

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 83 (1991)  
**Heft:** 7-8

**Artikel:** Energie aus den Ozeanen  
**Autor:** Hertig, Paul  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-941012>

### **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:** 10.02.2026

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

# Energie aus den Ozeanen

Paul Hertig

## Flüssiges Wasser

Im Sonnensystem gibt es nur auf dem Planeten Erde flüssiges Wasser. Unter den physikalischen Bedingungen, wie sie in der unmittelbaren galaktischen Nachbarschaft herrschen, kann Wasserdampf nur in 142 bis 152 Mio km Abstand zur Sonne kondensieren. Die Erdumlaufbahn liegt fast in der Mitte dieses schmalen Ringes, 149,6 Mio km von der Sonne entfernt. Dank dem flüssigen Wasser, der «richtigen» Grösse und Masse konnte sich auf unserem Planeten Leben entfalten. Unser Wasser wurde, nach den heute vorliegenden Erkenntnissen, vor etwa 4 Mrd. Jahren aus dem Erdinnern als Wasserdampf mit der Uratmosphäre ausgestossen. Als sich der Erdball abkühlte, kondensierte der Wasserdampf. Die gesamte Wassermenge stellt 0,024 % der Erdmasse und 0,13 % des Erdvolumens dar. 99,48 % des flüssigen Wassers liegt in den Ozeanen. Seit den Anfängen der Erdgeschichte hat Wasser das Antlitz der Erde geprägt und verändert, als Wärmespeicher das Klima wesentlich bestimmt, als Lager für mineralische und organische Stoffe im Materialkreislauf der Biosphäre gewirkt.

Im Laufe der Erdgeschichte hat sich die Verteilung der Land- und Wassermassen langsam, aber ständig verändert. Heute getrennte Kontinente waren vereinigt, Ozeane verschwanden, und neue Meere öffneten sich. Die ältesten Teile der heutigen Ozeane, des Pazifiks vor der japanischen Küste und des Atlantiks vor Nordamerika, sind «nur» etwa 165 Mio Jahre alt. Heute bedecken die Ozeane rund 71 % der Erdoberfläche, davon entfallen 57 % auf die Südhalbkugel.

Die Veränderungen spielen sich so langsam, über Hunderttausende von Jahren, ab, dass sie vom Menschen nicht wahrgenommen werden können.

Empfindliche Instrumente, die erst seit wenigen Jahren zur Verfügung stehen, erlauben die Bewegungen der Kontinente zu messen und mit raffinierten Analysen die Vergangenheit immer genauer aufzudecken und zu verstehen.

Was wir Menschen aber wohl mit unseren Sinnen wahrnehmen können, sind die stetigen Bewegungen der Wassermassen: die Gezeiten, Wellen und Meeresströme.

Unser Tagesgestirn ist der Motor sowohl für die Wellen wie auch die Meeresströmungen. Die über dem Äquator erwärmten Luftmassen fliessen in Richtung der kalten Polarzonen und werden durch die Erdumdrehung von Ost nach West, in den gemässigten Zonen von West nach Ost, in einem ertumspannenden Windsystem abgelenkt. Die auf die Ozeanoberflächen wirkenden Winde lösen zunächst die Wellen aus. Sodann verfrachten sie die warmen Oberflächenwasser der tropischen Meere ebenfalls von Ost nach West, wo sie durch die Kontinente abgelenkt werden. Die Meeresströmungen drehen deshalb auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn, südlich des Äquators im Gegenuhrzeigersinn. Die kalten Polarwasser fliessen ebenso von links nach rechts. Diese allgemeinen Strömungen werden schliesslich noch durch die Erdumdrehung und lokale geologische Gegebenheiten beeinflusst. Während sich die kalten arktischen Wasser fast im geschlossenen Kreislauf umwälzen und nur wenig mit wärmerem Äquatorwasser vermischt werden, vereinigen sich in der Antarktis die Warmwasserströme des Pazifiks, Indischen und Atlantischen Ozeans mit dem kalten Antarktischen Ozean.

Die Ozeane sind gewaltige Energiespeicher: Energie in Form von Lebewesen – vom Plankton bis zum Walfisch –

von Bewegung – Meeresströme, Gezeiten, Wellen – und vor allem in Form von Wärme. Meerespflanzen und Tiere sterben und werden hauptsächlich von Bakterien abgebaut und kehren mineralisiert wieder in den Stoffkreislauf zurück. Die Bewegungsenergie wird durch Reibung zwischen den Wasserschichten, der Wasseroberfläche und der Atmosphäre, dem Wasser und der Erdkruste in Wärme umgewandelt. Die Wärmeenergie schliesslich spielt eine Schlüsselrolle im Klima und ist der Motor für den gesamten Wasserkreislauf in der Biosphäre.

Die Küstenbewohner der Gattung Homo haben von jeher das Energiepotential der Ozeane genutzt. Fische, Muscheln, Krebse und andere Meeresbewohner deckten einen Teil des Nahrungsbedarfs. Während Hunderttausenden von Jahren blieb diese Nutzung auf äusserst bescheidene Mengen beschränkt; sie hat erst seit wenigen Generationen ein alarmierendes Ausmass erreicht. Seit über drei Jahrhunderten werden im Fernen Osten Algen für Nahrungszwecke angebaut und geerntet. Im 17. und 18. Jahrhundert bauten unsere Vorfahren an den Küsten Nordamerikas und Frankreichs Flutmühlen. Die Weltbevölkerung nimmt explosionsartig zu, der Bedarf an Lebensraum, Nahrung, Rohstoffen und Energie steigt dementsprechend; er wird sich noch mehr steigern, wenn der niedrige Lebensstandard in den Entwicklungsländern auf ein menschenwürdiges Mass gehoben werden soll, auch wenn wir auf unseren Luxus verzichten. Die Erde wird aber nicht grösser. Rohstoffe, Energieträger wie Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran werden rar und werden schliesslich nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Umwelt wird lebensbedrohend belastet, der Ruf nach erneuerbarer, «sanfter» Energie immer lauter. Ist es da verwunderlich, wenn das Interesse am «Energiespeicher Ozean» immer grösser wird?

Ernährungswissenschaftler sehen schon lange in den Ozeanen unsere zukünftige Speisekammer, vielleicht sogar die letzte Rettung vor dem Hungertod. Auf den Ozeanböden liegen riesige Metallmengen. Und seit der Energiekrise in den 70er Jahren bemühen sich zahlreiche Industriestaaten, unter Einsatz grosser finanzieller Mittel, um die Nutzung der Energien der Ozeane.

Wie gross ist das Energiepotential, welcher Anteil kann genutzt werden, welche Mittel und Anlagen müssen eingesetzt

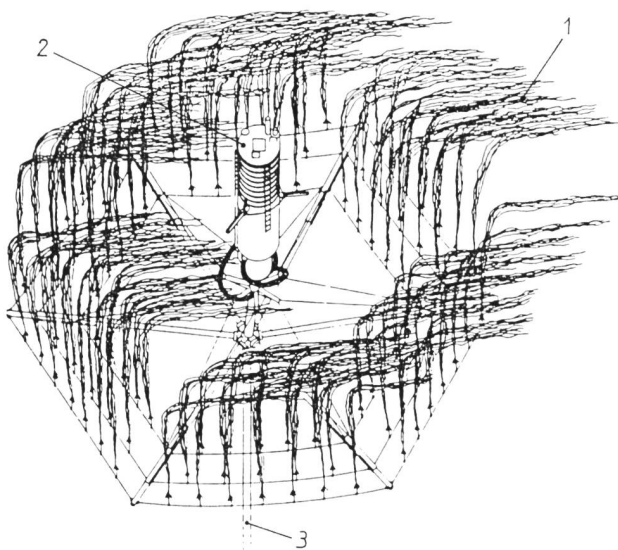


Bild 1. Die Kelpversuchsfarm vor Laguna Beach (Kalifornien). 1 Riesenkelp (Macrocystis); 2 Boje mit Instrumenten, Motoren, Pumpe; 3 Nährstoffleitung, 450 m lang, Durchsatz 30000 l/min. Der Aussendurchmesser der Struktur beträgt etwa 32 m (aus: W. J. North, V. A. Gerard, J. S. Kuwabara, W. M. Keck, Caltech: «Biomass Production by Freshwater Marine Macrophytes», 1980).

werden, was wurde erreicht, wo liegen die Schwierigkeiten, und wie stehen die Zukunftsaussichten? Es soll in der Folge versucht werden, diese Fragen zu beantworten.

