der Diffusionsprozess kann auch gegen das Druckgefälle fortgesetzt werden und kommt erst dann zum Erliegen, wenn der Druckunterschied den sog. osmotischen Druck erreicht. Im Fall von Süßwasser und Meerwasser (Salzgehalt 3-5 Volumenprozent) beträgt der erreichbare osmotische Druck bis zu 27 bar. Der theoretische Energiegehalt pro Wassermenge ist daher vergleichbar mit einem Wasser-Speicherkraftwerk, bei dem Wasser über eine Fallhöhe von 270 m hinabstürzt. Praktisch durch Osmose nutzbar wären davon nach Expertenschätzungen etwa 120 m. Die technische Erschließung der Osmose-Energie hätte also denselben Energie-Effekt wie ein zusätzlicher Wasserfall von 120 m Höhe an der Mündung eines Flusses.



**Abbildung 8: Prinzip der Energiegewinnung durch Osmose.** Durch die halbdurchlässige Membran kann kein Salz vom linken Behälter in den rechten übertreten. Ein Konzentrationsausgleich kann nur dadurch erfolgen, dass Wasser vom rechten in den linken Behälter strömt. Dadurch steigt der Druck auf der linken Seite. Dieser Druck kann eine Turbine antreiben und damit zur Energiegewinnung dienen. Je größer der Unterschied der anfänglichen Salzkonzentrationen ist, desto höher ist der nutzbare Druck. [Quelle: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik]

Osmose ist die Grundlage vieler natürlicher Prozesse bei Pflanzen, Tieren und im menschlichen Körper. Sie wird technisch ausgenutzt u. a. bei der medizinischen Blutreinigung (Dialyse) und bei Herstellung von alkoholfreiem Bier. Die Anwendung in einem Kraftwerk wäre möglich, wenn Süßwasser aus einem Fluss über eine halbdurchlässige Membran mit Salzwasser in Kontakt gebracht wird. Das entstehende Druckgefälle kann zur Energiegewinnung genutzt werden, indem man eine Turbine durch das unter Druck stehende Mischwasser (Brackwasser) antreiben lässt. Auf diese

Weise wird Druckenergie in Bewegungsenergie umgesetzt, die mit Hilfe eines Generators zur Stromerzeugung genutzt werden kann.

