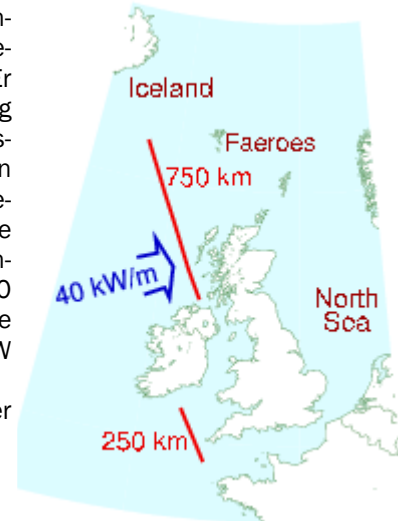


## 12. Wellen

◦Wenn Wellenenergie irgendeinem Land hoffnungsvolle Möglichkeiten eröffnet, dann muss das England oder Irland sein – flankiert einerseits vom Atlantik und andererseits von der Nordsee. ♦Wer allein an der möglichen Energieerzeugung in Deutschland interessiert ist, kann dieses Kapitel getrost überspringen.



Fig.12.1: Ein Pelamis Wellenenergie-Kollektor ist eine Seeschlange mit vier Sektionen. Er wird mit der Nase in Richtung der einlaufenden Wellen ausgerichtet. Die Wellen biegen die Schlange, und diese Bewegungen treiben hydraulische Generatoren. Die Spitzenleistung einer Schlange ist 750 kW. In bester Atlantiklage könnte eine Schlange 300 kW mittlere Leistung abgeben. Foto von Pelamis Wave Power [www.pelamiswave.com](http://www.pelamiswave.com)



◦Lassen Sie uns zunächst klarstellen, woher die Wellen kommen: *Sonne erzeugt Wind und Wind erzeugt Wellen.*

Ein Großteil des Sonnenlichts, das unseren Planeten trifft, erwärmt die Meere. Das erwärmte Wasser erwärmt die Luftschichten darüber und erzeugt Wasserdampf. Die erwärmte Luft steigt auf, dabei kühlt sie sich ab und das Wasser kondensiert eventuell wieder zu Wolken und Regen. Am höchsten Punkt wird die Luft weiter gekühlt durch die frostige Dunkelheit des Weltalls. Die kalte Luft sinkt wieder ab. Diese große solarbetriebene Umwälzpumpe treibt die Luft rundherum in großen Konvektionsrollen. Aus unserer Sicht von der Oberfläche aus produzieren diese Konvektionsrollen Wind. Wind ist Solarenergie aus zweiter Hand. Weht der Wind übers Wasser, erzeugt er Wellen. Wellen sind sozusagen Solarenergie aus dritter Hand (Wellen, die ans Ufer branden, haben nichts zu tun mit den Gezeiten).

Auf offener See werden Wellen immer dann erzeugt, wenn die Windgeschwindigkeit über etwa 0,5 m/s liegt. Die Wellenkämme bewegen sich etwa so schnell wie der Wind, der sie erzeugte, und in dieselbe Richtung. Die *Wellenlänge* (Abstand zwischen den Wellenkämmen) und die *Periode* (die Zeit zwischen zwei Kämmen) hängen ebenfalls von der Windgeschwindigkeit ab. Je länger der Wind bläst und je größer die überstrichene Fläche ist, um so größer ist die *Höhe* der Wellen, die der Wind auftürmt. Da über dem Atlantik der Wind vorrangig von West nach Ost bläst, sind die Wellen an der europäischen Atlantikküste oft besonders hoch. (Die Wellen an Englands Ostküste sind gewöhnlich viel kleiner, deshalb wird sich meine Abschätzung des Potentials an verfügbarer Wellenenergie auf Ressourcen im Atlantik fokussieren.)

Wellen haben ein gutes Gedächtnis und laufen tagelang in dieselbe Richtung weiter, auch wenn der Wind bereits aufgehört hat zu wehen, bis sie an ein Hindernis stoßen. In Meeren, in denen die Windrichtung häufig wechselt, bilden die Wellen, die an verschiedenen Tagen geboren werden, ein superponiertes (überlagertes) Durcheinander, indem sie in verschiedene Richtungen laufen.