## Biogas aus dem Regenschirm

Wie bereits erwähnt, werden im Fernen Osten seit drei Jahrhunderten Algen angebaut und als Nahrung verwertet. Algen werden auch seit über 50 Jahren an der kalifornischen Küste geerntet und finden Eingang in zahlreiche Produkte der chemischen, pharmazeutischen und Nahrungsmittelindustrie.

Am Ende des Lebenszyklus sterben auch Pflanzen, und das tote Pflanzenmaterial wird von aeroben und anaeroben Bakterien mineralisiert, wobei als Abbauprodukt Gas anfällt, das u.a. auch Methan enthält. Dieser Prozess findet tagtäglich in unseren Abwasserreinigungsanlagen statt, wo in den Faultürmen Klärschlamm anaerob abgebaut und in grösseren Anlagen das gewonnene Methangas zu Heizzwecken und zur Erzeugung von Elektrizität genutzt wird. Bei allen Wasserpflanzen ist der Wassergehalt sehr hoch, 70 bis 90%. Was nach dem Trocknen als sogenannte Trockensubstanz (TS) zurückbleibt, ist nicht vollständig biologisch abbaubar, der Abfall, sogenannter Aschegehalt, beträgt 10 bis 50%. Schliesslich sind nur bis 60% des bakteriell erzeugten Gases Methan. Will man also Methan in grösseren Mengen und wirtschaftlich aus Meerespflanzen gewinnen, so genügen Sonnenlicht und Raum allein noch nicht: Es gilt die optimale Pflanzenart unter optimalen Bedingungen zu bewirtschaften, um mit möglichst geringem Aufwand eine möglichst grosse Methanmenge zu erzeugen.

In den 60er Jahren wurde die Forschung zur Gasgewinnung aus Algen im grossen aufgenommen. Als Pionier wirkte *Howard A. Wilcox*, Ingenieur bei der US Marine. Nach der Erdölkrise stieg das öffentliche Interesse, und die Forschungsarbeiten liefen nun unter der Leitung von Prof. *Wheeler J. North* vom California Institute of Technology (Caltech) in Zusammenarbeit mit verschiedenen Firmen.

Die Caltech-Gruppe konzentrierte sich vor allem auf die Auslese der günstigsten Algenart und deren optimalen Anbau – Licht, Raum, Pflanzendichte und Nährstoffe. Die Wahl fiel schliesslich auf den Riesenkelp, eine in kalifornischen Gewässern heimische Braunalge. Unter günstigen Licht- und Raumverhältnissen und mit den notwendigen Nährstoffen versorgt, wächst die Alge um 50 cm pro Tag und wird bis zu 60 m lang. Als optimale Nährlösung erwies sich Wasser, das Stickstoff (N), Phosphor (P), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Eisen (Fe), Mangan (Mn) und Molybdän (Mo) enthält. Im Oberflächenwasser sind einige dieser Nährstoffe nicht oder nur spärlich vorhanden, die günstigste Mischung liegt in Tiefen zwischen 300 und 700 m unter dem Meeresspiegel, muss also heraufgepumpt werden.

Im September 1978 wurde, 6 km vor der Küste von Laguna Beach, eine Versuchsfarm in Betrieb genommen. Ein Gerippe, das dem Gestell eines umgekehrten Regenschirmes ähnlich sieht, liegt 20 m tief im Wasser und ist auf dem 600 m tiefer gelegenen Meeresboden verankert (Bild 1). An Drähten, die die Speichen des Gerippes verbinden, werden die Algen «angepflanzt». Das Nährwasser wird aus 460 m Tiefe heraufgepumpt. Alle zwei bis drei Monate können die Algen geerntet werden, und nach einem mehrstufigen Trocknungs-, Abbau- und Reinigungsprozess fällt Methangas an. Die Ausbeute betrug zu Beginn etwa 240 m<sup>3</sup> Methan pro Tonne TS, und man hoffte, sie auf 340 m<sup>3</sup> steigern zu können (siehe Kasten 1). Eine weitere, etwa 3 ha grosse Versuchsfarm wurde vor der N-O-Spitze der San-Clemente-Insel betrieben. Pläne für Kelpfarmen mit 40 000 ha Fläche waren für die Jahre 1985 bis 1990 geplant.

Zwei Vergleichsrechnungen sollen die Hauptprobleme aufzeigen, die sich bei der Biogasgewinnung aus Ozeanalgen stellen:

1985 betrug der Erdgasverbrauch in der Schweiz rund 1,5 Mrd. m<sup>3</sup>, wobei der Energieträger Gas 7,3% des gesamten Energieverbrauches deckte. Wenn wir, zwar unrealistisch, aber als ideale Voraussetzungen, die in kalifornischen Gewässern mögliche Ausbeute annehmen (Kasten 1), dann benötigten wir, um den schweizerischen Gasverbrauch zu decken, rund 1000 km<sup>2</sup> Algenanbaufläche. Um heikle Verhandlungen mit unseren Nachbarstaaten zu vermeiden, würden wir auf den Algenanbau in Grenzseen (Genfer-, Bodener-, Luganer- und Langensee) von vornherein verzichten. Die 24 verbleibenden Seen mit über 0,5 km<sup>2</sup> Fläche, vom Neuenburger- bis zum Mauensee, erstrecken sich aber nur auf etwa 700 km<sup>2</sup>. Die benötigte Fläche entspricht etwa dem Flächen. Entweder müssen sie weit von den Küsten entfernt angelegt – es wurden auch frei driftende Farmen vorgeschlagen – oder in Küstennähe müsste mit Interessenkonflikten – Fischerei, Küstenschifffahrt, Erholungsraum – gerechnet werden.

Im Falle der Versuchskelpfarm von Laguna Beach müssen jede Minute 30 000 Liter Wasser aus 450 m Tiefe heraufgepumpt werden. Die Rohrreibungsverluste allein belasten den Pumpenmotor mit etwa 6 bis 12 kW. Unter den erwähnten günstigsten Verhältnissen würde die in einem Jahr gewonnene Methanmenge genügen, um diese Leistung während 1000 bis 3000 Betriebsstunden zu decken (je nach Annahme der Erfahrungszahlen für die Rohrreibung und den Pumpenwirkungsgrad), gegenüber einer Gesamtstundenzahl von 8760 im Jahr.

Nebst dem grossen Flächenbedarf stellt sich bei Algenfarmen also auch das Problem des Verhältnisses zwischen Energieaufwand und -ertrag, und ob dieses mit Grossanlagen positiv würde, ist nicht erwiesen. Die Wirtschaftlichkeit kann durch die Verwendung der Algenrückstände in der Industrie, als Düngemittel oder Tiernahrung, und mit Fischzucht verbessert werden.

1983 wurde die Finanzierung der Projekte eingestellt, nachdem die US-Regierung zur Überzeugung gelangt war, dass die weltweiten Erdöl- und Erdgasvorräte noch für längere Zeit gesichert seien.

## Energie zur Bewässerung der Sahara

Der natürliche Ausgleich zwischen warmem tropischem und kaltem Polarmeerwasser bringt gewaltige Wassermengen in Bewegung. In der Antarktis fliesst ein riesiger Ringstrom, der 75 km<sup>2</sup> Fläche bedeckt. Er verfrachtet in 1000 bis 3000 m Tiefe jede Sekunde 150 Mio m<sup>3</sup> Wasser von West nach Ost. Dies entspricht dem 1000fachen Abfluss des Amazonasstromes. Der vergleichsweise bescheidenere Golfstrom ist in der Kernzone 50 km breit, 120 m tief und

### Kasten 1

#### *Methangewinnung aus Riesenkelp*

Ertrag gemäss den kalifornischen Versuchsfarmen: 50 Tonnen Trockensubstanz (TS) pro ha und Jahr und ca. 300 m<sup>3</sup> Methangas pro Tonne TS, d.h. also etwa 15 000 m<sup>3</sup> Methangas/ha, Jahr.

