Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 72 (1980)
Heft: 3

Artikel: Energie aus Meereswellen?
Autor: Vischer, Daniel
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941381

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Energie aus Meereswellen?

Daniel Vischer

Resumé: Energie de la houle?

Les particularités de cette énergie sont décrites, puis une classification des procédés possibles d'utilisation de la houle est proposée. Quelques prototypes d'usines à houle développés et testés par des chercheurs et ingénieurs étrangers sont ensuite présentés. Enfin, on mentionne les problèmes qu'il convient de resoudre à priori pour que la rentabilité et l'aspect écologique de telles usines soient garantis.

Summary: Power from ocean waves?

The nature of wave energy is discussed and a classification of the possible schemes to utilise this energy is proposed. Some prototypes of wave power plants are introduced being developped by foreign scientists and engineers. Finally the problems are pointed out to be solved before wave power plants will be satisfying from the economical and ecological point of view.

Einleitung und Zusammenfassung

Die heutigen Bestrebungen zur Nutzung der Sonnenenergie führen zu einer Aufwertung aller Formen von Wasserkraftnutzung. Eine dieser Formen ist die Nutzung der Wellenenergie auf den Meeren. Das vom Wind angefachte ewige Auf und Ab der Wellen stellt weltweit gesehen ein riesiges Energiepotential dar. Die Frage ist nur: Kann es auf wirtschaftliche Weise und bei tragbaren Umweltauswirkungen nutzbar gemacht werden?
Diese Frage berührt die Schweiz nur mittelbar. Denn die Schweiz grenzt ja nicht ans Meer und hat deshalb keine Zugriffsmöglichkeit. Sie ist aber im Hinblick auf die weltweite Energieverknappung dennoch daran interessiert, dass mit der Wellenenergie eine neue Energiequelle erschlossen wird. Zudem könnte sich ihre Industrie an der Entwicklung der neuen Technik und am Ausbau von Wellenkraftwerken beteiligen; die Schweizer Industrie hat sich ja nie bloss auf den Binnenmarkt ausrichten können und wollen. Im Hinblick darauf wird hier der Versuch einer Standortbestimmung gewagt: Zuerst wird auf das Wesen der Wellenenergie eingegangen, dann wird eine Klassifizierung der möglichen Wellennutzer vorgeschlagen und zuletzt werden einige Prototypen von Wellenkraftwerken vorgestellt, die von ausländischen Forschern und Ingenieuren entwickelt und erprobt werden. Ferner wird auf die Probleme hingewiesen, die es zu lösen gilt, bevor Wellenkraftwerke ökonomisch und ökologisch machbar werden.

1. Die Idee eines Schweizers

Gleichsam als Einstieg wird zuerst die Idee eines Schweizers skizziert. In [1] schreibt *Lenggenhager,* ein Mediziner, dass er sich schon als Student – und dies dürfte 50 Jahre her sein – folgenden Wellennutzer vorgestellt habe: An einer besonders der Brandung ausgesetzten Küste wird ein rechteckiges Hafenbecken mit Öffnung gegen das Meer gebaut (Bild 1). In dieses Becken dringen die Wellen ein und werden reflektiert. Wo die Auf- und Abbewegung des Wasserspiegels am grössten ist, wird ein massiger Schwimmkörper ausgesetzt. Dieser wird durch eine Vorrichtung, die nicht näher erläutert ist, an Ort gehalten, so dass er sich bloss hebt und senkt. Dabei ist er über ein Seil mit einer Rolle verbunden, die auf einer uferparallelen über dem Hafenbecken angebrachten Drehachse sitzt. Beim Heben des Schwimmkörpers läuft die Rolle leer, beim Senken treibt sie die Drehachse an. Ein Schwungrad sorgt für eine gleichmässige Rotation, so dass ein Generator angekuppelt werden kann.
Lenggenhager stellt sich vor, dass eine solche Anlage mit mehreren Schwimmkörpern und mehreren Drehachsen ausgerüstet werden könnte.

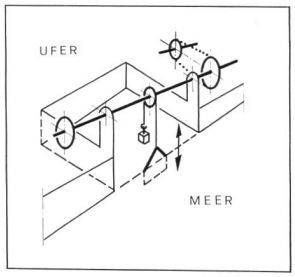


Bild 1. Wellennutzer an der Küste. Ideenskizze von *Lenggenhager* [1]. Der von den Wellen auf und ab bewegte Schwimmer treibt eine Achse und diese einen Generator an.

2. Die Wellenenergie

2.1. Wellentypen

Im Zusammenhang mit der Wellennutzung können zwei Wellentypen unterschieden werden: Die vom Wind erzeugten Tiefwasserwellen und die Brandungswellen.
Die vom Wind erzeugten Tiefwasserwellen bilden sich – wie es ihr Name andeutet – über dem tiefen Wasser. Ihre Form hängt im wesentlichen von der Windgeschwindigkeit, der Winddauer und der Wellenlauflänge ab [2] und ist kompliziert. Sie lässt sich nur mit statistischen Methoden beschreiben; die wichtigsten Parameter sind die Wellenhöhe, die Wellenlänge, die Laufgeschwindigkeit und die Wellenperiode. Tiefes Wasser bedeutet, dass die Meerestiefe grösser ist als die halbe Wellenlänge.
Tiefwasserwellen können nie höher werden als 1/7 ihrer Länge. Wird dieses Verhältnis erreicht, brechen die Wellenkämme und bilden Schaumkronen. Dabei wird ein Teil ihrer Energie durch Turbulenz aufgezehrt.
Beim Aussetzen des Windes behalten die Tiefwasserwellen ihre Energie über eine grosse Lauflänge bei. Sie werden dann als Dünung bezeichnet.
Wenn die Tiefwasserwellen ins flache Wasser gelangen, laufen sie gleichsam auf. Ihre Parameter verändern sich, das heisst, ihre Länge und Laufgeschwindigkeit nimmt ab. Manchmal wird auch ihre Richtung verändert, wobei die Wellenhöhe je nach Ursache vergrössert oder verringert wird. Ein Teil der Wellenenergie geht durch die Bodenreibung verloren. Sinkt die Laufgeschwindigkeit auf einen bestimmten Grenzwert ab, brechen die Wellenkämme und bilden die bekannten, schäumenden Brandungswellen. Auch dieses Brechen führt zu einem turbulenzbedingten Energieverlust.