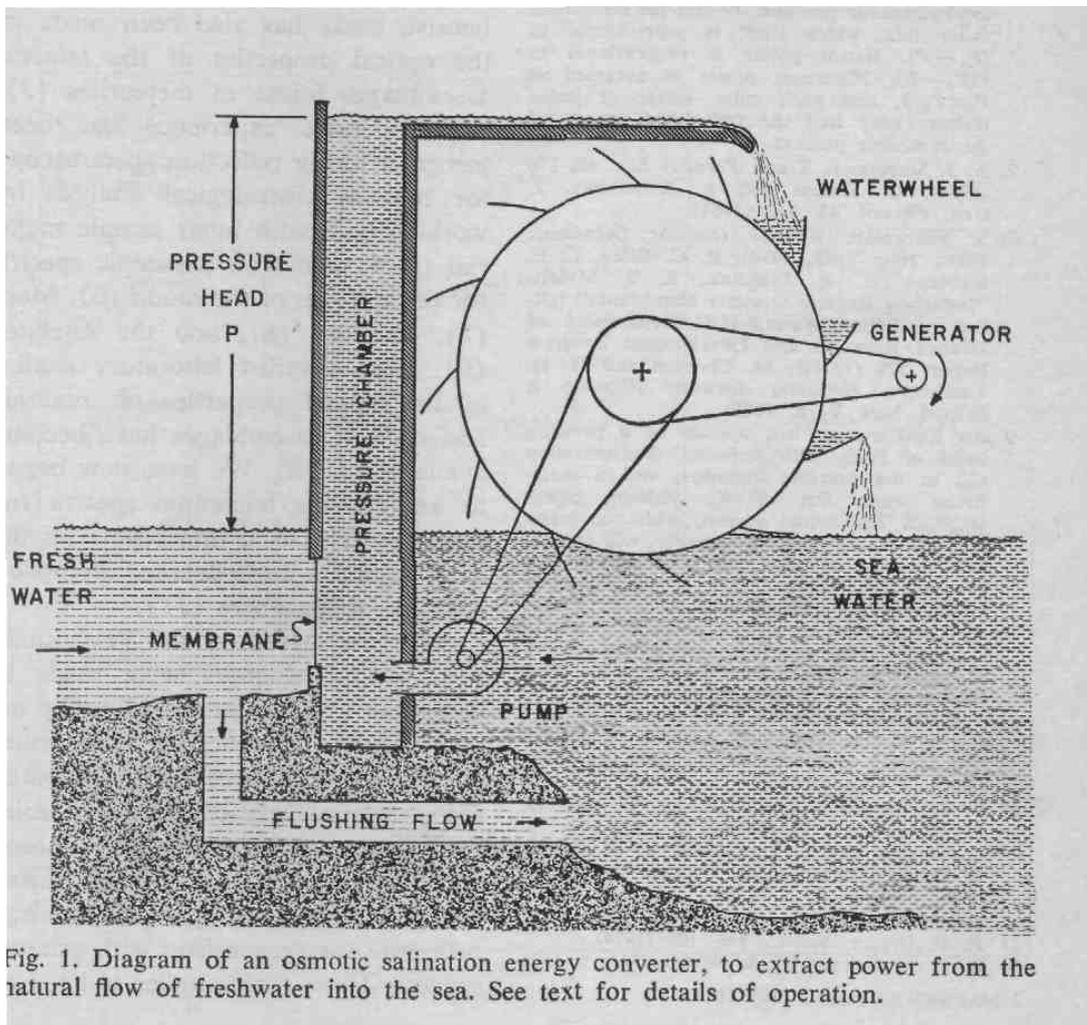


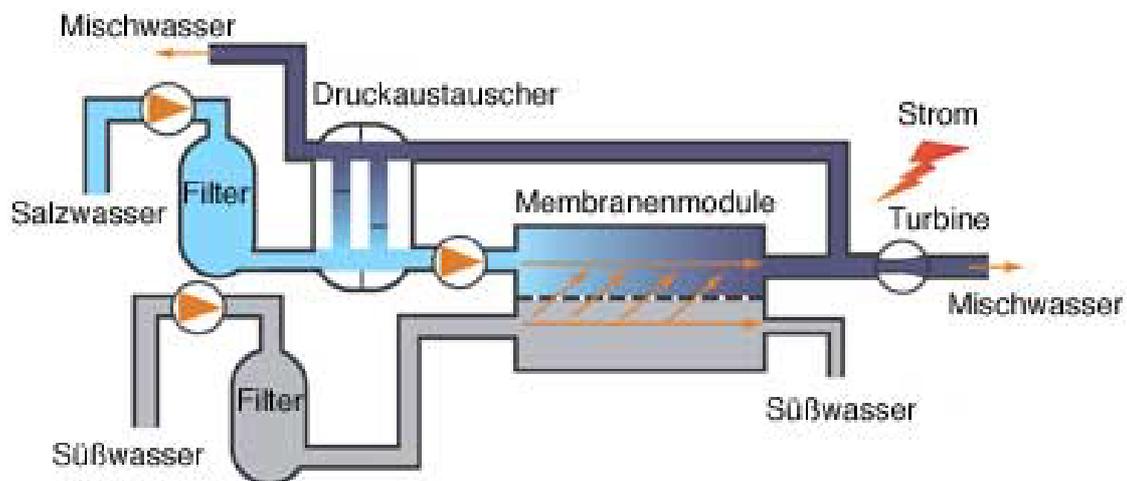
Fig. 1. Diagram of an osmotic salination energy converter, to extract power from the natural flow of freshwater into the sea. See text for details of operation.

Abbildung 9: Illustrationen eines der ersten Konzepte für ein Osmose-Kraftwerk. Beim Kontakt zwischen Flusswasser (links) und Meerwasser (rechts) an der eingezeichneten Membran entsteht Druck, der das Mischwasser in der Druckkammer aufsteigen lässt. Auf dem Rückweg ins Meer treibt das Wasser über ein konventionelles Laufrad einen Generator an. [Quelle: Norman (1974), Science Magazine]

In einer globalen Betrachtung ist der Energielieferant für diesen Prozess letztlich die Sonnenstrahlung, welche ständig Wasserdampf aus dem Meer verdunsten lässt. Über Wolkenbildung und Niederschlag gelangt dieses Wasser durch Flüsse zurück ins Meer, wo an der Mündung ein Teil der von der Sonne gelieferten Energie in Osmose-Kraftwerken zur Stromerzeugung nutzbar gemacht werden kann. Daher stellt die Energiegewinnung durch Osmose eine erneuerbare Energiequelle dar, die nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich ist.