Schweizerischer Gasverbrauch 1985: 1,5 Mrd. m<sup>3</sup>. Die Kelpanbaufläche entspricht also ca. 1000 km<sup>2</sup>. Alle 24 natürlichen, ganz auf Schweizer Boden liegenden Seen mit mehr als 0,5 km<sup>2</sup> Fläche beinhalten nur rund 700 km<sup>2</sup>. Kanton Thurgau: 1012,7 km<sup>2</sup>, 187 000 Einwohner.

fliesst mit einer mittleren Geschwindigkeit von 2 m/s. Das gesamte Arbeitspotential beträgt 210 Mrd. kWh. Zum Vergleich: Der gesamte Energieverbrauch der Schweiz – Elektrizität, Erdölprodukte und Erdgas – erreichte 1985 rund 201 Mrd. kWh.

Die Meeresströmung wird über eine Verminderung der Fließgeschwindigkeit genutzt; dem Wasser wird Bewegungsenergie entzogen. Eine Verlangsamung um einen Drittel entspricht einem Nutzungsgrad von 59%. Da jedoch die Kontinuität erhalten bleibt, würde sich der Geschwindigkeitsverlust durch einen entsprechend grösseren Querschnitt ausgleichen, was eine unvorhersehbare Änderung der biologischen Austauschvorgänge und vielleicht sogar des Klimas zur Folge hätte.

Ozeanströmungen können auch durch Ausgleichsbewegungen zwischen zwei Meeresbecken entstehen, so z.B. zwischen dem Mittelmeer und dem Atlantik. Aus dem Mittelmeer verdunsten jährlich um die 2900 km<sup>3</sup> Wasser. Nicht ganz ein Drittel dieser Menge fliesst von den Kontinenten zurück. Ohne den Wasserzufluss aus dem Atlantik würde das Mittelmeer in nur 2000 Jahren austrocknen – was vor 5 bis 6 Mio Jahren tatsächlich auch geschehen ist («messianic event»). In Wirklichkeit beträgt der Wasseraustausch zwischen den beiden Becken und in beiden Richtungen das 20- bis 40fache der verdunsteten Menge.

In den 30er Jahren tauchte die Idee auf, in der Strasse von Gibraltar einen Damm zu bauen und das Energiepotential dieses Stromes zu nutzen. Mit der gewonnenen Energie hätte die Sahara bewässert werden sollen. In jener Zeit waren Eingriffe in die Umwelt noch kein öffentliches Thema; heute würde ein derartiges Projekt kaum die Hürde der Umweltverträglichkeitsprüfung nehmen!

### Der Mond als Motor für unsere Kraftwerke

In Gezeitenkraftwerken werden bei Flut Speicherbecken gefüllt und das bei Ebbe meerwärts fließende Wasser in normalen hydraulischen Niederdruckturbinen genutzt. Nun folgen Gezeiten dem Umlaufrhythmus des Mondes, während die energieverbrauchende menschliche Tätigkeit weitgehend vom Sonnenrhythmus bestimmt ist: Energieangebot und -nachfrage sind phasenverschoben. Diese Verschiebung kann durch Pumpspeicherung ausgeglichen werden, d. h. mit der momentan nicht gebrauchten Energie (sog. Überschussenergie) aus dem Gezeitenkraftwerk wird Wasser in höher gelegene Speicherbecken gepumpt und in Form hydraulischer Lagenenergie gespeichert. Die gespeicherte Energie steht dann bei Spitzenbedarf zur Verfügung. Eine Möglichkeit, die Gezeitenenergie besser zu nutzen, besteht darin, das Wasser auch beim Füllen der Becken, statt durch Schleusen, durch die Turbinen zu leiten und Strom zu erzeugen. Wenn schliesslich noch in beiden Richtungen Wasser gepumpt wird, um das Gefälle zu gewissen Zeiten zu erhöhen, kann das Energiepotential nochmals besser genutzt werden.

Die Turbinenabmessungen werden weitgehend durch das Gefälle bestimmt (Kasten 2), und die Maschinenabmessun-

Kasten 2

*Vergleich zwischen den Radabmessungen einer Wasserturbine mit 10 resp. 100 m Gefälle, für 10 MW Nennleistung ausgelegt*

Kaplanrad des KW La Rance: 10 m Gefälle; 121 m<sup>3</sup> Wasser pro Sekunde (m<sup>3</sup>/s); 93,75 Umdrehungen pro Minute (U/min). Aussendurchmesser (über die Flügel): 5,35 m.  
Francisturbine: 100 m Gefälle; 12,1 m<sup>3</sup>/s; 750 U/min. Aussendurchmesser ung. 1,2 m.

gen beeinflussen die Grösse der Kraftwerksbauten und somit natürlich auch die Anlagenkosten. Sollen Gezeitenkraftwerke Energie zu wirtschaftlich vernünftigen Preisen erzeugen, kommen sie nur an Küsten mit hohen Gezeitenamplituden in Frage. Die höchsten Tidenhübe der Welt entstehen in der Bay of Fundy und betragen 16 m. Andere mögliche Standorte liegen an den Küsten der Normandie und Bretagne – interessanterweise sind die Gezeiten an der gegenüberliegenden englischen Küste nur etwa halb so hoch –, an der englischen Westküste, an der Ostküste des amerikanischen Kontinents, in Australien an den Küsten des Pazifiks und des Indischen Ozeans.

Heute liefern drei Gezeitenkraftwerke Energie: La Rance (F), Kislaya Guba (UdSSR) und Annapolis Royal (Can), wobei die letzten beiden in gewissem Sinne Versuchskraftwerke sind.

Das Gezeitenkraftwerk La Rance, in der Nähe von St-Malo, wurde Ende 1967, Anfang 1968 in Betrieb genommen. Es stellt in mehrfacher Hinsicht eine Pionierleistung dar. Vorerst musste an Modellen das Verhalten der Gezeiten, u. a. der Einfluss der Bauwerke auf die Wasserbewegungen, untersucht werden. Sodann wurde ein Einsatzplan erarbeitet, der die optimale Nutzung des Energiepotentials erlaubt. Das Ergebnis sind hydraulische Maschinen, die in beiden Fließrichtungen, sowohl als Turbinen wie auch als Pumpen, arbeiten können. Die dabei unvermeidlichen strömungstechnischen Kompromisse ergeben allerdings z. T. niedrigere Maschinenwirkungsgrade (bis zu 10%). Im Kraftwerk La Rance sind 24 Rohrpumpenturbinen mit je 10 MW Leistung eingebaut. Die Anlage steht nun seit 20 Jahren im Betrieb und hat in dieser Zeit rund 7 Mio m<sup>3</sup> Wasser verarbeitet. Die Maschinen waren dabei bis zu 130000 Stunden dem Einfluss des Meerwassers ausgesetzt und weisen bis zu 90000 Betriebsstunden auf. Alle technischen Schwierigkeiten, vor allem die Korrosionsprobleme, konnten befriedigend gelöst werden, was sich im hohen Bereitschaftsgrad der Maschinen von 80% ausdrückt. In den ersten 16 Jahren wurden 8500 GWh (1 GWh = 1 Mrd. Wh) erzeugt, wovon 700 GWh zum Pumpen verwendet wurden. Die Energie aus La Rance ist etwa 18% billiger als aus französischen Kernkraftwerken, hingegen fast 41% teurer als aus Flusskraftwerken.

