

## Anhang F: Wellen II

### Die Physik von Wellen in tiefem Wasser

Wellen enthalten Energie in zwei Formen: potentielle Energie und kinetische Energie. Potentielle Energie ist die Energie, die benötigt ist, um das Wasser vom Wellental auf den Wellenkamm zu befördern. Die kinetische Energie ist mit der Bewegung des Wassers verknüpft.

Manche Leute denken, dass, wenn sich ein Wellenkamm mit 50 km/h über das Meer bewegt, auch das Wasser mit 50 km/h in dieselbe Richtung strömen muss. Doch das ist nicht der Fall. Es ist wie bei einer LaOla-Welle. Wenn die Welle um das Stadion läuft, laufen deswegen nicht alle beteiligten Leute im Stadion herum, sie hopsen nur ein wenig auf und ab. Die Bewegung eines Stück Wassers im Ozean ist ähnlich: Wenn man ein Stück Seegrass beobachtet, das im Wasser schwebt während eine Welle durchläuft, wird man sehen, dass es sich ein Stück auf und ab bewegt, und auch ein Stück hin und her in Laufrichtung der Welle – der exakte Effekt könnte in einer LaOla-Welle erzeugt werden, wenn die Leute sich wie ein Fensterputzer bewegen und ein großes Stück Glas in kreisförmiger Bewegung putzen würden. Die Welle hat potentielle Energie wegen der Erhöhung der Käme über die Wellentäler. Und sie hat kinetische Energie wegen der kleinen kreisförmig schwingenden Bewegung des Wassers.

Unsere grobe Abschätzung der Energie, die in Ozeanwellen steckt, benötigt drei Inputs: Eine Abschätzung der Schwingungsperiode  $T$  der Wellen (die Zeit zwischen den Kämen), eine Abschätzung der Höhe  $h$  der Wellen und eine Formel, die uns gestattet, die Geschwindigkeit  $v$  der Welle aus ihrer Periode zu bestimmen. Die Wellenlänge  $\lambda$  und die Periode der Welle (der Abstand bzw. die Zeit zwischen den Wellenkämen) hängen beide von der Geschwindigkeit des Windes ab, der die Wellen erzeugt, gemäß Fig.F.1. Die Höhe  $h$  der Welle hängt nicht von der Windgeschwindigkeit ab, sondern davon, wie lange der Wind die Wasseroberfläche überstreicht.

Sie können die Periode von Ozeanwellen abschätzen, wenn Sie sich an den Zeitabstand zwischen zwei nacheinander ankommenden Wellen am Strand erinnern. Ist 10 Sekunden vernünftig? Für die Höhe der Ozeanwellen lassen Sie uns eine Amplitude von 1 m annehmen, was einen Abstand von 2 m zwischen Tal und Kamm bedeutet. In Wellen dieser Höhe könnte ein Mann in einem kleinen Boot nicht über den Kamm der nächsten Welle sehen, wenn er im Tal ist; ich denke, das ist über dem Durchschnitt, doch wir können diesen Wert ja

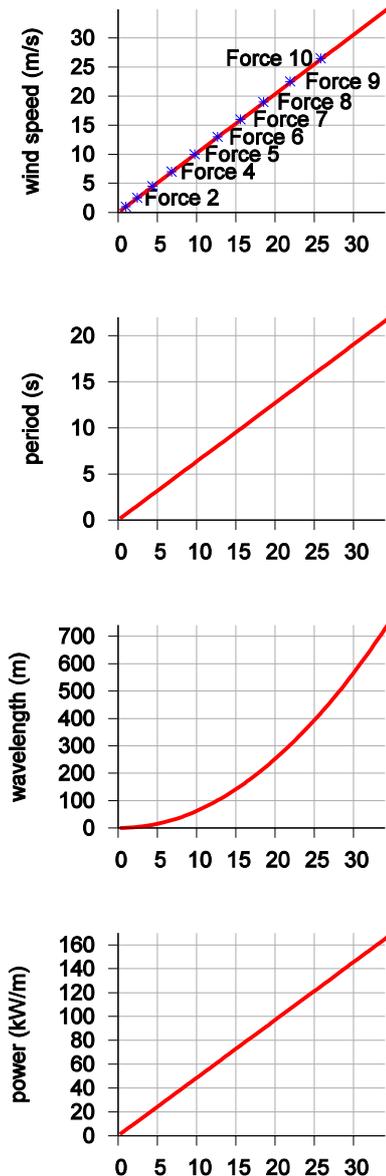


Fig.F.1: Fakten zu Wellen im tiefen Wasser. In allen vier Diagrammen ist die horizontale Achse die Wellengeschwindigkeit in m/s. Die einzelnen Grafiken zeigen (von oben nach unten): Windgeschwindigkeit (im m/s), die erforderlich ist um Wellen dieser Geschwindigkeit zu erzeugen; Periode der Welle (in Sekunden); Wellenlänge (in m) und Leistungsdichte (in kW/m) einer Welle mit 1 m Amplitude.

revidieren, wenn wir es für erforderlich halten. Die Geschwindigkeit von Wellen in tiefem Wasser ist mit der Zeit  $T$  zwischen zwei Kämmen verknüpft durch die Formel (siehe Faber (1995), S.170):

$$v = \frac{gT}{2\pi},$$

worin  $g$  die Erdbeschleunigung ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ) bezeichnet. Ist beispielsweise  $T = 10 \text{ s}$ , folgt  $v = 16 \text{ m/s}$ . Die Wellenlänge einer solchen Welle – Der Abstand zwischen den Kämmen – ist  $\lambda = vT = gT^2/2\pi = 160 \text{ m}$ .