2.2. Abschätzung der Wellenleistung

Eine Welle enthält sowohl kinetische als auch potentielle Energie. Die kinetische ergibt sich aus der horizontalen Wellenbewegung und der Orbitalbewegung, die potentielle aus dem Druckunterschied zwischen Wellenberg und Wellental. Die natürliche Wellenlinie der Tiefwasserwellen ist oft eine Trochoide [2]. Zur Berechnung der Wellenenergie kann diese jedoch durch eine Sinuslinie angenähert werden. Mit Hilfe der linearen Wellentheorie lässt sich die Wellenbewegung und die Wellenenergie dann analytisch erfassen. Dabei zeigt es sich, dass die kinetische und die potentielle Energie gleich gross werden. Die Summe der

beiden Energien ergibt den gesamten Energieinhalt der Welle. Er wird mit der halben Wellenlaufgeschwindigkeit transportiert, so dass der Energiefluss, der pro Zeiteinheit durch einen gedachten, vertikalen Kontrollschnitt geht – das ist die Wellenleistung – den Wert

$$P = \frac{\rho g^2}{32} TH^2 \qquad (1)$$

annimmt, mit

P Wellenleistung pro m Wellenfront
ρ Dichte des Wassers
g Erdbeschleunigung
T Wellenperiode
H Wellenhöhe

Im übrigen gilt für Sinuswellen

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \qquad (2)$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{g}{2\pi} T$$

mit

λ Wellenlänge
c Wellenlaufgeschwindigkeit.

Setzt man für Meerwasser ρ = 1040 kg/m³ ein und g = 9,81 m/s², so folgt aus Formel 1 die Wellenleistung zu

$$P = 0{,}996\, TH^2 \,[\mathrm{kW/m}] \qquad (3)$$

oder angenähert

$$P \cong TH^2 \,[\mathrm{kW/m}] \qquad (4)$$

wenn T in Sekunden und H in Metern eingesetzt werden.

2.3. Das Wellenpotential

Nach [2] weist eine mittlere Welle in der Nordsee eine Periode von 6,24 s und eine Höhe von 1,52 m auf. Die entsprechende Wellenleistung beträgt gemäss Formel 3 also 14,4 kW/m. Die mittlere Wellenleistung ist wegen der Abhängigkeit vom Quadrat der Wellenhöhe höher. Rechnet man trotzdem bloss mit 14,4 kW/m, so ergibt das für die rund 250 km lange deutsche Nordseeküste eine gesamte Wellenleistung von 3600 MW, was einer Jahresenergie von rund 32 TWh entspricht.

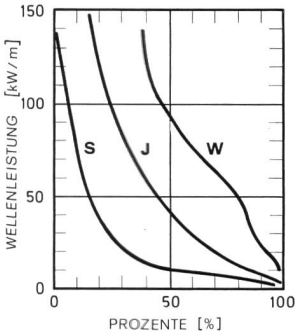


Bild 2. Dauerkurven der Wellenleistung im Nordost-Atlantik nach [5]. Die Prozente der Abszisse beziehen sich auf die betrachtete Periode, das heisst auf das Jahr (Mitte), auf den Winter (Dezember bis Februar; oben) und auf den Sommer (Juni bis August; unten).

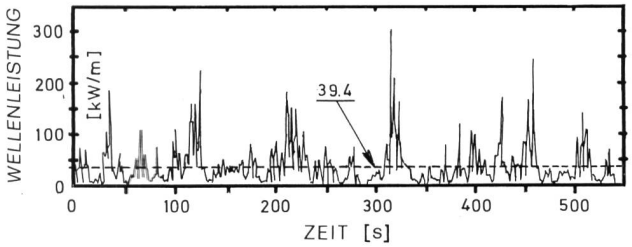


Bild 3. Typische Ganglinie der Wellenleistung nach [6]. Die mittlere Wellenleistung der betrachteten 540 s ist 39,4 kW/m.

Als weiteres Beispiel sei die norwegische Küste angeführt: Nach [3] ist die mittlere Wellenleistung dort 40 km von der Küste 23,7 kW/m. Da diese Küste rund 2500 km lang ist, erreicht die gesamte Wellenleistung 59 000 MW, bzw. 520 TWh/Jahr.

An anderen Orten ist das Potential noch grösser. So ergaben beispielsweise langjährige Wellenmessungen im Nordostatlantik eine mittlere Wellenleistung von 91 kW/m [4].

Über die möglichen zeitlichen Schwankungen der Wellenleistung geben die Bilder 2 und 3 Auskunft.

Bild 2 zeigt die zu den erwähnten Wellenmessungen [4, 5] gehörenden Dauerkurven des Durchschnittsjahres sowie des Durchschnittswinters und -sommers. Wie ersichtlich, ist die winterliche Wellenleistung im Nordostatlantik wesentlich höher als die sommerliche. Interessant ist ferner, dass die Zeit, in der im Nordostatlantik gar keine Wellenleistung erbracht wird, sehr kurz ist: Das Meer ist dort praktisch immer bewegt.

Bild 3 lässt die zeitliche Abfolge der Schwankungen erahnen [6]. Die für eine Zeitdauer von bloss 9 Minuten gezeichnete, typische Ganglinie zeigt, dass die Wellenleistung von Welle zu Welle in einem weiten Bereich variiert, in Bild 3 von fast 0 bis 340 kW/m mit einem Mittelwert von 39,4 kW/m.

Extremwerte ergeben sich naturgemäss bei Sturm. Dann sind Werte von 1 MW/m nicht selten. Nach [6] ist sogar mit gelegentlichen «Killerwellen» von 10 MW/m zu rechnen.

3. Typen von Wellennutzern

Nach [2] wurden allein in Grossbritannien in den Jahren 1856 bis 1973 schätzungsweise 350 Patente eingereicht, die sich mit Wellennutzung befassen. Eine allgemein anerkannte Klassifizierung der Vorschläge scheint es aber noch nicht zu geben. Im Sinne eines Versuches wird hier folgende Vierteilung vorgenommen (Bild 4):

Typus 1: Ausnützung der wellenbedingten Relativbewegung zwischen Festkörpern
Typus 2: Ausnützung der wellenbedingten Verformung eines Festkörpers
Typus 3: Ausnützung einer wellenbedingt oszillierenden Wassermasse in einem Festkörper
Typus 4: Umwandlung der auf einen Festkörper auflaufenden Wellen in eine gleichgerichtete Strömung und Nutzung derselben (Gleichrichter)

3.1. Typus 1: Schwankende Flosse und Tauchwände

Zum Typus 1 werden alle Lösungen gezählt, die die von Wellen erzeugte Relativbewegung zwischen zwei oder mehreren Festkörpern nutzen. Mindestens einer dieser

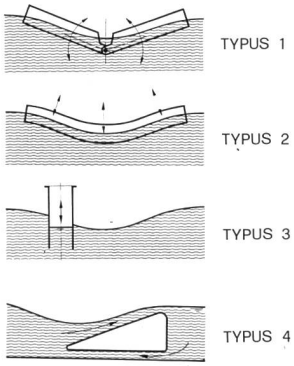


Bild 4. Typen von Wellennutzern.
1 Schwankende Flosse und Tauchwände. 2 Undulierende Balken und Schläuche. 3 Oszillierende Wassersäule. 4 Gleichrichter.