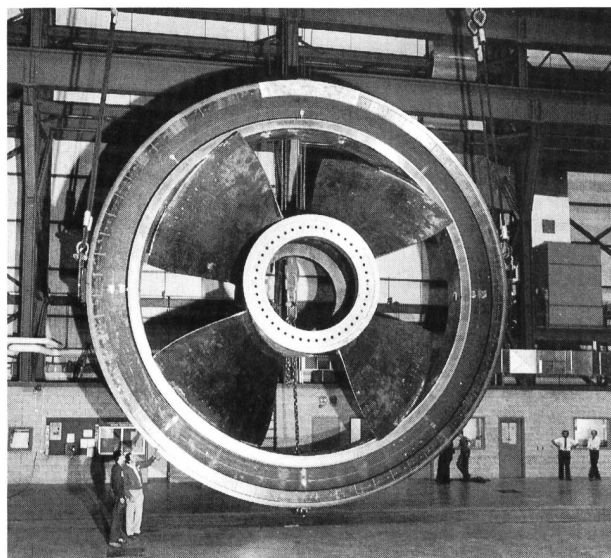


Bild 2. Das Laufwerk der Strafloturbine des Gezeitenkraftwerks Annapolis Royal. Laufwerk mit 7,6 m Durchmesser und 4 festen Schaufeln (Propellerturbine). Gefälle: 1,4 bis 7,1 m; Nennfallhöhe 5,5 m; 378 m<sup>3</sup> Wasser pro Sekunde; 50 U/min; Nennleistung: 17,8 MW. Der fest auf den Schaufeln angebrachte Generator-Rotorring ist deutlich ersichtlich (Foto: Sulzer-Escher Wyss, Zürich).



Kislaya Guba, seit 1968 in Betrieb, liegt im Golf von Kisla, etwa 100 km nördlich von Murmansk. Das Gefälle beträgt nur 1 bis 3 m, und es sind zwei Rohrpumpenturbinen mit je 400 kW Nennleistung eingebaut. Die Maschinen entsprechen im Konzept denjenigen von La Rance – eine Einheit wurde übrigens von einer französischen Firma geliefert, die auch Maschinen für La Rance gebaut hat. In Kislaya Guba wurde eine neue Baumethode erprobt. Während das Kraftwerk La Rance noch nach der üblichen Methode entstand – die Baugrube wurde stückweise durch Abdämmen trockengelegt –, wurden die Maschinen von Kislaya Guba im Werk Murmansk in schwimmende Kasten eingebaut, Kasten, die das Kraftwerksgebäude bilden. Diese wurden an Ort und Stelle geschleppt und auf die vorbereiteten Fundamente versenkt. Diese Baumethode erlaubt beträchtliche Einsparungen gegenüber der üblichen. Schliesslich will man die Anlage unter den grimmigen Klimabedingungen erproben: grosse Temperaturunterschiede zwischen Sommer und Winter, sehr tiefe Temperaturen im Winter, Vereisung und Eisschollen im Frühling. Leider sind keine Betriebserfahrungen bekannt geworden.

Das jüngste Gezeitenkraftwerk, Annapolis Royal, liegt in der Bay of Fundy und ist seit 1984 im Betrieb. Es ist mit einem von Sulzer-Escher Wyss Zürich entwickelten Turbinentyp, einer Strafloturbine mit 17,8 MW Nennleistung, ausgerüstet (Bild 2). Die Strafloturbine stellt die kompakteste Bauart dar, die für Axialturbinen denkbar ist: Der Generator wird nicht, wie üblich, über eine Welle angetrieben, sondern ist fest mit den Turbinenschaukeln verbunden. Im Gegensatz zu La Rance wird, zugunsten einer kompakten, billigen Bauweise, auf den kombinierten Pumpen-Turbinen-Betrieb verzichtet.

In der Bay of Fundy sind eine Anzahl weiterer Gezeitenkraftwerke geplant, in die über 100 Turbinen installiert werden sollen. Sonst liegen gegenwärtig keine Gezeitenkraftwerkprojekte vor, die ernsthafte Aussichten auf Verwirklichung in der näheren Zukunft haben. Vor einigen Jahren wurden in der Fachliteratur Projekte der UdSSR erwähnt, so im Golf von Mezensk, Tugursk und Pezhinsk und in der Okhotsk-See, mit zum Teil riesigen Dämmen von 50 km Länge. Das Interesse an der Nutzung der Gezeiten folgt dem Naturphänomen: periodisch tauchen einige Projekte auf, vielfach aus

Schubladen ausgegraben und erneut bewertet, dann ebbt das Interesse wieder ab, wenn das Urteil auf «unwirtschaftlich» lautet.

## Der Tanz der Wellen

Wellen treten als Tiefenwellen, vom Wind über tiefem Wasser ausgelöst, und Brandungswellen auf. Grössen, die zur statistischen Ermittlung des Energiepotentials bekannt sein müssen, sind die Wellenhöhe, -länge, -periode und die Laufgeschwindigkeit. Dabei ist das Energiepotential von Wellen sehr verschieden (Kasten 3). Das Jahrespotential an der 250 km langen deutschen Nordseeküste von rund 32 TWh (1 TWh = 1 Billion oder 1000 Mrd. Wh) hätte 1985 die gesamte schweizerische Energieerzeugung aus hydraulischen Kraftwerken decken können.

Im kleinen Massstab wird die Wellenenergie schon seit Jahrzehnten für Leuchtbojen und Leuchttürme genutzt. Die Energiekrise der 70er Jahre hat das Interesse an der Grossnutzung geweckt. Besonders englische Wissenschaftler und Ingenieure haben einen wahren Strauss an originellen Mechanismen erdacht: gelenkige Flosse, bewegliche Tauchwände, Gummibälge, die nickende Ente (Salters Ente). Diese Vorrichtungen nützen direkt die Wellenbewegung aus, setzen sie in Druckenergie um, und das komprimierte Medium erzeugt schliesslich Elektrizität. Ihr Einsatzgebiet liegt weit von den Küsten entfernt im offenen Ozean.

### Kasten 3

#### Mittlere Energiedichte der Wellen

Hebriden: 90 kW pro m Wellenlänge (kW/m).

Nordsee: Wellenperiode 6,24 Sekunden, -höhe 1,52 m: 14,4 kW/m.

Atlantik (norwegische Küste): 21,5 kW/m.

Sturmwellen: bis 1 MW/m.

Killerwellen: bis 10 MW/m.

Das Energiepotential an der 250 km langen deutschen Nordseeküste beträgt 32 TWh. 1985 haben alle schweizerischen Wasserkraftwerke 32,677 TWh erzeugt.

An der 2500 km langen norwegischen Küste erreicht das Energiepotential 520 TWh.

1 TWh = 1 Billion Wh oder 1000 GWh oder 1 Mrd. kWh.

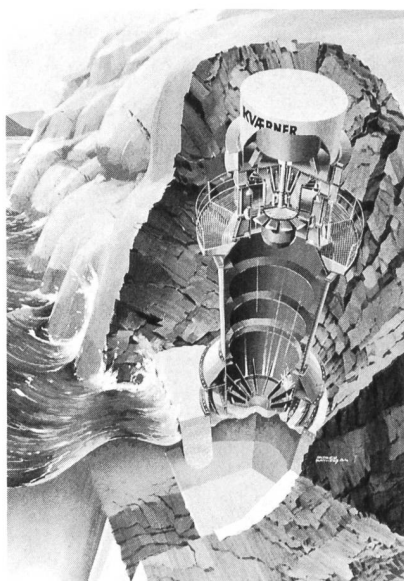


Bild 3. Längsschnitt durch das OWC-Kraftwerk der Firma Kvaerner Brug.

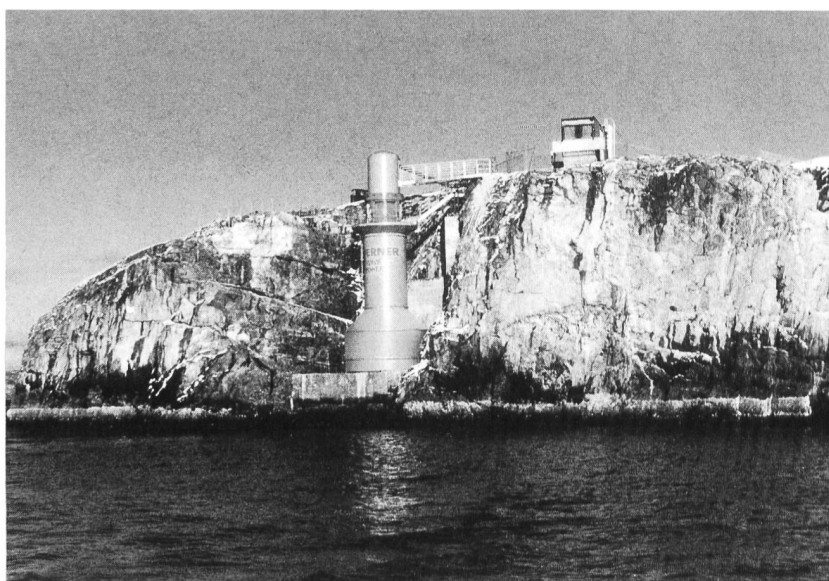


Bild 4. Ansicht des 500-kW-OWC-Kraftwerkes in der Nähe von Bergen.