Ein Osmose-Kraftwerk kann auch als umgekehrte Meerwasserentsalzungsanlage aufgefasst werden. Während bei einer Entsalzungsanlage Energie aufgewendet werden

muss, um Süß- und Salzwasser voneinander zu trennen, kann in einem Osmose-Kraftwerk umgekehrt bei der Durchmischung von Süß- und Salzwasser Energie für die Stromerzeugung gewonnen werden. Osmose-Kraftwerke könnten nicht nur an Flussmündungen errichtet werden, sondern im Prinzip überall dort, wo Gewässer mit unterschiedlichem Salzgehalt aufeinander treffen – beispielsweise an Stellen, wo salzhaltige Abwässer aus Bergwerks- oder Industrieanlagen in Flüsse eingeleitet werden.



**Abbildung 10: Schemazeichnung eines Osmose-Kraftwerks. Flusswasser (unten) und Meerwasser (oben) werden zunächst gefiltert und dann über eine halbdurchlässige Membran in Kontakt gebracht. Dabei baut sich auf der salzhaltigeren Seite ein Druck auf, der eine Turbine antreiben und dadurch Strom erzeugen kann. Ein Teil des unter Druck stehenden Mischwassers wird zurückgeführt, um über einen Druckaustauscher weiteres Salzwasser in das System zu pumpen. [Quelle: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik / Statkraft]**

Die Befürworter der Osmose-Kraftwerke sehen Vorteile in der Umweltfreundlichkeit (Emissionsfreiheit), dem großen weltweiten Leistungspotenzial und der relativ einfachen Technologie. Da beim Kraftwerksbau auf etablierte Techniken der Wasserkraft und der Meerwasserentsalzung zurückgegriffen werden könne, sei die Technologie beherrschbar und auch für den Export in weniger entwickelte Regionen geeignet. Analog zur Wasserkraft sei die Leistung eines Osmose-Kraftwerks zeitlich relativ konstant und daher planbar, so dass damit fossile Kraftwerke teilweise ersetzt werden könnten. Weiterhin sei die Energiegewinnung durch Osmose relativ kostengünstig. Wenn sie auch höhere Kosten pro erzeugter Kilowattstunde verursache

als konventionelle Wasserkraftwerke, so könne sie doch mittelfristig wettbewerbsfähig mit anderen erneuerbaren Energien (Windkraft, Photovoltaik) werden. Sie sei insbesondere kostengünstiger als alternative Optionen des Klimaschutzes, wie z.B. die CO<sub>2</sub>-Rückhaltung aus Kraftwerksabgasen.

Erste Vorschläge für ein Osmose-Kraftwerk wurden bereits in den 1970er Jahren diskutiert (Norman 1974; Loeb 1975). Die praktische Umsetzung scheiterte an der unzureichenden Membrantechnologie. Eine erhebliche technische Herausforderung liegt darin, Membranen zu entwickeln, die gut durchlässig für Wasser, aber undurchlässig für Salze und zugleich langlebig und kostengünstig sind sowie hohem Druck standhalten können. Ende der 1990er Jahre führten Fortschritte auf diesem Gebiet zu neuen Initiativen für ein Osmose-Kraftwerk. In einem von der EU mit 2,5 Millionen Euro geförderten Forschungsprojekt wurden am Forschungszentrum GKSS bei Hamburg von 2001 bis 2004 verbesserte Polymer-Membranen entwickelt, die eine Steigerung der Energieausbeute von 0,02 auf 2 Watt pro Quadratmeter Membranfläche erlauben (Aaberg 2004a). Wirtschaftlichkeit eines Osmose-Kraftwerks wird ab einem Wert von 5 W pro m<sup>2</sup> vorausgesagt. Nach Schätzungen der Projektteilnehmer könnte diese Schwelle zwischen 2010 und 2015 erreicht sein. Die Osmosekraft läge nach optimistischen Vorhersagen dann mit Erzeugungskosten von etwa 5 Cent pro Kilowattstunde im unteren Kostenbereich für erneuerbare Energien.