Festkörper besteht dabei aus einem Schwimmer, der von den Wellen auf und ab oder hin und her bewegt wird. Die anderen Festkörper können ebenfalls Schwimmer sein, oder aus einem festen Bauwerk, dem Meeresgrund oder der Küste bestehen. Die Verbindung zwischen den Festkörpern kann als eine Art Getriebe konzipiert sein. Je nach Lösung setzt dieses die Relativbewegung in die Rotation eines Generators um oder in die Kompression eines Mediums. Dieses Medium kann beispielsweise Luft sein, mit der dann eine Luftturbine angetrieben wird. Das Medium kann aber auch Meerwasser sein, mit dem eine Wasserturbine beaufschlagt wird. Für Wellennutzer, die Meerwasser komprimieren bzw. pumpen, wird etwa die Bezeichnung Wellenpumpe verwendet.
Andere Lösungen beruhen auf dem Induktionsprinzip. Die Relativbewegung der Festkörper wird dazu benützt, Stabmagneten in Induktionsspulen hin und her zu bewegen, um auf diese Weise Strom zu erzeugen.

3.2. Typus 2: Undulierende Balken und Schläuche

Bei den Lösungen vom Typus 2 verformen die Wellen einen elastischen Festkörper derart, dass sich daraus Energie gewinnen lässt.
Es gibt Vorschläge, hierfür den piezoelektrischen Effekt auszunützen, d. h. die wellenbedingte Undulation eines schwimmenden Balkens direkt in Strom umzusetzen. Nach [2] bringt dies aber nur wenig Leistung.
Erfolgversprechender sind Lösungen, bei denen die wellenbedingte Undulation von luftgefüllten Bälgen und Schläuchen ausgenützt wird. Die umschlossene Luft wird durch die Bewegung in einen Kreislauf gezwungen, wo sie eine Luftturbine antreibt.

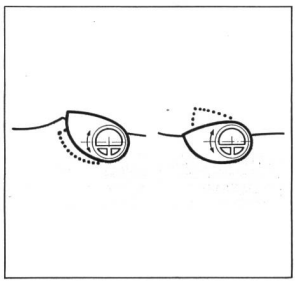
3.3. Typus 3: Oszillierende Wassersäule

Die Lösungen vom Typus 2 haben gemeinsam, dass sie die Wellen in das Oszillieren einer Wassermasse in einem Festkörper umsetzen.
Bei vielen vorgeschlagenen Lösungen ist der Festkörper ein Schwimmer, der ein annähernd vertikales Loch aufweist. Die Wassersäule in diesem Loch kommuniziert mit dem umgebenden Meerwasser und führt bei Wellengang oszillierende Bewegungen aus. Diese Bewegungen können auf zweifache Art verwertet werden: Entweder wird damit eine Wasserturbine angetrieben oder eine über dem Loch angebrachte Luftturbine.
Bei anderen Lösungen taucht von einem im Meer stehenden Turm ein Rohr ins Wasser und umschliesst damit eine oszillierende Wassersäule, deren Bewegungen grundsätzlich gleich genutzt werden wie bei den Lösungen mit Schwimmern. Dasselbe Prinzip lässt sich auch an Küsten verwirklichen. Dort wird das Rohr allerdings nicht vertikal geführt, sondern in Richtung der auflaufenden Wellen geneigt. Unter Umständen kann das Rohr dort sogar durch einen offenen Kanal ersetzt werden.

3.4. Typus 4: Gleichrichter

Die Lösungen vom Typus 4 wandeln die auf einen Festkörper auflaufenden Wellen in eine gleichgerichtete Meerwasserströmung um. Diese Strömung wird in einer Wasserturbine genutzt.
Eine interessante Möglichkeit besteht darin, die an einem Strand auflaufenden Wellen in ein vom Meer abgetrenntes Becken schlagen zu lassen. Dabei wird dieses Becken soweit mit Meerwasser gefüllt, dass sein Spiegel über den Meeresspiegel ansteigt. Die zugeführte Wassermenge und die Spiegeldifferenz können folglich in einer zwischen dem Becken und dem Meer gebauten Niederdruck-Wasserkraftanlage genutzt werden. Wenn das Auflaufen der Wellen noch durch Rampen und sich verengende Kanäle verstärkt wird, lässt sich die Spiegeldifferenz erhöhen.
Dasselbe Prinzip kann auch bei grossen Schwimmern angewandt werden, die einer Insel gleich im Meer liegen und gleichsam die auflaufenden Wellen einfangen. Diese Nutzung lässt sich noch durch Klappen verbessern, die sich im geeigneten Moment öffnen und dann wieder schliessen.

Bild 5. Die «Nickenden Enten» von *Salter*. Vertikalschnitt.



4. Beispiele von Prototypen

Im folgenden werden einige Beispiele von Wellennutzern beschrieben, deren Entwicklung ernsthaft gefördert wird. Ihre Bezeichnungen sind teils frei erfunden, teils aus dem Englischen übersetzt. Weitere Hinweise finden sich in der angegebenen Literatur.

4.1. Die nickenden Enten

Literatur [4, 7–15], Typus 1, Bild 5
Die von *Salter* an der Universität Edinburgh entwickelten «nickenden Enten» (nodding ducks) sind in Bild 5 festgehalten. Es handelt sich dabei um eine Reihe von dicken Klappen, die zusammen eine quer zur Wellenrichtung schwimmende Mole bilden. Die Klappen wippen an ihrem freien Ende mit den Wellen auf und ab und sind an ihrem festen Ende auf einer gemeinsamen Achse gelagert. Die Relativbewegungen zwischen den Klappen und der festen Achse werden benützt, um eine Flüssigkeit zu komprimieren.
Nach der Literatur kann man sich ein entsprechendes Kraftwerk wie folgt vorstellen: Auf einer hohlen Achse von 500 m Länge und 14 m Durchmesser sind 40 Klappen aufgereiht, die bei Wellengang Drehbewegungen von etwa 30° ausführen. Dadurch wird in einem Spalt um die hohle Achse eine Flüssigkeit auf rund 30 bar komprimiert und einer speziellen Turbine (Hydromotor) zugeführt. Diese treibt einen Generator an, der Strom liefert. Die Wasserverdrängung des im wesentlichen aus Beton und Stahl bestehenden Kraftwerkes liegt bei etwas mehr als 50 000 m^3. Das langgestreckte Bauwerk wird im offenen Meer quer zur Hauptwellenrichtung verankert.