Sie sind kaum über den Entwicklungsstand der Labormodelle gelangt.

Weitere Methoden zur Wellenenergienutzung sind: mit der steigenden Welle die Luftsäule in einem Kasten zu komprimieren und mit dieser Luft eine Turbine anzutreiben (Oscillating Water Column = OWC) oder einen Kasten mit Wasser zu füllen und dieses Wasser durch hydraulische Turbinen ins Meer zurückfliessen zu lassen (siehe «Weltwoche» Nr. 37, 14. September 1977).

Ein Projekt mit Salters nickenden Enten sah 500 m lange Anlagen vor, die 50 MW Leistung abgeben sollten. Bis 1983 hat die englische Regierung 10 Mio £ in die Entwicklungen gesteckt; im gleichen Jahr, wie in Amerika die Finanzierung der Kelpfarmprojekte aufgegeben wurde, schloss sich auch der Geldhahn für die englische Wellenenergie-Nutzungs-entwicklung.

Optimistischer wurden die Zukunftsaussichten offenbar in Norwegen beurteilt. Zwei Firmen haben Prototypen, die Brandungswellen nutzen, gebaut und der Fachwelt vorgeführt. Eine OWC-Anlage der Firma Kvaerner Brug steht in der Nähe von Bergen, wo die mittlere Energiedichte 21,5 kW/m beträgt, und leistet 500 kW (Bilder 3 und 4). Die steigende Welle presst und die sinkende saugt Luft durch die Wellsturbine. Das Kraftwerk ist als Baukasteneinheit ausgelegt. Ein 15-MW-Kraftwerk würde 10 Einheiten mit einer Turbine umfassen.

Das Versuchskraftwerk der Firma Norwave, «Tapchan», fasst die Welle auf einer 60 m breiten Front. Das Wasser schiesst einer 90 m langen, sich trompetenförmig verengenden Rinne entlang und füllt ein höher gelegenes Becken mit 8500 m<sup>2</sup> Fläche. Aus diesem Becken fliesst es dann durch normale hydraulische Niederdruckturbinen in den 3 m tiefer liegenden Fjord zurück. Die erzielte Leistung beträgt 350 kW. In einem Projekt für 10 MW Leistung wird bei 4,5 m Gefälle ein Becken von 25000 m<sup>2</sup> nötig sein.

Probleme der Betriebssicherheit, des Unterhalts, des Energietransportes zur Küste, Sabotageanfälligkeit und Behinderung der Schifffahrt lassen, zumindest für die nahe Zukunft, wenig Hoffnung für Anlagen, die weit von den Küsten entfernt im offenen Ozean arbeiten müssen. Nur direkt an den Küsten oder in unmittelbarer Nähe gebaute Anlagen mit bescheidenen Leistungen werden wohl in naher Zukunft die Wellenenergie nutzen.

### Eis aus tropischem Wasser

Die Ozeane sind weltweit die grössten Wärmespeicher. Jeden Tag nehmen die tropischen Meere, die rund 60 Mio km<sup>2</sup> bedecken, im Mittel soviel Wärmeenergie auf, dass damit 250 Mrd. Barrel Erdöl ersetzt werden könnten; 1986 betrug weltweit die Erdölförderung 60,5 Mio Barrel pro Tag. Allerdings liegt diese enorme Wärmeenergie nur in niedrigen

Temperaturen vor, und die wirtschaftliche Nutzung setzt Temperaturunterschiede von mindestens 20°C voraus, so dass sie auf einen Gürtel von etwa 20 bis 25 Breitengrade beidseits des Äquators beschränkt bleibt.

Die Nutzung kann auf zwei Arten vor sich gehen. Im geschlossenen Kreislauf (Bild 5) wird eine Arbeitsflüssigkeit mit tiefer Verdampfungstemperatur, z.B. Freon oder Ammoniak, mit warmem Oberflächenwasser verdampft. Im offenen Kreislauf (Bild 6) verdampft das warme Oberflächenwasser in einer Vakuumkammer. Der gewonnene Niederdruckdampf wird in beiden Fällen in Dampfturbinen gespannt und gibt seine Energie ab. Mit Kühlwasser aus 600 bis 1000 m Tiefe wird der Dampf wieder kondensiert. Im geschlossenen Kreislauf wird die Arbeitsflüssigkeit erneut in den Verdampfer zurückgepumpt. Dagegen fällt im offenen Kreislauf das Kondensat als entsalztes Wasser an; eine 2-MW-Einheit liefert z.B. 4320 m<sup>3</sup> reines Wasser am Tag. Anlagen nach beiden Techniken können stationär an einer Küste oder in seichten Küstengewässern verankert oder als mobile Kraftwerke auf Schiffen ausgeführt werden.

1891 veröffentlichte der französische Physiker *Jacques Arsène d'Arsonal* in der «Revue scientifique» einen Artikel, in dem er zeigte, dass es möglich ist, Energie aus den Temperaturunterschieden zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser zu gewinnen. Sein Freund und Schüler *Georges Claude* (u.a. Erfinder der Neon-Leuchtreklame) entwickelte 1926 eine Anlage mit offenem Kreislauf (Claude-Zyklus). In der Bucht von Montanzas, nördlich von Kuba, baute er 1930 ein 22-kW-Kraftwerk. Die Kühlwasserleitung war 2 km lang und wies einen Durchmesser von 1,6 m auf. Claude hatte für seinen Grossversuch den Standort unglücklich gewählt: Der Temperaturunterschied erreicht in diesen Gewässern nur 14°C, so dass zum Pumpen des Kühlwassers und für andere Hilfsmaschinen mehr Energie aufgebracht werden musste, als das Kraftwerk abgab. Zudem fiel die Kühlwasserleitung nach elf Tagen dem Wellengang zum Opfer. Aber der Franzose gab nicht auf. 1933 liess er auf eigene Kosten den 10000-t-Frachter «Tunisie» zu einem schwimmenden Kraftwerk umbauen. Der Maschinenblock war 25 m lang, hatte einen Durchmesser von 8 m, umfasste u.a. vier Verdampfer und fünf Kondensatoren. Acht Turbinen mit je 275 kW Leistung sollten einen 800-kW-Generator und einen 1200-kW-Ammoniak-Kompressor antreiben: Claude wollte für die Bewohner Rio de Janeiros Eis herstellen, um ihnen das Leben angenehmer zu machen... 1934 ankerte das Schiff 120 km vor der Küste. Die 700 m lange Kühlwasserleitung wurde aus Teilstücken mit 2,5 bis 6 m Durchmesser zusammengebaut und an Schwimmern aufgehängt ins Meer verlegt. Schon bald traten Schwierigkeiten auf, die Schwimmer bewegten sich nicht phasengleich, wodurch die Leitung höher beansprucht wurde und zu zerreißen

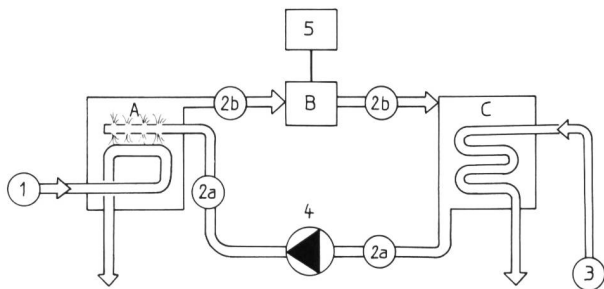


Bild 5. Schema der Wärmeenergienutzung im geschlossenen Kreislauf (Zeichnung: *Cyrill Engel*). A Verdampfer, B Niederdruckdampfturbine, C Kondensator, 1 Kreislauf des warmen Oberflächenwassers, 2 Kreislauf der Arbeitsflüssigkeit (Freon, Ammoniak), 2a flüssig, 2b dampfförmig, 3 Kühlwasserkreislauf, 4 Umwälzpumpe, 5 Generator.