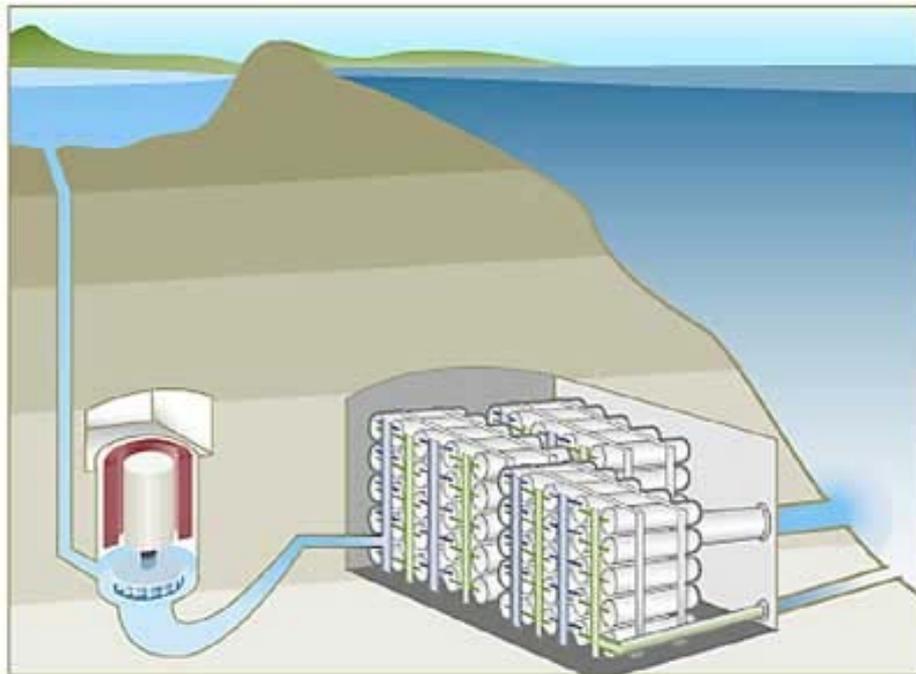


**Abbildung 11: Um die notwendige große Membranfläche platzsparend unterzubringen, werden die Membranen aufgerollt und in Röhrenmodule eingebaut. [Foto: Statkraft]**

Eine Pilotanlage im Miniaturmaßstab mit 6 Quadratmetern Membranfläche ist derzeit im Hafen von Trondheim (Norwegen) im Testbetrieb. Ein zukünftiges kleines

Kraftwerk mit einer Leistung von 1 MW müsste eine Membranfläche von mindestens 200.000 Quadratmetern aufweisen. Um diese Flächen unterbringen zu können, werden die Membranen aufgerollt und in Röhren-Modulen untergebracht. Trotzdem hätte ein 25 MW-Kraftwerk bereits die Ausmaße einer Fabrik. Es werden daher Vorschläge diskutiert, diese Anlagen unterirdisch zu errichten, um die Landschaft zu schonen.

Laut Prognosen der norwegischen Firma Statkraft könnten langfristig 20 Prozent des norwegischen Stromverbrauchs (25 Milliarden Kilowattstunden pro Jahr) durch Osmose-Kraftwerke gedeckt werden (Aaberg 2004b). Pessimistischere Schätzungen gehen allerdings davon aus, dass wegen der notwendigen Rücksicht auf Naturschutzgebiete und auf die Schifffahrt nur 10 Milliarden Kilowattstunden pro Jahr tatsächlich realisiert werden können. Gemäß der Statkraft-Vorhersage liege das Potenzial europaweit bei 250, weltweit bei 2000 Milliarden Kilowattstunden pro Jahr. Dies entspräche knapp dem Vierfachen des jährlichen Stromverbrauchs in Deutschland. Die Osmosekraft wäre damit eine der ergiebigsten unter den bisher ungenutzten erneuerbaren Energiequellen. Gründe für das bisher insgesamt geringe Interesse sind nach Meinung der Befürworter, außer den noch bestehenden technischen Schwierigkeiten, vor allem in der weitgehenden Unkenntnis des Funktionsprinzips von Osmose-Kraftwerken zu sehen. Neben dem genannten EU-Forschungsprojekt gibt es allerdings bereits kleinere wissenschaftliche Untersuchungen zur Osmosekraft („salinity power“) in Israel, Japan und den USA.



