

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.



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

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 Potenzials 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 ziemlich extreme Annahmen gemacht, um den grünen Stapel wachsen zu lassen – ich erwarte, dass die Annahme, *die Hälfte der gesamten Atlantikküste* könne mit Wellenabsorbieren 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 Materialverbrauch von off-shore 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.

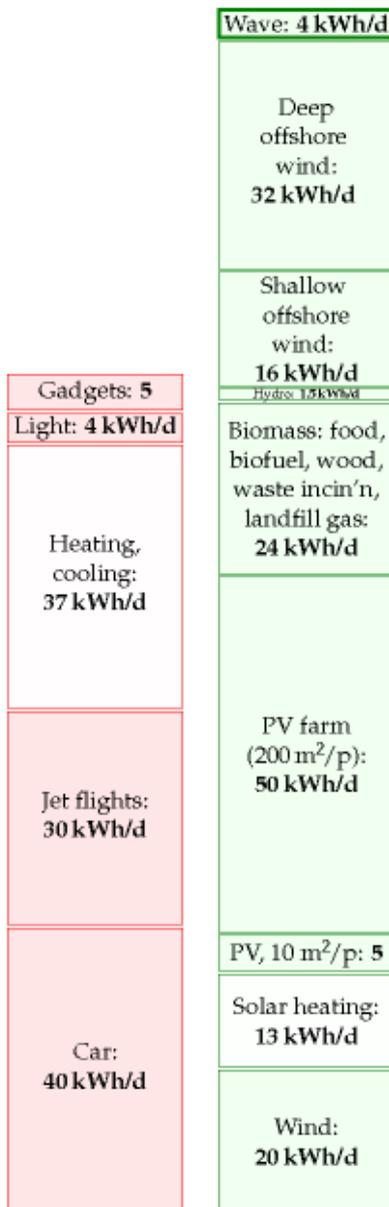


Foto von Terry Caverner



Fig.12.2: Wellen

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 82 **Auf offener See werden Wellen immer dann erzeugt, wenn die Windgeschwindigkeit über etwa 0,5 m/s liegt.** 73¹⁶ Waves are generated whenever the wind speed is greater than about 0.5m/s. The wave crests move at about the speed of the wind that creates them. The simplest theory of wave-production (Faber, 1995, p. 337) suggests that (for small waves) the wave crests move at about half the speed of the wind that creates them. It's found empirically however that, the longer the wind blows for, the longer the wavelength of the dominant waves present, and the greater their velocity. The characteristic speed of fully-developed seas is almost exactly equal to the wind-speed 20 metres above the sea surface (Mollison, 1986).
- 83 **Wellen an Englands Ostküste sind gewöhnlich viel kleiner** – The waves on the east coast of the British Isles are usually much smaller. Whereas the wave power at Lewis (Atlantic) is 42 kW/m, the powers at the east-coast sites are: Peterhead: 4 kW/m; Scarborough: 8 kW/m; Cromer: 5 kW/m. Source: Sinden (2005). Sinden says: “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.** 74 Atlantic wave power is 40 kW per metre of exposed coastline. (Chapter F explains how we can estimate this power using a few facts about waves.) This number has a firm basis in the literature on Atlantic wave power (Mollison et al., 1976; Mollison, 1986, 1991). From Mollison (1986), for example: “the large scale resource of the NE Atlantic, from Iceland to North Portugal, has a net resource of 40–50MW/km, of which 20–30MW/km is potentially economically extractable.” At any point in the open ocean, three powers per unit length can be distinguished: the total power passing through that point in all directions (63 kW/m on average at the Isles of Scilly and 67 kW/m off Uist); the net power intercepted by a directional collecting device oriented in the optimal direction (47 kW/m and 45 kW/m respectively); and the power per unit coastline, which takes into account the misalignment between the optimal orientation of a directional collector and the coastline (for example in Portugal the optimal orientation faces northwest and the coastline faces west).
- 83 **In der Praxis kann kein System die ganze Leistung extrahieren** – Practical systems won't manage to extract all the power, and some of the power will inevitably be lost during conversion from mechanical energy to electricity. The UK's first grid-connected wave machine, the Limpet on Islay, provides a striking example of these losses. When it was designed its conversion efficiency from wave power to grid power was estimated to be 48%, and the average power output was predicted to be 200 kW. However losses in the capture system, flywheels and electrical components mean the actual average output is 21 kW – just 5% of the predicted output (Wavegen, 2002).

¹⁶ Zur Vereinfachung des Übersetzungsprozesses wurden die Anmerkungen und Quellenangaben ab hier großteils (noch) nicht ins Deutsche übertragen. Zur Kenntlichmachung der Textstelle im deutschen Text, auf die sich die Anmerkung bezieht, ist hier die Seite und das Zitat (wie bisher in rot) angegeben. Es folgt der englische Originaltext der Anmerkung. Dieser beginnt ebenfalls mit einer Seitenzahl, jedoch bezieht sich diese auf die (abweichende) Nummerierung im Originaltext. (Ein Gedankenstich bedeutet hier, dass die Seitenzahl mit derjenigen der vorangehenden Anmerkung identisch ist.) Dahinter steht das entsprechende englische Textzitat, gefolgt von weiteren Anmerkungen oder Quellenangaben des Autors.