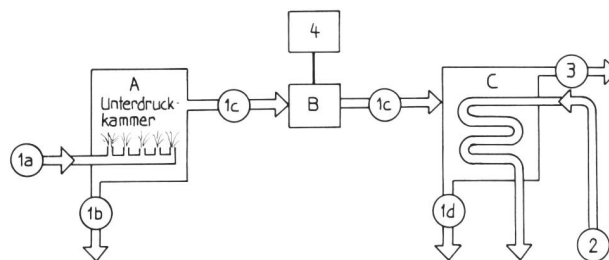


Bild 6. Schema des offenen Kreislaufes – Claude-Zyklus (Zeichnung: *Cyrill Engel*). A Verdampfer, B Niederdruckdampfturbine, C Kondensator, 1 Kreislauf des warmen Oberflächenwassers, 1a Oberflächenwassereintritt, 1b Abfluss von nicht verdampftem Wasser (~ 99,5% von 1a), 1c Niederdruckdampf, 1d entsalztes Wasser, 2 Kühlwasserkreislauf, 3 Gasabzug, 4 Generator.

drohte. Als zur Behebung des Problems der Ballast der Schwimmer erhöht wurde, versank die Leitung im Ozean – und die Bewohner Rios mussten weiterhin auf die Wohltaten des Eises verzichten. Die Idee d'Arsonals überlebte auch diesen Fehlschlag. Die französische Regierung liess 1956 ein Projekt für ein 3-MW-Kraftwerk in Abidjan ausarbeiten. Die Anlage wurde jedoch nie ausgeführt.

Seit der Erdölkrise in den 70er Jahren ist auch das Interesse an der Nutzung der Wärme der Ozeane erneut gestiegen. Die Lockheed Aircraft Corp. betrieb auf einer 2 km vor Keahole Point in Hawaii verankerten Barke zehn Tage lang ein Kleinkraftwerk mit 15 kW Nettoleistung, was einer Nettoausbeute von 30% entspricht. Ein Kraftwerk der Tokyo Electric Power Comp. und der Toshiba Corp. vor der Pazifikinsel Nauru erreichte zwischen Oktober 1981 und September 1982 eine Nettoleistung von 35 kW mit einer Ausbeute von 35%. Projekte liegen für küstengebundene, in Küstennähe zu errichtende und auf Schiffen installierte Kraftwerke vor: in Hawaii (USA), Tahiti (Frankreich), Bali (Holland); die Japaner und Engländer sind ebenfalls im Rennen. Das Hauptgewicht der Entwicklung liegt heute noch auf Anlagen mit geschlossenem Kreislauf. Nach amerikanischen Schätzungen muss für ein 50-MW-Kraftwerk mit 200 bis 500 Mio \$ Baukosten gerechnet werden, der Strompreis entspräche im günstigsten Fall demjenigen aus ölbefeuerten Kraftwerken, könnte aber auch bis zu dreimal so hoch ausfallen. Die Wirtschaftlichkeit könnte durch Nebenprodukte, wie Fischzucht und entsalztes Wasser aus dem offenen Kreislauf, verbessert werden.

### *Die technischen Probleme*

Jedes Bauwerk, das mit Meerwasser in Berührung steht, ist dem Korrosionsangriff ausgesetzt. Unzählige Hafeneinrichtungen, Schleusen, Erdölbohrinseln und die Gezeitenkraftwerke zeigen, dass das Korrosionsproblem lösbar ist, allerdings mit einem grossen Aufwand. Aus dem Gezeitenkraftwerk La Rance liegen ausführliche Erfahrungsberichte vor. Im Gegensatz zu Hafenanlagen, Schleusen und Bohrinseln, die aus vorwiegend unbeweglichen Teilen bestehen, wo sich Spezialbeton und Schutzanstriche bewährt haben, galt es in La Rance die umlaufenden Turbinenräder zu schützen. Als erste Massnahme werden korrosionsfeste Materialien gewählt, z.B. Aluminiumbronze oder legierte Stähle mit 17% Chrom- und 4% Nickelgehalt. Die endgültige Lösung des Problems brachte aber erst der kathodische Korrosionsschutz (wie er auch bei eisernen Trinkwasserleitungen angewendet wird).

Beim Korrosionsangriff geben die Metalle Ionen an die als Elektrolyt wirkende Flüssigkeit ab. Das Herauslösen von Metallionen aus der Oberfläche kann durch die Abgabe von Elektronen aus einem äusseren Stromkreis unterbunden werden, so dass auf der ganzen Metalloberfläche nur noch eine kathodische Reaktion abläuft. Im Meerwasser sind Platinelektroden am wirksamsten. Aus Preisgründen verwendet man in La Rance jedoch platiniierte Tantalelektroden, die laufend ausgewechselt werden müssen, wobei die Dicke der Platinschicht den Preis und die Standzeit bestimmt.

Galvanische Korrosion entsteht zwischen zwei verschiedenen Metallen, die mit Wasser in Berührung stehen. Bei Schraubenverbindungen lässt sich die Verschiedenheit der Metalle oft nicht vermeiden. In La Rance hat sich Vaseline in solchen Fällen als gutes Rostschutzmittel erwiesen.

Stetige Überwachung und Unterhaltsarbeiten sind unvermeidlich. Sie erhöhen die Betriebskosten, bieten jedoch in Anlagen, die ständig zugänglich – wie Hafenbauten, Schleusen und Gezeitenkraftwerke – oder bemannt sind –

wie Bohrinseln –, an und für sich keine besonderen Schwierigkeiten. Die Probleme erhalten aber einen ganz andern Stellenwert in Anlagen, die weit von den Küsten und unbemannt im offenen Ozean arbeiten müssten, wie gewisse Wellenenergienutzer.

Die Ozeane speichern riesige, erneuerbare Energiepotentiale, die Energie ist aber auf grosse Massen verteilt, die Energiedichte ist entsprechend gering. Wellenenergienutzungsketten von mehreren 100 m oder sogar km Länge, Tausende von km<sup>2</sup> Fläche für Algenfarmen, grosse Wassermengen, die zum Verdampfen und Kondensieren gepumpt werden müssen, sind die direkten Folgen. Auf den Zusammenhang zwischen Gefälle und Raddurchmesser bei hydraulischen Turbinen wurde bereits hingewiesen (Kasten 2). In OWC-Kraftwerken und bei der Wärmenutzung fällt Luft resp. Dampf mit niedrigem Druck an. Die Turbinenräder werden entsprechend gross, wobei der Durchmesser und als Folge davon die Einheitsleistung heute begrenzt sind. Niederdruckdampfturbinen in bewährter Bauart erreichen heute Durchmesser bis zu 4,5 m und geben Einheitsleistungen bis zu 5 MW ab. Nach Berechnungen der Westinghouse Electric Corp. hätte ein Turbinenrotor mit 100 MW Einheitsleistung einen Durchmesser von 43,6 m. Solche Monster sind mit den heute verwendeten Materialien und der heutigen Bauweise undenkbar. Da die Dampftemperaturen niedrig sind, könnten faserverstärkte Kunststoffe eingesetzt werden. Die Gestaltung und Ausführung der Maschinen müssten aber den neuen Materialien angepasst werden: ein noch langer und teurer Entwicklungsweg!