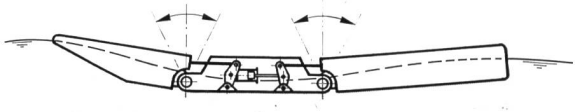
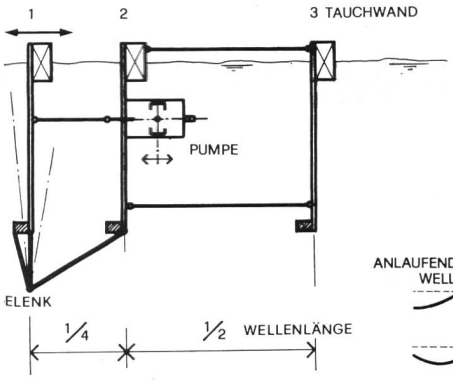


Bild 6. Das gelenkige Floss von *Cockerell*. Vertikalschnitt.

4.2. Das gelenkige Floss

Literatur [3, 7–11, 13, 15], Typus 1, Bild 6
Von *Cockerell*, dem Erfinder des Luftkissenbootes, stammt die Idee, die Wellen mit einem gelenkigen Floss (articulated or flexible raft) zu nutzen. Ein solches Floss besteht aus einzelnen, mit Scharnieren verbundenen Gliedern, die von den Wellen relativ zueinander bewegt werden (Bild 6).

Über den Scharnieren sind Gestänge angebracht, die Kolbenpumpen antreiben. Die Bewegung wird damit in die Kompression einer Flüssigkeit umgewandelt, die ähnlich wie bei den «nickenden Enten» zum Antrieb einer speziellen Turbine verwendet werden kann.
Die ersten Entwürfe der von *Cockerell* in England gegründeten Entwicklungsfirma «Wave Power Limited» sahen Flosse mit vielen Gliedern vor. Die neueren Entwürfe zeigen wie Bild 6 nur noch dreigliedrige Flosse. Als Antriebsflüssigkeit ist Meerwasser vorgesehen. Im übrigen sind die in der Literatur zugänglichen Angaben über diesen Wellennutzer spärlich.



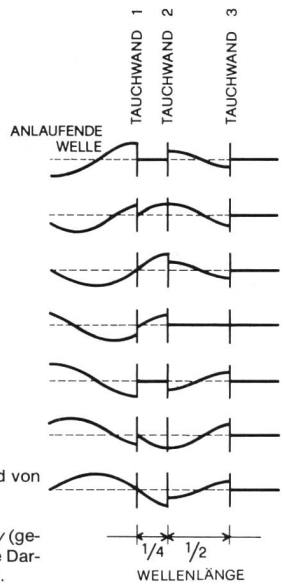


Bild 7, oben. Die schwingende Tauchwand von *Farley*, Vertikalschnitt.

Bild 8, rechts. Der Wellennutzer von *Farley* (gemäss Bild 7) im Wellengang. Schematische Darstellung von sieben verschiedenen Phasen.

4.3. Die schwingende Tauchwand

Literatur [8, 16–19], Typus 1, Bilder 7, 8, 9
Auf der Suche nach billigeren Wellennutzern entwarf *Farley* vom «Royal Military College of Science», Shrivenham, England, ein System mit drei schwimmenden Tauchwänden. Die den Wellen zugewandte erste Tauchwand ist mit der zweiten gemäss Bild 7 durch tiefliegende Gelenke verbunden. Sie funktioniert als vertikalstehende Klappe, die von den Wellen hin und her bewegt wird. Die entsprechenden Ausschläge werden von ihr auf horizontale Stangen übertragen, die in der zweiten zwei Kolbenpumpen antreiben. Diese zweite Tauchwand ist mit der dritten, die als Stabilisator dient, fest verbunden. Der ganze Wellennutzer ist auf eine mittlere Meereswelle abgestimmt, d. h., der Abstand zwischen der ersten und der zweiten Tauchwand entspricht dem Viertel einer Wellenlänge, der Abstand zwischen der zweiten und dritten der Hälfte. Auf diese Weise wird ein guter Wirkungsgrad erreicht; er beträgt auf die Pumpleistung bezogen bemerkenswerte 70 %. Das Pumpwasser beaufschlagt Wasserturbinen, die mit Generatoren gekuppelt sind. Bild 8 zeigt, wie der Wellennutzer im Wellengang beansprucht wird.
Interessanterweise erprobte *Farley* seinen ersten Prototyp (Bild 9) in der Schweiz, wo er 1977 als Gastprofessor der ETH weilte und den Wellenkanal der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie als Prüfstand benützte. Aufgrund der ermutigenden Ergebnisse verfolgte er dann seine Idee in England weiter, wo er heute mit einem Prototyp von 6 m Breite und 5,30 m Länge mit 1,20 m tiefen Tauchwänden (für Wellen von 7 m Länge) arbeitet. Dieser neue Prototyp stellt ein Modell im Massstab 1:20 einer möglichen Grossausführung dar.

4.4. Die tanzende Boje

Literatur [5, 20–22], Typus 1, Bild 10
Mehrere Konstrukteure verfolgten die Idee, das wellenbedingte Auf- und Abtanzen einer Boje zu nutzen. So entwickelten *Budal* und *Falnes* an der Technischen Hochschule in Trondheim ein System, das bei Seegang in Resonanz gerät. Es besteht im wesentlichen aus einer grossen Boje, die längs ihrer straffen Verankerung vertikale Schwingungen ausführen kann. Dabei wird eine Kolbenpumpe in Gang gesetzt, deren Zylinder fest mit der Boje und deren Kolben fest mit der Verankerung verbunden sind. Die Kolbenpumpe wird verwendet, um eine Wasserturbine anzutreiben.
Eine solche tanzende Boje würde im technischen Massstab einen Durchmesser von 16 m und eine Höhe von 20 m aufweisen. Sie würde zusammen mit anderen in einer langen Reihe parallel eingesetzt.