**Abbildung 12: Ein Osmose-Kraftwerk könnte in der Nähe von Flussmündungen auch unterirdisch realisiert werden. [Quelle: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik / Statkraft]**

Nachteile der Osmose-Technologie zur Stromerzeugung sehen Skeptiker in dem hohen weiteren Entwicklungsbedarf zur Optimierung der Membrantechnologie (siehe Ozean-Atlas der Vereinten Nationen 2005). Ob ein Osmose-Kraftwerk wirtschaftlich arbeiten könne, sei heute nur schwer absehbar. Weiterhin seien die hohen Investitionskosten für den zukünftigen Bau der Kraftwerke zu berücksichtigen. Wenig Erfahrung existiert bisher zur Frage der Lebensdauer der Membranen, vor allem zu ihrer Empfindlichkeit gegenüber Algenwuchs und der möglichen Verstopfung durch Sedimente aus den Flüssen. Die notwendige Reinigungshäufigkeit der Membranen ist daher schwer abzuschätzen. Kaum untersucht sind auch die möglichen Auswirkungen auf die Umwelt, insbesondere auf die Ökologie der Flüsse.

Im internationalen Vergleich wäre Deutschland nicht der ideale Standort für Osmose-Kraftwerke. Gründe hierfür liegen in dem vergleichsweise geringen Salzgehalt der Ostsee und dem langsamen Übergang von Süßwasser zu Salzwasser an der Nordsee über eine breite Brackwasserzone. Beide Effekte würden die mögliche Energieausbeute von Osmose-Kraftwerken verringern. Schließlich ist die gesamte Wassermenge der Zuflüsse zu Nord- und Ostsee auf deutschem Staatsgebiet relativ gering. Pilotanlagen und Demonstrationskraftwerke könnten jedoch auch an deutschen Küsten realisiert werden.

Experten schätzen, dass bei einer (rein hypothetischen) vollständigen Ausnutzung aller Flussmündungen in Deutschland für Osmose-Kraftwerke ca. 1400 MW gewonnen werden könnten (Bard 2005), etwas mehr als die Leistung eines großen Kernkraftwerks. Größere Wassermengen führen der Rhein und die Donau mit sich, die außerhalb Deutschlands münden. Aussichtsreich wäre der Bau von Osmose-Kraftwerken vor allem am Mittelmeer, am Toten Meer oder an Salzseen wie dem Großen Salzsee in Utah, USA (Loeb 1998). Diese lassen eine höhere Energieausbeute erwarten, weil sie einen zum Teil wesentlich höheren Salzgehalt aufweisen.

## 7. **Fazit - Meeresenergie**

In den Weltmeeren liegt ein enormes Reservoir an mechanischer, thermischer und chemischer Energie. Da diese Energieformen vor allem durch die Sonnenstrahlung und die Erddrehung gespeist und „nachgefüllt“ werden, sind sie nahezu unerschöpflich. Bisher ist die Meeresenergie für die Energiegewinnung weitgehend ungenutzt. Sie könnte jedoch in Zukunft durch Gezeitenkraftwerke, Wellenkraftwerke, Strömungskraftwerke, Meereswärmekraftwerke und Osmose-Kraftwerke erschlossen werden.

Wie andere erneuerbare Energieformen ist die Energiegewinnung aus dem Meer – zumindest im Betrieb, nach Fertigstellung des Kraftwerksbaus - prinzipiell frei von klimaschädlichen Emissionen von Treibhausgasen („CO<sub>2</sub>-frei“) und daher umweltfreundlich. Eine verstärkte Nutzung könnte daher zu dem im Kyoto-Protokoll vereinbarten Ziel der weltweiten Reduzierung des Treibhausgas-Ausstoßes beitragen.

Während der Stromfluss aus zukünftigen Osmose- und Meereswärmekraftwerken zeitlich relativ konstant sein könnte, unterliegt die Energiegewinnung aus Gezeiten, Wellen und Meeresströmungen prinzipiell Schwankungen im Rhythmus der Gezeiten und der Mondphasen. Da Strom nicht in größerem Umfang gespeichert werden kann, sondern immer gleichzeitig mit dem Verbrauch erzeugt werden muss, werden diese Kraftwerksformen kaum geeignet sein, fossile Kraftwerke ganz zu ersetzen, deren Leistung teilweise an den Verbrauch angepasst werden kann. Es werden also auch in Zukunft Investitionen in den Bau beider Arten von Kraftwerken notwendig bleiben. Allerdings könnte zumindest der Verbrauch an fossilen Brennstoffen in dem Maße reduziert werden, wie Meeresenergie zur Stromerzeugung beiträgt.