Wenn Wellen einer bestimmten Laufrichtung Objekte treffen, die ihre Energie aufnehmen – etwa eine Inselkette mit Sandstränden – dann ist die See hinter dem Objekt ruhiger. Die Objekte werfen einen Schatten und in den Wellen, die weiterlaufen, ist weniger Energie. Im Gegensatz zur Sonne, die Energie pro *Flächeneinheit* liefert, liefern Wellen Energie pro *Längeneinheit* der Küste. Man kann einen Kuchen nicht essen und aufheben. Man kann nicht Wellenenergie zwei Meilen vor der Küste sammeln *und* eine Meile vor der Küste. Oder besser, man kann es schon versuchen, aber die Anlage bei 2 Meilen wird Energie absorbieren, die nicht ersetzt wird, bis die Welle auf die zweite Anlage trifft. Die Entstehungsflächen für große Wellen liegen bei Tausenden von Meilen.

Wir können ein oberes Limit bestimmen für die maximal aus diesen Wellen erhältliche Leistung, indem wir die ankommende Leistung pro Einheitslänge der Küstenlinie bestimmen und diese mit der Länge der Küstenlinie multiplizieren. Wir ignorieren die Frage, welcher Mechanismus diese Leistung sammeln könnte und fragen zunächst, wie viel Leistung das eigentlich ist.

Die Leistung von Atlantikwellen wurde gemessen: Sie ist etwa 40 kW pro Meter Küstenlinie. Das klingt nach einer ganzen Menge. Wenn jeder ein Meter Küste besäße und die gesamten 40 kW abgreifen könnte, dann wäre das genug Leistung, um die moderne Nachfrage zu decken. Jedoch ist dafür *unsere Bevölkerung zu groß*. Es gibt nicht genug Atlantikküste, das jeder einen Meter davon haben könnte.

Wie obige Karte auf Seite 82 zeigt, hat England etwa 1000 km Atlantikküste (1 Million Meter), das ist 1/60 Meter pro Person. Das ergibt eine Wellenleistung von 16 kWh/d pro Person. Würden wir all diese Energie extrahieren, wäre der Atlantik an der Küste flach wie ein Mühlstein. In der Praxis kann kein System die ganze Leistung extrahieren, und dazu kommen Verluste bei der Umwandlung der mechanischen in elektrische Energie. Nehmen wir an, die brillanten Wellenmaschinen könnten 50%-effizient hereinrollende Wellenenergie in Elektrizität wandeln und wir könnten solche Wellenmaschinen auf 500 km entlang der Atlantikküste packen. Das hieße, wir könnten 25% des theoretisch Möglichen nutzbar machen. Das sind **4 kWh/d pro Person**. Wie gewöhnlich habe ich dabei ziemlich extreme Annahmen gemacht – ich erwarte, dass die Annahme, *die Hälfte der gesamten Atlantikküste* könne mit Wellenabsorbern bestückt werden, für viele Leser recht utopisch klingt.

Wie stehen diese Zahlen zu der Technologie von heute? Derzeit werden drei Wellenmaschinen im tiefen Wasser betrieben: Drei Pelamis Wellenenergie-Kollektoren (Fig.12.1), gebaut in Schottland und aufgestellt vor Portugal. Es gibt keine Veröffentlichung aktueller Betriebsdaten, doch erwarten die Hersteller der Pelamis („die vorrangig auf Lebensdauer und weniger auf Energie-Effizienz optimiert sind“), dass auf einer 2 km langen Wellenfarm aus 40 ihrer „Seeschlangen“ 6 kW/m gewonnen werden können. Nehmen wir diese Zahlen in unserer obigen Rechnung, müssten wir die Leistung, die wir aus unseren 500 km erzeugen, auf **1,2 kWh/d pro Person** reduzieren. Wenn auch Wellenkraft für kleinere Siedlungen auf abgelegenen Inseln nützlich sein kann, vermute ich doch, dass diese Technologie keine signifikante Rolle bei der Lösung des englischen Energieproblems spielen kann.