4.5. Der schwimmende Gummibalg

Literatur [13, 15, 22–24], Typus 2, Bild 11
An der Universität Lancaster entwickelte *French* ein System, das, wenn es genügend robust ausgebildet werden kann, einigen Erfolg verspricht. Es besteht aus einem langen, schwimmenden Gummibalg (flexible bag), der in der Wellenrichtung angeordnet wird. Im Innern ist es durch flexible Schoten in Kammern unterteilt. Wenn der Gummibalg nun infolge der darüberlaufenden Wellen verformt wird, werden diese Kammern alternierend zusammenge-

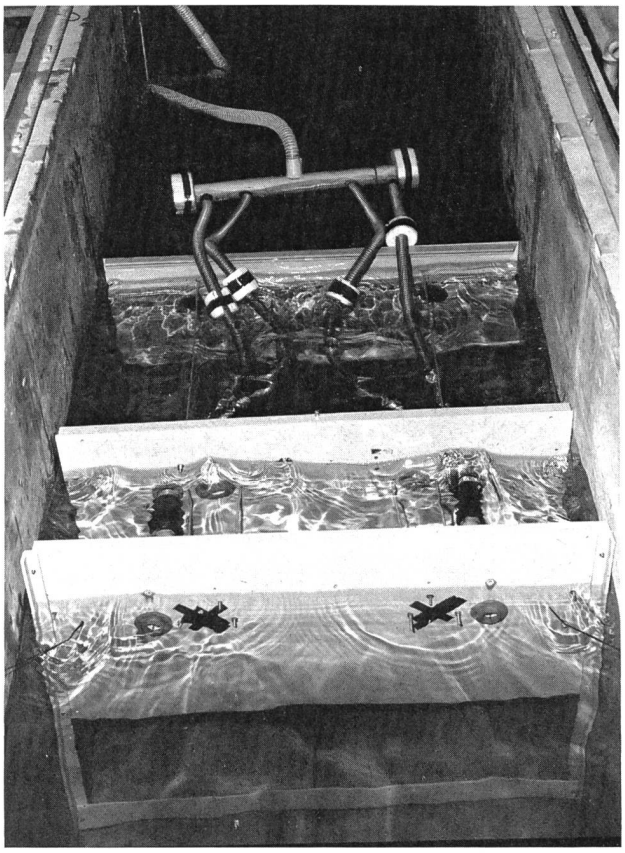


Bild 9. Erster Prototyp des Wellennutzers von *Farley* im Wellenkanal der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich (Bild VAW).

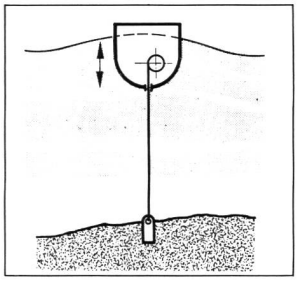


Bild 10. Die tanzende Boje von *Budal* und *Falnes*. Vertikalschnitt.

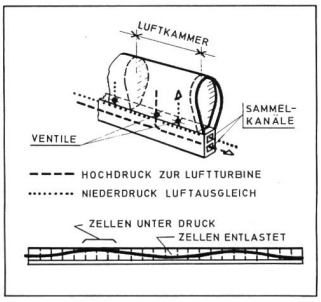


Bild 11. Der schwimmende Gummibalg von *French*. Skizze (oben), Vertikalschnitt (unten).

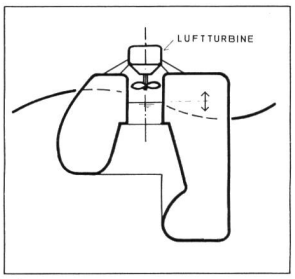


Bild 12. Die oszillierende Wassersäule. Version des National Engineering Laboratory, England. Vertikalschnitt.

presst und wieder entspannt. Beim Zusammenpressen geben sie einen Teil ihrer Luft an die unter dem Balg geführte «Hochdruckleitung» ab. Beim Entspannen werden sie aus der parallel dazu geführten «Niederdruckleitung» wieder aufgefüllt. Die «Hoch- und die Niederdruckleitung» bilden einen Luftkreislauf, der durch eine Luftturbine genutzt werden kann.

French denkt für die Grossausführung an einen 200 m langen Gummibalg von 6 m Breite und 14 m Tiefe. Darunter wäre ein Betonbalken befestigt, der die «Hoch- und Niederdruckleitung» enthalten würde. Dieser Ballast würde den Gummibalg etwa zu 80 % in das Meer eintauchen lassen.

4.6. Die oszillierende Wassersäule

Literatur [7–10, 13, 15, 17, 25–28], Typus 3, Bild 12

Die Technik der oszillierenden Wassersäule wird bereits heute für geringe Leistungen eingesetzt, und zwar für die Energieversorgung von Leuchtbojen. Für grössere Leistungen gibt es eine Fülle von Vorschlägen, u. a. aus Japan, England und Deutschland. Im folgenden wird auf eine Entwicklung des englischen «National Engineering Laboratory (NEL)» hingewiesen:

Ein gemäss Bild 12 geformter Schwimmer umschliesst eine mit dem Meerwasser kommunizierende Wassersäule. Diese oszilliert bei Seegang und presst oder entspannt die über ihr eingefangene Luftsäule. Die entsprechenden Druckunterschiede zur Atmosphäre bzw. die Ausgleichsströmungen werden in einer Luftturbine genutzt. Mit einem Verstellpropeller oder mit Ventilen wird dafür gesorgt, dass diese Turbine immer denselben Drehsinn hat.

In der Literatur wird diese Technik etwa auch als diejenige der «umgestülpten Büchse» (upturned can) bezeichnet. Man denkt dabei an eine umgestülpte und ins Wasser getauchte Büchse, in der Luft eingefangen und durch den Wellengang gepresst oder entspannt wird.

Ein auf dieser Technik beruhendes Wellenkraftwerk würde aus mehreren Schwimmern bzw. Büchsen bestehen, die zu einer schwimmenden Mole zusammengebaut würden.