Mit Ausnahme der Gezeitenkraftwerke existieren bisher für keinen dieser Kraftwerkstypen Anlagen kommerzieller Größenordnung. In einigen Fällen bleiben grundlegende technologische Fragestellungen zu klären, bevor in Demonstrationsanlagen Strom erzeugt werden kann. Es liegen daher bisher nur wenige praktische Erfahrungen über Umweltauswirkungen, aber auch über die Korrosionsanfälligkeit der Anlagen vor. Daher ist noch nicht bekannt, über welche Zeiträume die zu tätigen Investitionen in Kraftwerkstechnologie abzuschreiben wären. Deshalb ist auch die wirtschaftliche Rentabilität künftiger Anlagen bisher schwer zu beurteilen.

Deutlich erkennbar ist, dass Strom aus Meeresenergie nach gegenwärtigem Stand preislich noch nicht mit Strom aus anderen Energiequellen konkurrieren könnte. Dies kann sich in Zukunft jedoch ändern, falls die Energiegewinnung aus dem Meer

aufgrund technologischer Fortschritte billiger wird und der Preis für fossile Energieträger weiter ansteigt.

Für alle fünf Arten der Energiegewinnung gilt, dass das Potenzial für die Energiegewinnung an deutschen Küsten eng begrenzt ist. Für mehrere der Energieformen gibt es jedoch bereits in europäischen Nachbarländern geeignete Standorte, und das weltweite Potenzial ist enorm. Nicht zu vergessen sind daher auch die möglichen Exportchancen für deutsche und europäische Firmen in den Bereichen Energietechnologie und Anlagenbau.

## 8. Quellen und Literaturangaben

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – BMU (2005). Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und Internationale Entwicklung. Berlin.
- Aaberg, Rolf Jarle (2004a). Osmotic Power – a huge renewable energy source. Broschüre der Fa. Statkraft, Oslo (Norwegen).
- Aaberg, Rolf Jarle (2004b). Ocean Energy Proposal ‘Salinity Power 2’. Verfügbar im Internet unter [http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/other\\_res05\\_aaberg.pdf](http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/other_res05_aaberg.pdf) [Stand 28.11.2005]
- Bard, Jochen (2004). Wasserkraft ohne Fallhöhe – Strom aus Meeresströmung. Verfügbar im Internet unter: <http://www.bine.info/pdf/infoplus/SEAFLOWFachartikelBard.pdf> [Stand 29.11.05]
- Bard, Jochen (2005). Meeresenergiepotenziale in Deutschland – Versuch einer Abschätzung (unveröffentlichtes Manuskript). Kassel: Institut für Solare Energieversorgungstechnik.
- BINE Informationsdienst, Fachinformationszentrum Karlsruhe (2004). Seaflow – Strom aus Meeresströmungen. Verfügbar im Internet unter: <http://www.bine.info/pdf/publikation/bi0404internetx.pdf> [Stand 29.11.2005]
- DBEDT - Department of Business, Economic Development and Tourism, U.S. State of Hawaii (2005). Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) - Fact Sheet. Verfügbar im Internet unter: [http://www.hawaii.gov/dbedt/ert/otec\\_hi.html](http://www.hawaii.gov/dbedt/ert/otec_hi.html) [Stand 28.11.2005]
- EU-Kommission, Generaldirektion Energie und Verkehr (2002). Wave Energy – Introduction. Verfügbar im Internet unter: [http://europa.eu.int/comm/energy\\_transport/atlas/htmlu/wavint.html](http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint.html) [Stand: 12.10.2005]
- EU-Kommission, Generaldirektion Forschung (2005). Introduction to Ocean Energy Systems (OES). Verfügbar im Internet unter: [http://europa.eu.int/comm/research/energy/nn/nn\\_rt/nn\\_rt\\_oes/article\\_1128\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/research/energy/nn/nn_rt/nn_rt_oes/article_1128_en.htm). [Stand: 12.10.2005]
- GKSS – Forschungszentrum Geesthacht (2005). Osmose-Kraftwerk: Erneuerbare Energien auf dem Vormarsch. In: Unter Uns, April 2005. Verfügbar im Internet unter: [http://www.gkss.de/templates/images\\_d/portal/uuapril05.pdf](http://www.gkss.de/templates/images_d/portal/uuapril05.pdf) [Stand: 12.10.2005]
- Hillmer, Angelika (2005). Osmose als Stromquelle. (Hamburger Abendblatt 4.3.2005). Verfügbar im Internet unter: <http://www.abendblatt.de/daten/2005/03/04/406031.html>
- Harrysson, Tomas; Lönn, David; Svensson, Jesper (2005). Osmotic Energy. Verfügbar im Internet unter: <http://exergy.se/goran/cng/alten/proj/97/o/> [Stand 21.10.2005]
- Heinloth, Klaus (2003). Die Energiefrage – Bedarf und Potenziale, Nutzung, Risiken und Kosten. 2. Auflage. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg.
- Loeb, Sidney (1975). Osmotic Power Plants. Science 189, 654-655.
- Loeb, Sidney (1998). Energy Production at the Dead Sea by Pressure-Retarded Osmosis: Challenge or Chimera? Desalination 120, 247-262.
- Meyer, Olivia (2005). Osmosekraftwerk. In: Energie-Perspektiven, herausgegeben vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Ausgabe 03/2005. Verfügbar im Internet unter: [http://www.ipp.mpg.de/ippcms/ep/ausgaben/ep200503/0305\\_osmosekraftwerk.html](http://www.ipp.mpg.de/ippcms/ep/ausgaben/ep200503/0305_osmosekraftwerk.html) [Stand 12.10.2005]