Wie im Falle der Algenfarmen und der Wärmenutzung bereits angedeutet wurde, muss Energie aufgewendet werden – Pumpen von Nährwasser, Betriebs- und Kühlwasser –, damit überhaupt Nutzenergie anfällt. Im offenen Kreislauf zur Wärmenutzung verdampft nur gerade ein halbes Prozent des geförderten Oberflächenwassers, und das Vakuum im Verdampfer muss dem Druck entsprechen, der in 27 bis 37 km Höhe über der Erde herrscht. Die Nettoenergie im geschlossenen Kreislauf erreicht, wie bereits erwähnt, 30% bis 35%. Nur in Grossanlagen kann die Energiebilanz wirtschaftlich werden.

Die Nutzung der Wärmeenergie stellt an die Ingenieure grosse Herausforderungen. Um vernünftige Leistungen aus den Turbinen zu erhalten, müssen den niedrigen Dampfdrücken entsprechend grosse Dampfmenngen verarbeitet werden. Dies bedeutet wiederum grosse, mit Kühlschlangen oder -platten ausgerüstete Kondensatoren. Die Kondensatoren verschlingen heute noch 50% der Anlagenkosten. Um Wirtschaftlichkeit zu erreichen, müssen die Kosten um mehr als die Hälfte gesenkt werden. Die Materialwahl, aber auch die Lebensdauer (Korrosion, Verkrustung) beeinflussen die Kosten massgeblich.

Bei der Wärmenutzung müssen riesige Wassermengen aus grosser Tiefe gepumpt werden. Ein Grossteil der Pumpenleistung muss für die Reibungsverluste in den Kühlwasserleitungen aufgewendet werden, und diese Verluste nehmen mit dem Quadrat der Fliessgeschwindigkeit zu. Für gleiche Rahmenbedingungen – Leitungslänge 4 km, 4 m<sup>3</sup> Wasser pro Sekunde – sinkt der Reibungsverlust um 93%, wenn der Rohrdurchmesser verdoppelt wird. Als Voraussetzung für die wirtschaftliche Nutzung der Wärmeenergie müssen lange Leitungen mit grossem Durchmesser betriebssicher im Meer verlegt werden können. Claude ist 1933 an diesem Problem gescheitert – und es ist heute noch nicht gelöst! Man hofft Verbesserungen mit glasfaserverstärkten Kunststoffen, Elastomeren und compositen Kunststoffen zu erzielen. Die Leitungen sollen durch Ringe geführt werden, die an Stahlkabeln befestigt sind; die Stahlkabel schliess-



lich sind auf dem Ozeanboden verankert und mit Schwimmbojen versehen (Bild 7).

Wasser ist nicht nur eine Unzahl von  $H_2O$ -Molekülen mit mehr oder weniger Mineral- und Salzgehalt: Wasser ist ein Lebensraum, den nicht nur grosse und kleine Fische bevölkern, sondern auch – vor allem – Milliarden von Klein- und Kleinstlebewesen in ungeahnter Vielfalt. Viele dieser Lebewesen haben die natürliche Neigung, sich auf ruhenden Flächen abzusetzen, selbstverständlich auch auf den Bauteilen von Energieerzeugungsanlagen. Auf diesem Gebiet haben die Verantwortlichen des Gezeitenkraftwerks La Rance Überraschungen erlebt. Die Energieverluste der Lager, Getriebe und des Generators, die alle in einer wasserdichten Kapsel untergebracht sind, sind in Wärme umgewandelte Arbeit, die abgeführt werden muss. In La Rance wurde damit gerechnet, dass die wasserumströmte Kapsel die Wärme ableiten würde. Während einiger Zeit fand der Wärmeaustausch auch erwartungsgemäss statt, dann begann die Temperatur im Maschinenraum allmählich zu steigen, und schliesslich mussten die Turbinen abgeschaltet werden. Was war geschehen? Kleine Muscheln hatten sich auf der Aussenfläche der Kapseln abgelagert und mit der Zeit eine zentimeterdicke Kalkisolierschicht gebildet. Das Problem der Verkrustung stellt sich vor allem auch bei Kühlturmschlangen und -platten der Kondensatoren in wärmeenergienutzenden Anlagen. Als einziges wirksames Mittel kommt – vorläufig – nur das Abtöten der Lebewesen mit chlorhaltigen Chemikalien in Frage. Die notwendigen Mengen sind aber so gering, dass beispielsweise die strengen amerikanischen Normen eingehalten werden.

In einer Epoche, wo Menschen auf den Mond fliegen, mag es erstaunen, dass es noch Schwierigkeiten bietet, Rohrleitungen betriebssicher im Meer zu verlegen. Ist es tatsächlich einfacher, einen Menschen auf den Mond zu senden, als eine kilometerlange Rohrleitung im bewegten Meer zu verlegen? Vielleicht liegt der Unterschied auch darin, dass der Mondflug nicht wirtschaftlich sein muss...

### ... und Umweltprobleme

Der «Energiespeicher Ozean» wird immer wieder natürlich aufgefüllt. Aus diesem Grunde hat man in ihm immer häufiger den idealen Spender erneuerbarer und sanfter Energie gesehen. 1974 wurde im Zusammenhang mit dem Kraftwerk La Rance geschrieben, dieser Kraftwerkstyp dürfe zu den umweltfreundlichsten Arten der Energiegewinnung gezählt werden. Nach zwanzig Betriebsjahren zieht C. Rétière, Direktor des Laboratoire maritime in Dinard, Bilanz: Als das Kraftwerk fertiggestellt war, starb die maritime Fauna und Flora im Mündungsgebiet der Rance vollständig aus. Ursache waren die Änderung des Salzgehaltes, die Ablagerung von Sedimenten im Speicherbecken und die Anreicherung mit organischen Stoffen. Den Lebewesen waren die gewohnten Lebens- und Nahrungsgrundlagen entzogen worden. Nach der Inbetriebnahme veränderten die Bauwerke den Rhythmus und die Amplituden der Gezeiten; der höchste Tidenhub fiel von 13,5 auf 12,8 m, minimale Amplituden nehmen zu, hohe treten häufiger auf und bleiben 3 bis 4 Stunden konstant. Die benetzte Bodenfläche war vermindert, Schlammwasser und von den Turbinen erzeugte Strömungen veränderten das Mündungsbett und die Uferzonen. Nach zehn Jahren hat sich ein neues biologisches Gleichgewicht, allerdings in anderer Zusammensetzung, eingestellt, das Wasser lebt wieder. Die Lebewesen reagieren aber recht empfindlich auf Änderungen im Kraftwerksbetrieb. Ja, das Wasser lebt wieder, aber die Fischer sind sich einig: Es ist nicht mehr so wie früher...

La Rance und die vor dem Bau durchgeführten Modellversuche haben gezeigt, dass auch vergleichsweise bescheidene Bauwerke die Gezeiten beeinflussen. Ein früheres Projekt, das im Golf von St-Malo ein viel grösseres Gezeitenkraftwerk vorsah, wurde aufgegeben, nachdem Modellversuche erwiesen, dass durch den Damm die Gezeiten vermindert und das ursprüngliche Energiepotential um ganze 45% geringer wurde.

Auch Wellenenergie-Nutzungsanlagen verringern die Wellenhöhe und -periode. Dadurch können schwer – wenn überhaupt – voraussehbare Veränderungen in den Austauschvorgängen zwischen Atmosphäre und Oberflächenwasser und im Wasser selber auftreten, was wiederum Rückwirkungen auf das Plankton, das erste Glied in der Nahrungskette, hat. Mit solchen Umweltveränderungen müsste auch bei der Nutzung von Meeresströmungen gerechnet werden.

In Algenfarmen und bei der Nutzung der Wärmeenergie wird kaltes Tiefenwasser an die Oberfläche gepumpt und vermischt sich dort mit dem Oberflächenwasser. Plankton ist zum Teil sehr empfindlich auf Temperaturänderungen. Zudem enthält das heraufgepumpte Wasser andere Nährstoffe als das Oberflächenwasser und führt daher zu einer Veränderung in der Zusammensetzung der Populationen. Diese Veränderungen müssen nicht unbedingt negativ sein, sind aber kaum voraussehbar.