4.7. Der Russel-Gleichrichter

Literatur [7–10, 13, 15], Typus 4, Bild 13

Der von Russell im hydraulischen Laboratorium von Wallingford (HRS), England, entwickelte Wellennutzer gleicht – grob gesehen – einem zweistöckigen Haus mit «kuriosen Eigenschaften»:

Die Fensterläden im oberen Stock lassen sich nur nach innen öffnen, diejenigen im unteren Stock, nur nach aussen. Die Zwischendecke enthält grosse Löcher, in denen vertikalachsige Wasserturbinen angeordnet sind. Wird dieses Haus derart ins Meer gesetzt, dass es bis zur Zwischendecke eintaucht, so wirkt es als Wellennutzer. Eine anlaufende Welle schlägt die oberen Fensterläden auf und füllt den oberen Stock mit Wasser. Dieses strömt dann durch die Löcher in den unteren Stock und treibt dabei die Wasserturbinen an. Beim Zurücklaufen der Welle werden die unteren Fensterläden aufgeschlagen, so dass das Triebwasser den unteren Stock und damit das Haus wieder verlässt.

In Wirklichkeit besteht das «Haus» natürlich aus einer massiven Betonkonstruktion, die entweder im offenen Meer schwimmend verankert oder an der Küste aufgesetzt wird; die «Fensterläden» sind riesige Rückschlagklappen (Bild 13).

4.8. Das künstliche Atoll

Literatur [29], Typus 4, Bild 14

Bei einem Atoll kann beobachtet werden, dass die Meereswellen nicht einseitig auflaufen, sondern fast allseitig. Sie werden infolge Diffraktion im Küstenbereich gleichsam um das Atoll «gewickelt». Von diesem Effekt angeregt erfanden *Wirt* und *Morrow* von der Firma Lockheed in Kalifornien ein künstliches Atoll, das als Wellennutzer verwendet werden kann. Es besteht, wie Bild 14 zeigt, aus einer schwimmenden Kuppel mit einem zentralen Schacht. Die aussen auf die Kuppel auflaufenden Wellen werden durch spiralförmig angeordnete Leitwände dem Schachtkopf zugeführt. Das entsprechend antransportierte Wasser strömt dann mit einem bestimmten Drall durch den Schacht und verlässt diesen am Schachtfuss. Dabei treibt es eine vertikalachsige im Schacht laufende Turbine und damit den darüberliegenden Generator an.

Wirt und *Morrow* rechnen mit einer Grossausführung, die etwa 100 m^3/s Wasser verarbeiten und damit 2 MW erzeugen könnte. Die Kuppel würde aus Beton hergestellt, einen Durchmesser von 75 m aufweisen und 18 m ins Wasser eintauchen. Ein Kraftwerk würde aus mehreren in gewissen Abständen verankerten «künstlichen Atollen» bestehen.

4.9 Die angereicherte Lagune

Literatur [2, 31, 32], Typus 4, Bilder 15 und 16

Am Strand auflaufende Wellen transportieren ihr Wasser über den mittleren Meeresspiegel hinauf. Dieser Umstand kann genutzt werden, um das Wasser in einem vom Meer abgetrennten Becken so zu sammeln, dass der Beckenspiegel über dem Meeresspiegel liegt. Folglich kann das Wasser ein Wasserkraftwerk antreiben, das zwischen dem Becken und dem Meer angeordnet ist.

Einen entsprechenden Wellennutzer schlug *Bott* für die Riambel-Bucht der Insel Mauritius vor. In dieser Bucht trennt ein 5 km langes Korallen-Riff eine im Mittel 0,4 km breite Lagune vom Indischen Ozean ab. Die Lagune weist damit eine Oberfläche von 2 km^2 auf und kann mit den auflaufenden Wellen um 2,3 m angehoben werden. Dies geschieht allerdings nur, wenn das Riff künstlich erhöht wird.

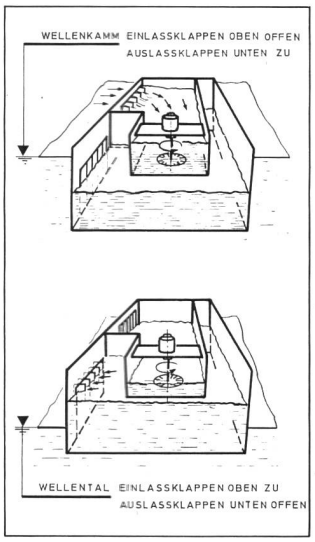


Bild 13. Der Russel-Gleichrichter. Skizze.

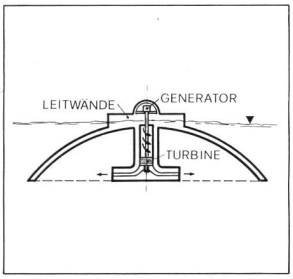


Bild 14. Das künstliche Atoll der Firma Lockheed. Vertikalschnitt.

Diesem Zweck dient eine Betonmauer, die einerseits den vom Meer her auflaufenden Wellen als Rampe dient und andererseits das in der Lagune gespeicherte Wasser zurückhält. Die Rampe besteht gemäss Bild 16 aus einer einfachen, 1:2 geneigten Böschung und steht auf dem 10 bis 25 m breiten Riff.

Die Nutzung des in der Lagune gespeicherten Wassers kann auf einfache Weise in einer am Ende der Lagune vorgesehenen Niederdruck-Wasserkraftanlage geschehen. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung ergab, dass diese auf 20 MW ausgebaut werden könnte und dabei eine Jahresleistung von 102 GWh liefern würde. Der Kilowattstunden-Preis wäre innerhalb des Energiemarktes von Mauritius konkurrenzfähig.

Andere Pläne sehen die Kombination des Wellenkraftwerkes mit einem an der Küste gelegenen Pumpspeicherwerk vor. Abschliessend muss bemerkt werden, dass sich die Riambel-Bucht für eine solche Anlage auch deshalb besonders gut eignet, weil die Tidehübe dort nur einige Dezimeter betragen.

5. Probleme der Wellennutzung

Die Probleme, die gelöst werden müssen, bis die Wellennutzung bei vertretbaren Umweltauswirkungen wirtschaftlich gestaltet werden kann, sind äusserst mannigfach. Sie werden unter anderem in [2] zusammengefasst und wie folgt erläutert:

5.1 Betriebliche und bauliche Aspekte

Die mit der Wellenhöhe quadratisch ansteigende Wellenleistung kann zu einer Gefährdung der Bauwerke führen. Sie verlangt bei zu starkem Seegang entweder ein Absenken des gesamten Bauwerkes unter die Wasseroberfläche, das heisst in eine weniger energiereiche Wasserschicht, oder bei fest gegründeten Bauwerken eine Auslegung des Bauwerkes auf die grösste zu erwartende Welle. Dadurch werden umfangreiche Sicherungsmassnahmen nötig.