- NREL - National Renewable Energy Laboratory, US-Department of Energy (2005a). Ocean Energy Basics. Verfügbar im Internet unter: [http://www.nrel.gov/learning/re\\_ocean.html](http://www.nrel.gov/learning/re_ocean.html) [Stand 28.11.2005]
- NREL - National Renewable Energy Laboratory, US-Department of Energy (2005b). Ocean Thermal Energy Conversion. Verfügbar im Internet unter: <http://www.nrel.gov/otec/> [Stand 28.11.2005]
- Norman, Richard S. (1974). Water Salination: A Source of Energy. Science 186, 350-352.
- Ozean-Atlas der Vereinten Nationen (2005). Energiegewinnung durch Osmose (engl.: Salinity Power). Verfügbar im Internet unter: <http://www.oceansatlas.com/unatlas/uses/EnergyResources/Background/Salinity/sp1.html>. [Stand: 12.10.2005]
- Soerensen, Hans Christian (2005): The EC Wave Dragon project. PowerPoint-Präsentation, verfügbar im Internet unter: [http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/wvdr\\_sites\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/wvdr_sites_en.pdf) [Stand 21.10.2005]
- Uhlenbrock, Kristian (2003). Infoblatt Strömungskraftwerke. Verfügbar im Internet unter: <http://www.klett-verlag.de/sixcms/detail.php?id=27818> [Stand 29.11.2005]
- U.S. Department of Energy (2005). Ocean Tidal Power. Verfügbar im Internet unter: [http://www.eere.energy.gov/consumer/renewable\\_energy/ocean/index.cfm/mytopic=50008](http://www.eere.energy.gov/consumer/renewable_energy/ocean/index.cfm/mytopic=50008) [Stand 29.11.2005]
- Vega, L. A. (1999). Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). Hawaii (USA). Verfügbar im Internet unter <http://www.hawaii.gov/dbedt/ert/otec/> [Stand 25.10.2005]
- World Energy Council (2001a). Survey of Energy Resources 2001 – Marine Current Energy. Verfügbar im Internet unter: <http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/marine/marine.asp> [Stand 26.10.2005]
- World Energy Council (2001b). Survey of Energy Resources 2001 – Ocean Thermal Energy Conversion. Verfügbar im Internet unter: <http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/ocean/ocean.asp> [Stand 26.10.2005]
- World Energy Council (2001c). Survey of Energy Resources 2001 – Tidal Energy. Verfügbar im Internet unter: <http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/tide/tide.asp> [Stand 26.10.2005]
- World Energy Council (2001d). Survey of Energy Resources 2001 – Wave Energy. Verfügbar im Internet unter: <http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/wave/wave.asp> [Stand 26.10.2005]