Für eine Welle der Wellenlänge  $\lambda$  und der Periode  $T$  ist bei einer Kammhöhe und Tal-Tiefe von je  $1 \text{ m}$  die potentielle Energie, die pro Zeiteinheit vorbeiläuft, pro Längeneinheit

$$P_{pot} \approx m^* gh'/T, \quad (\text{F.1})$$

Wobei  $m^*$  die Masse pro Längeneinheit ist, die etwa  $1/2 \rho h(\lambda/2)$  (bei Näherung der schraffierten Wellenfläche aus Fig.F.2 durch die Fläche eines Dreiecks), und  $h'$  die Änderung der Schwerpunkthöhe des durch die Welle angehobenen Wasser-Anteils, die näherungsweise gleich  $h$  ist. Also gilt

$$P_{pot} \approx \frac{1}{2} \rho h \frac{\lambda}{2} gh/T. \quad (\text{F.2})$$

(Um die potentielle Energie korrekt zu ermitteln, hätte man hier integrieren müssen, was dasselbe Ergebnis geliefert hätte). Nun ist  $\lambda/T$  gerade die Geschwindigkeit  $v$ , mit der die Welle sich fortbewegt, also

$$P_{pot} \approx \frac{1}{4} \rho gh^2 v. \quad (\text{F.3})$$

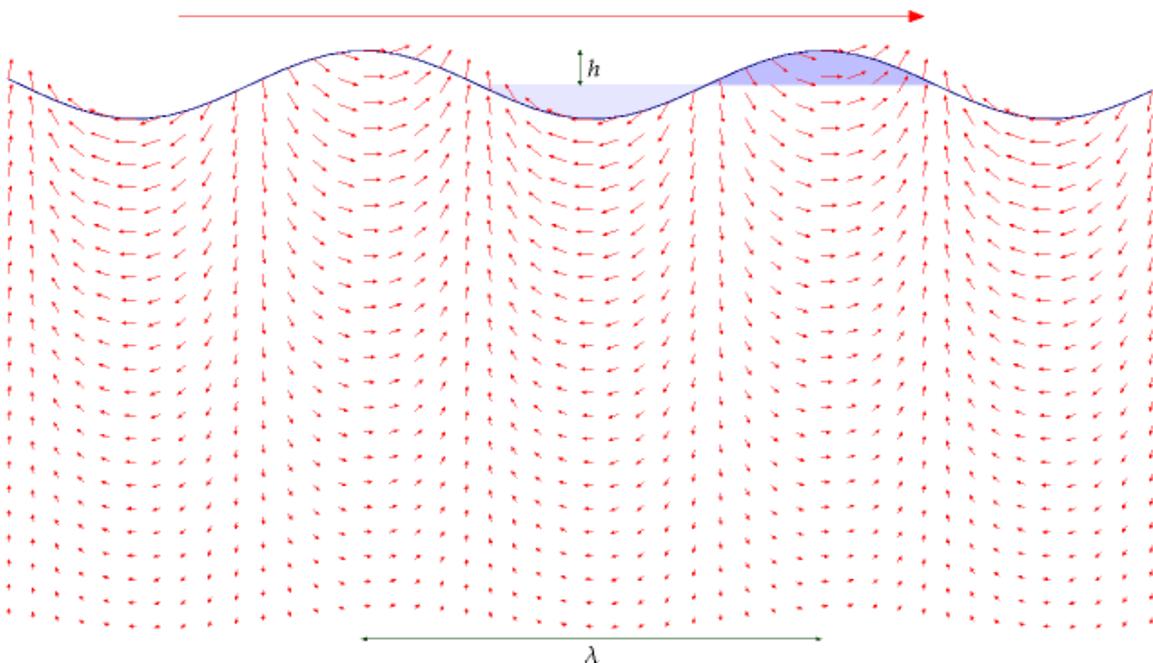


Fig.F.2: Wellen beinhalten Energie in zwei Formen: potentielle Energie durch das Anheben von Wasser aus dem hell schraffierten Talbereich in den dunkel schraffierten Kamm; und kinetische Energie durch Bewegung von Wasser bis zu einigen Wellenlängen unter der Oberfläche – die Geschwindigkeiten sind durch kleine rote Pfeile angedeutet. Die Geschwindigkeit der Welle selbst, ist durch den viel größeren Pfeil oben repräsentiert.