Was wiegt ein Pelamis, wie viel Stahl verbraucht es? Eine Schlange mit einer Maximalleistung von 750 kW wiegt 700 Tonnen, einschließlich 350 Tonnen Ballast. Es besteht aus 350 Tonnen Stahl. Das ist ein Gewicht-zu-Leistung-Verhältnis von rund 500 kg pro kW (Spitze). Vergleichen wir das mit dem Material-



Foto von Terry Caverner

verbrauch von Offshore-Windmühlen: Die wiegen 500 Tonnen bei einer Maximalleistung von 3 MW, das ist ein Verhältnis von 170 kg pro kW, ein Drittel der Wellenmaschine. Pelamis ist ein erster Prototyp; vermutlich wird sich dieses Verhältnis mit weiteren Investitionen und Entwicklungen der Wellentechnologie noch deutlich verbessern lassen.

## Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

**82 Auf offener See werden Wellen immer dann erzeugt, wenn die Windgeschwindigkeit über etwa 0,5 m/s liegt.** Wellenberge bewegen sich etwa mit der Geschwindigkeit des sie erzeugenden Windes. Die einfachste Theorie zur Wellenentstehung (Faber, 1995, p. 337) legt nahe, dass (für kleine Wellen) die Wellenberge etwa mit der halben Windgeschwindigkeit wandern. Empirisch findet man aber, dass Wellenlänge und Wellengeschwindigkeiten der dominierenden Wellentypen zunehmen, je länger der Wind weht. Die charakteristische Geschwindigkeit eines voll entwickelten Seegangs entspricht fast genau der Windgeschwindigkeit 20 m über der Meeresoberfläche (Mollison, 1986).

**82 Wellen an Englands Ostküste sind gewöhnlich viel kleiner** Die Wellenenergie bei Lewis (Atlantik) ist 42 kW/m, dagegen liegen die Energiewerte an der Ostküste bei: Peterhead: 4 kW/m; Scarborough: 8 kW/m; Cromer: 5 kW/m. Quelle: Sinden (2005). Sinden sagt: "The North Sea Region experiences a very low energy wave environment."

**83 Die Leistung von Atlantikwellen wurde gemessen: Sie ist etwa 40 kW pro Meter Küstenlinie.** (Anhang F erklärt, wie man diese Energie aus einigen Fakten über die Wellen ableiten kann.) Dieser Wert hat eine solide Grundlage in der Literatur über Atlantikwellen (Mollison et al., 1976; Mollison, 1986, 1991). Beispielsweise schreibt Mollison (1986): "Der Nordost-Atlantik von Island bis Nord-Portugal hat Netto-Ressourcen von 40–50MW/km, von denen 20–30MW/km potentiell ökonomisch extrahierbar sind." An jedem Punkt der offenen See können drei Energieflüsse unterschieden werden: Die Gesamt-Energie, die diesen Punkt in irgendeine Richtung durchläuft (im Mittel 63 kW/m bei den Scilly-Inseln und 67 kW/m vor Uist); die Netto-Energie, die ein Kollektor aufnehmen kann, der in die optimale Richtung zeigt (entsprechend 47 kW/m bzw. 45 kW/m) und die Energie pro Meter Küstenlinie, wo auch ein Auseinanderfallen von optimaler Richtung und Küstenlinie berücksichtigt ist (in Portugal zeigt beispielsweise die optimale Richtung nach Nordwest, die Küstenlinie aber nach Westen).



**83 In der Praxis kann kein System die ganze Leistung extrahieren** Die erste netzgekoppelte Wellenkraftmaschine Englands, die Limpet bei Islay, ist ein überzeugendes Beispiel für diese Verluste bei der Extraktion. Nach Plan wurde für sie eine Umwandlungseffizienz von 48% abgeschätzt und eine mittlere Einspeiseleistung von 200 kW vorhergesagt. Verluste im Aufnahmesystem, bei den Schwungrädern und bei den elektrischen Komponenten reduzieren den tatsächlichen Output auf 21 kW, gerade mal 5 % (Wavegen, 2002).