Das Seeklima und das Seewasser sind äusserst aggressiv und verlangen den Einsatz von korrosionsfesten und entsprechend teuren Materialien. Dazu kommen Bewuchsprobleme an den dem Seewasser ausgesetzten Teilen.

Die Wellenbewegung kann bei schwimmenden Körpern zu hohen, statisch verteilten Beschleunigungskräften führen, was entsprechend hohe Beanspruchungen nach sich zieht.

In Gewässern mit Tidehub muss der Wellennutzer jeweils dem Wasserstand angepasst werden. Nur schwimmende Anlagen passen sich selbst an. Festgegründete Anlagen, auch Rampen oder Kanäle an Küsten, müssen den Tidehub berücksichtigen und eventuell Verstelleinrichtungen aufweisen. Da der Tidehub besonders an Küsten von oder mit Buchten oder Meeresarmen von erheblicher Grösse sein kann, können diese Verstelleinrichtungen aufwendig und teuer werden. Günstig sind daher für feste Einrichtungen nur Gebiete mit geringem Tidehub, wie er besonders bei weiten und offenen Meeresflächen anzutreffen ist.

Eine weitere Schwierigkeit bedeutet auch die bei vielen Systemen notwendige Anpassung der Wellennutzer an die jeweilige Wellenlaufrichtung.

Für den Betrieb von Bedeutung ist die je nach Wellengang stark unterschiedliche Beaufschlagung der Wellennutzer. Die Anpassung an die jeweils vorherrschende Wellenhöhe ist problematisch. Wird der Wellennutzer für grosse Wellen ausgelegt, die relativ selten auftreten, so liefert er, wenn er arbeitet, viel Energie. Er ist jedoch nur in einem geringen Teil seiner Einsatzzeit voll ausgelastet. Wird er für kleinere Wellen ausgelegt, so liefert er fast immer die maximale Energie, jedoch ist deren absoluter Betrag geringer.

Eine Grossausführung an der Küste oder im offenen Meer verlangt also ein aufwendiges Bauwerk, das auch grossen Wellenenergien standhalten kann. Vermutlich führen Lösungen zum Erfolg, bei denen möglichst wenig bewegliche Teile verwendet werden.

5.2. Umweltauswirkungen

Die Wellennutzer verursachen im Meer naturgemäss eine Verringerung der Wellenhöhe und der Wellenperiode. Da-

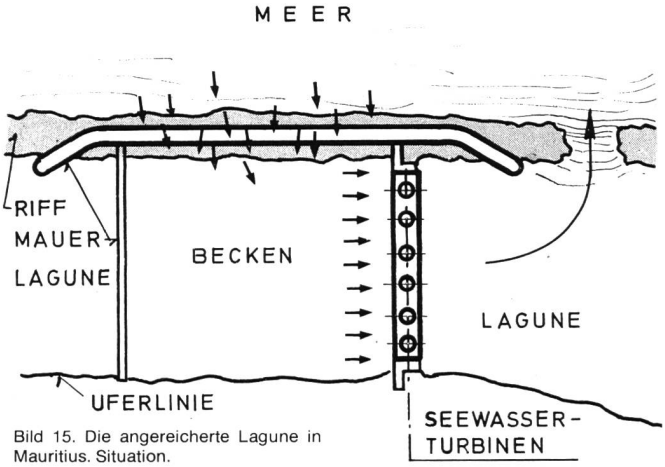
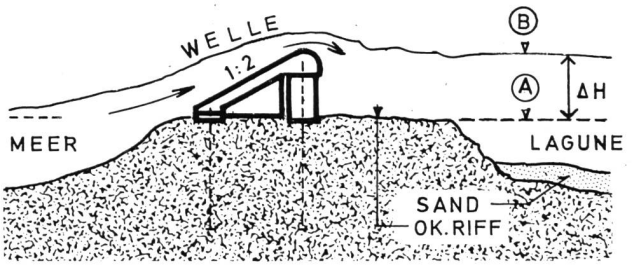


Bild 15. Die angereicherte Lagune in Mauritius. Situation.



Ⓐ UNVERBAUT:
WASSERSPIEGEL LAGUNE ≅ W.SP. MEER

Ⓑ VERBAUT:
WASSERSPIEGEL LAGUNE ≅ W.SP. MEER + ΔH

Bild 16. Betonmauer auf dem Riff; Abschluss der Lagune und Rampe für das Auflaufen der Wellen. Vertikalschnitt, Detail zu Bild 15.

durch werden der Wellenschlag und die Brandung an einer in Wellenlaufrichtung liegenden Küste verringert, so dass dort möglicherweise die notwendigen Einrichtungen für den Küstenschutz einfacher gehalten werden können. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass bei Ausfall der Wellennutzer der Küstenschutz trotzdem funktionieren muss. Die Glättung der Oberfläche durch Entnahme von Wellenenergie kann auch für Schiffahrtswege von Vorteil sein.

Die Verringerung der Orbitalbewegung der Wellen kann eine Verlangsamung von Austauschvorgängen (Sauerstofftransport, Planktontransport u. a.) zwischen der Oberfläche und tieferen Wasserschichten bewirken, was vielleicht Rückwirkungen auf die Population von Meeresbewohnern hat.

Es ist anzunehmen, dass grossflächige Wellenkraftwerke Auswirkungen auf lokale Strömungen haben werden, sowohl durch den Energieentzug als auch durch die Anwensenheit eines Bauwerks im Wasser. Veränderungen der Strömungen haben dann aber auch Veränderungen des Sedimenttransportes nach Stärke und Richtung zur Folge.

Die Behinderungen der Schiffahrt könnten weitgehend vermieden werden, wenn die Bauwerke abseits der Schifffahrtsstrasse errichtet werden. Auch liessen sich Gebiete finden, die weder sportlich, militärisch, fischereitechnisch noch anderweitig genutzt werden.

Eine ästhetische Beeinträchtigung der Küstenlandschaft wird auch in Küstennähe kaum auftreten, da die Bauwerke möglichst niedrig gehalten werden müssen, um dem Wind und möglichen extremen Wellen einen geringen Widerstand entgegenzusetzen. Wird für eine eventuelle Energieübertragung an die Küste eine Freileitung verwendet, kann die ästhetische Beeinträchtigung jedoch erheblich sein.