Wellen haben neben der potentiellen auch kinetische Energie und interessanterweise sind beide genau gleich, auch wenn ich die Herleitung hier nicht wiedergebe. Die Gesamtleistung ist also exakt das Doppelte der berechneten Leistung aus der potentiellen Energie.

$$P_{ges} \approx \frac{1}{2} \rho g h^2 v . \quad (F.4)$$

Allerdings ist eine Sache falsch an diesem Ergebnis: Es ist zu groß, weil wir eine wesentliche Eigenschaft dispersiver Wellen vernachlässigt haben: Die Energie in der Welle läuft nicht mit derselben Geschwindigkeit wie die Wellenkämme, sondern breitet sich mit einer Geschwindigkeit, die Gruppengeschwindigkeit bezeichnet wird, aus. Für Wellen im tiefen Wasser ist die Gruppengeschwindigkeit halb so groß wie die Geschwindigkeit  $v$ . Sie können beobachten, dass die Energie sich langsamer fortbewegt als die Wellenkämme, wenn Sie einen Kieselstein in einen Teich werfen und sorgfältig die Wellen beobachten. Das bedeutet, Gleichung (F.4) ist falsch, wir müssen sie halbieren. Die korrekte Leistung pro Einheitslänge einer Wellenfront ist

$$P_{ges} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v . \quad (F.5)$$

Setzen wir nun  $v = 16$  m/s und  $h = 1$  m ein, finden wir

$$P_{ges} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v = 40 \text{ kW/m} . \quad (F.6)$$

Diese grobe Abschätzung stimmt gut mit Messungen im Atlantik überein (Mollison, 1986). (Siehe Seite 85.)

Die Verluste wegen der Viskosität sind minimal. Eine Welle mit 9 Sekunden Periode müsste dreimal um den Erdball laufen, um 10% ihrer Amplitude zu verlieren.

## Praktische Wellenkraftwerke

### *Anlagen für tiefes Wasser*

Wie effektiv sind reale Systeme beim Umwandeln der Leistung aus den Wellen? Die „Enten“ von Stephen Salter verdienen ihren Namen: Eine Reihe Enten mit je 16 m Durchmesser fressen Atlantikwellen auf mit einer mittleren Leistung von 45 kW/m und könnten 19 kW/m liefern, einschließlich Übertragung nach Zentral-Schottland (Mollison, 1986).

Die „Pelamis“ der Ocean Power Delivery hat Salters „Enten“ mittlerweile als führendes Hochsee-Wellenkraftwerk abgelöst. Jedes dieser schlangenförmigen Gebilde ist 130 m lang und besteht aus einer Kette mit vier Segmenten, jedes 3,5 m im Durchmesser. Der maximale Leistungs-Output ist 750 kW. Die Pelamis' sind dafür gedacht, in Tiefen von 50 m vertäut zu werden. In einer Wellenfarm könnten 39 Geräte in drei Reihen in Haupt-Wellenrichtung ausgerichtet werden. Sie würden dann eine Ozeanfläche von etwa 400 m x 2,5 km (1 km<sup>2</sup>) belegen. Der effektive Wirkungsquerschnitt einer einzelnen Pelamis ist 7 m (d.h. für eine gute Welle extrahiert sie 100% der Energie, die 7 m durchströmt). Die Firma behauptet, dass solche Wellenfarmen 10 kW/m liefern könnten.

### ***Anlagen für seichtes Wasser***

Um die 70% der Energie in Ozeanwellen geht durch Bodenreibung verloren, wenn die Tiefe von 100 m auf 15 m abnimmt. Die mittlere Wellenenergie pro Längeneinheit Küstenlinie in seichtem Wasser ist also auf etwa 12% reduziert. Die „Auster“, entwickelt von Queen’s University Belfast and Aquamarine Power Ltd [[www.aquamarinepower.com](http://www.aquamarinepower.com)], ist eine bodenmontierte Klappe, etwa 12 m hoch, die für etwa 12 m tiefes Wasser gedacht ist, an Stellen, wo die mittlere auftretende Wellenkraft größer als 16 kW/m ist. Ihre Maximalleistung ist 600 kW. Ein Einzelgerät könnte 270 kW bei einer Wellenhöhe von 3,5 m liefern. Nach Voraussage sollte eine „Auster“ mehr Leistung pro Maschinenmasse liefern als eine Pelamis.

„Austern“ könnten auch benutzt werden, um direkt Meerwasserentsalzung durch reverse Osmose zu betreiben. „Der Frischwasser-Ausstoß einer „Auster“-Entsalzungsanlage liegt zwischen 2000 und 6000 m<sup>3</sup> Spitze pro Tag.“ Diese Produktion entspricht, wenn man die Leistungsdaten der Anlage von Jersey zu Grunde legt (die 8 kWh pro m<sup>3</sup> benötigt), einer elektrischen Leistung von 600-2000 kW.