5.3 Probleme der Integration in die bestehende Energieversorgung

Ein Hauptproblem bei der Wellennutzung ist die intermittierend anfallende Energie. Sie ist ausschliesslich von den Seegangsverhältnissen am jeweiligen Standort abhängig. Damit ist die Energieerzeugung im Gegensatz zu anderen Kraftwerken über die Zeit nur nach statistischen Gesichtspunkten zu ermitteln. Es lässt sich keine derartige Regelmässigkeit wie etwa bei Flusskraftwerken oder Gezeitenkraftwerken angeben.

Weitere Probleme ergeben sich aus dem Standort der Wellennutzer vor oder an der Küste. Die Distanz zur Küste und zu den Siedlungen hat zur Folge, dass Massnahmen zur Energiespeicherung und -fortleitung einen kostspieligen Umfang annehmen können. Mehr noch als bei anderen Wasserkraftwerken wirft die Art des Verbrauches der Energie sowie die Integration des Energieerzeugers in eine vorhandene elektrische und wirtschaftliche Infrastruktur heikle Fragen auf.

6. Schlusswort

Die vorliegende Standortbestimmung zeigt, dass die Wellennutzung möglich und verheissungsvoll ist. Sie zeigt aber auch, dass von den vorhandenen Prototypen bis zur ökologisch und ökonomisch gerechtfertigten Grossausführung noch ein langer Entwicklungsweg beschritten werden muss. Wie bei anderen Techniken zur Erzeugung von Energie dürfte dies ein bis zwei Generationen beanspruchen. Deshalb wird hier davon abgesehen, die möglichen Kosten von solchen Grossausführungen etwa pro kW installierter Leistung oder pro kWh Energie anzugeben. Einige Hinweise sind in [8] zusammengestellt.

Die Wellennutzung ist noch im Entwicklungsstadium. Das wissen ihre Promotoren selbst am besten; eine zurückhaltende, aber doch optimistische Prognose hüllt *Farley* in folgende Aussage [19]:

«Wave machines are now at the Wright brothers stage for aircraft.»

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *Daniel Vischer,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Literatur

[1] *Lenggenhager K.:* Ungenützte Naturkräfte. «Universum», Heft 12/1975 (S. 477–478)

[2] Bundesministerium für Forschung und Technologie (BRD): Energiequellen für morgen? Nichtnukleare – nichtfossile Primärenergiequellen. Teil IV, Nutzung der Meeresenergien. Umschau-Verlag, Frankfurt a. M., 1976

[3] «Boote»: Neue Energiequellen; der Strom kommt vom Floss. «Boote», Heft 5/ 1979, S. 14

[4] *Mollison D., O. P. Bunemann, S. H. Salter:* Wave power availability in the NE Atlantic. «Nature», Vol. 263, Sept. 16, 1976

[5] *Ambli N., K. Budal, J. Falnes, A. Sorenssen:* Wave Power Conversion by a Row of Optimally Operated Buoys. Paper for the 10th World Energy Conference, Istanbul, September 19/24, 1977

[6] Water Power: A steady output from a variable source. «Water Power and Dam Construction», März 1979

[7] Water Power: Ups and downs of wave energy. «Water Power and Dam Construction», Januar 1979

[8] *Hertig P.:* Nutzung der Meereswellen-Energie. «Technika» Nr. 8/1979

[9] Water Power: Power from waves. «Water Power and Dam Construction», Juni 1976

[10] «Neue Zürcher Zeitung»: Anwendungen unkonventioneller Energiequellen. Ausgabe vom 16. Juni 1976

[11] *Frazer F.:* Loch Ness; une nouvelle source d'énergie. «La revue polytechnique» Nr. 1363, Heft 7, 1977

[12] Central Office of Information, London: Energie aus Ozeanwellen. «Wasser, Energie, Luft», 69. Jahrgang, Heft 5, 1977

[13] *Kenward M.:* Grossbritannien setzt auf die Wellenenergie. «Die Weltwoche», 14. September 1977

[14] *Salter S. H.:* Wave power. «Nature» Vol. 249, 21. Juni 1974

[15] *Kenward M.:* Waves a million. «New Scientist». Vol. 70, 6. Mai 1976

[16] *Farley F. J. M., P. C. Parks, H. Altmann:* A wave power machine using free floating vertical plates. Paper B2, International Symposium in Canterbury on wave and tidal energy. September 1978

[17] Water Power: Wave power systems should be cheap. «Water Power and Dam Construction», November 1978

[18] *Vischer D.:* Energie aus Meereswellen? «Wassersport» Nr. 6, 1979

[19] *Scott D.:* Wave-tuned plates harness sea power. «Popular Science» Mai 1979

[20] *Budal K., J. Falnes:* Bolgjekraftwerk i form av ei rad svinganda flottorar. «Elektro-Elektroteknisk Tidsskrift», Bd. 90, Nr. 2, 27. Januar 1977

[21] *Budal K., J. Falnes:* Power generation from ocean waves using a resonant oscillating system. Marine Science Communications, 1 (3 und 4), Seite 269 bis 288, 1975

[22] *Budal K., J. Falnes:* A resonant point absorber of resonant ocean-waves power. «Nature» Vol. 256, 7. August 1975

[23] *Scott D.:* Airbags squeeze energy from wave power. «Popular Science» 1977

[24] Lancaster University: Energie aus einem Gummibeutel. «Elektro-Revue» Nr. 50, 1979

[25] *Dursthoff W.:* Wellenenergie – nutzbare Energie? Mitteilungen des Franzius-Institutes der Technischen Hochschule Hannover, Heft 46, 1977

[26] Whittaker T. J. T., Wells A. A.: Experiences with a hydropneumatic wave power device. Paper B4 (siehe [16])

[27] *Hiramato A.:* The theoretical analysis of an air turbine generation system Paper B5 (siehe [16])

[28] *Masuda Y., T. Miyazaki:* Wave power electric generation study in Japan Paper B5 (siehe [16])

[29] «World Water»: Artificial atolls could have 2 MW output. «World Water» Juni 1979

[30] *Bruun P., G. Viggosson:* The wave pump: conversion of wave energy to current energy. ASCE Journal, WW4, November 1977

[31] *Bott A.N., J. S. M. Hailey, P. D. Hunter:* Wave power prospects for Mauritius. «Water Power and Dam Construction», Dezember 1978

[32] *Bott A. N. W.:* Power plus proteins from the sea; an account of research work carried out at Mauritius and the United Kingdom into the feasibility of a specific see-wave energy project. «Journal of the Royal Society of Arts», Vol. 123, 1974/75