Gegenwärtig wird für die Nutzung der Wärmeenergie vor allem auf den geschlossenen Kreislauf gesetzt. Im geschlossenen Kreislauf wird eine Arbeitsflüssigkeit mit niedriger Verdampfungstemperatur umgewälzt, Freon oder Ammoniak, wie in unseren Kühlschränken, allerdings in viel grösseren Mengen. Es muss leider immer wieder damit gerechnet werden, dass Leitungen undicht werden oder gar brechen und Freon oder Ammoniak ins Wasser austritt. Und auf die Probleme, die Freon in der Umwelt hervorruft, muss wohl nicht noch speziell eingegangen werden.

Überraschungen hat auch der OWC-Prototyp in Bergen den Herstellern beschert: Die durch die Turbinen strömende Luft erzeugt sehr laute, unangenehme Pfeiftöne. Sollen solche Anlagen in der Nähe von Siedlungen aufgestellt werden, muss das Lärmproblem vorerst gelöst werden. Ob dies ohne Wirkungsgradeinbusse möglich ist, muss sich noch erweisen.

### Der unerschöpfliche Energiespeicher: Traum oder Zukunftshoffnung?

Algenfarmen-, Wellenenergie-Nutzungsprojekte sind vorläufig der Wirtschaftlichkeitsrechnung zum Opfer gefallen, aber auch OWC, Tapchan, Wärmeenergienutzung und Gezeitenkraftwerke müssen den Preisvergleich mit den herkömmlichen Energieträgern, vor allem mit Erdöl und Erdgas, bestehen. Frühere pessimistische Voraussagen vom baldigen Ende der fossilen Brennstoffvorräte sind korrigiert worden. Die Industriestaaten haben eine Galgenfrist eingeräumt erhalten und lassen den krisengeplagten Wirtschaftswagen weiterhin vom Erdöl ziehen. Die Umweltbelastung wird als kleineres Übel in Kauf genommen. Zahlreiche Staaten, darunter auch Entwicklungsländer, haben ihren Staatshaushalt ganz auf das Erdölgeschäft eingestellt.

Sanfte Energie gibt es nicht. Energiegewinnung, so «sanft» sie auf dem Papier erscheinen mag, verändert immer auch die Umwelt. Vom Menschen gewonnene Energie führt immer zur Herstellung von Produkten, Nahrung, Behausung, Kleidung, Kultur, lebensnotwendigen und Luxusgütern. Jede menschliche Tätigkeit belastet die Umwelt – wie übrigens alle andern Lebewesen die Umwelt auch belasten.



Energie kann noch so «sanft» gewonnen werden, spätestens ihre Verwendung führt zur Umweltbelastung. Nehmen wir z.B. die Energie aus Ozeanwärme. Dieses Energiepotential liegt vor allem in Zonen, an die Entwicklungsländer oder zumindest mässig industrialisierte Länder mit niedrigem Lebensstandard grenzen. Was soll aus der gewonnenen Energie werden? *Georges Claude* wollte für die Kühlschränke Rio de Janeiro Eis herstellen. Heute spricht man von Methanol-, Ammoniak-, Kunstdüngerfabriken, von Metallveredelung. Wer aber würde diese Fabriken leiten? Die wissenden Industriestaaten im paternalistischen Stil, oder käme es zu einer neuen Kolonisierung? Der Segen unerschöpflicher Energie führt direkt in politische, soziale und ethische Probleme!

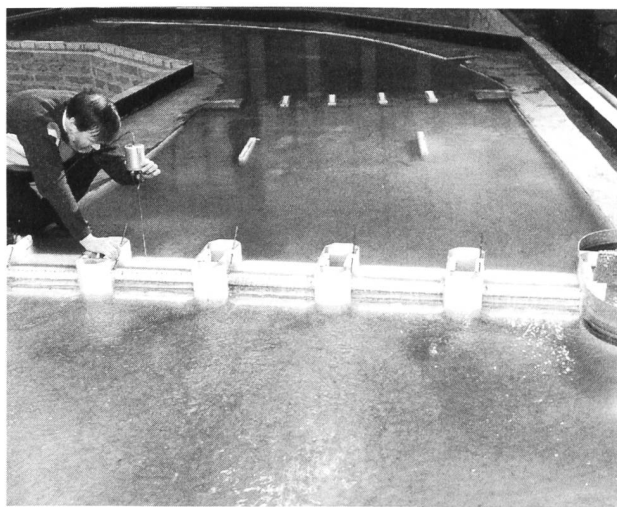
Trotzdem: Es wäre jammerschade, wenn Forschung und Entwicklung nicht weitergeführt würden. Was heute unwirtschaftlich ist, kann morgen interessant sein, vielleicht in an-

derer Form, mit andern Zielen. Es geht nicht darum, alles Machbare auch zu tun. Die kommenden Generationen – und es sind Milliarden Menschen! – werden ihren Anteil am Reichtum der Erde fordern. Ohne neue, erneuerbare Energiequellen wird es wohl kaum gelingen, allen Erdenbürgern ein menschenwürdiges Dasein zu ermöglichen. Die Probleme sind aber nicht nur technischer Art, sondern auch politischer, sozialer, ethischer und menschlicher. Die technisch-wirtschaftlichen sind lösbar. Die andern brauchen doch sehr viel Zeit, Überzeugungskraft und Einsicht. Haben wir noch genügend Zeit vor uns?

Adresse des Verfassers: *Paul Hertig*, Dozent an der Ingenieurschule Biel, Büthenbergstrasse 59, CH-2504 Biel.

## Modellversuche für ein projektiertes Wehr in Belfast

Kürzlich wurden an der School of the Built Environment der Queen's University of Belfast hydraulische Modellversuche für ein Wehr im Lagan-River durchgeführt. Der Lagan-River fliesst durch die Stadt und mündet unweit davon in die Meeresbucht von Belfast, den sogenannten Belfast-Lough. Das Bild zeigt das hydraulische Modell im Massstab 1:50, in dem das geplante Wehr und Teile des Lagan-Rivers nachgebildet und untersucht wurden. Mit dem Bau des Wehres werden zwei Ziele verfolgt. Einerseits sollte die Stadt Belfast vor Überschwemmungen durch Flutwellen geschützt werden, die durch Sturmfluten oder infolge globaler Erwärmung und dem daraus folgenden Anstieg des Meeresspiegels auftreten können. Andererseits bildet das Lagan-River-Wehr ein



Für das Regulierwehr Belfast wurden an einem Modell die hydraulischen Verhältnisse untersucht. 5 Öffnungen von 18,2 m Breite erlauben einen grössten Durchfluss von 1250 m<sup>3</sup>/s.

Hauptbestandteil des innerstädtischen Wiederaufbauprogrammes, welches zurzeit in Belfast durchgeführt wird. Mit dem neuen Wehr sollte der Wasserstand des Lagan-Rivers, der unter dem Einfluss der Gezeiten steht, reguliert und somit zukünftig die Entleerung und das damit verbundene Sichtbarwerden des Flussbettes bei Ebbe verhindert werden. Diese wasserbauliche Massnahme erlaubt es, die Uferzonen der Innenstadt attraktiver zu gestalten. Für die diversen Freizeitaktivitäten am und auf dem Wasser sollte der Wasserstand im Lagan-River oberhalb des Wehres stets ausreichend hoch sein. Das projektierte Wehr besteht aus fünf Durchlässen und hat eine Gesamtlänge von 115 m. Jede Wehröffnung ist 18,2 m breit und wird durch eine 5,5 m hohe Klappe reguliert, die eine maximale Durchflusskapazität von 250 m<sup>3</sup>/s garantiert.

Bei Wehren, die sich in von Gezeiten beeinflussten Flussmündungsgebieten befinden, besteht allgemein die Gefahr, dass das Wasser hinter der Stauhaltung infolge der geringen Zirkulation eutrophiert. Um diesen biologischen Prozess zu verhindern, werden beim Lagan-River-Wehr in den Pfeilern Rohre eingebaut, mit denen die Aufenthaltszeit des Wassers in der Staustufe verkürzt wird. Diese Vorrichtung erlaubt es, die Wassermassen, die sich über längere Zeit im seichten Bereich hinter dem Wehr ansammeln, bei Ebbe dosiert ins Unterwasser zu leiten. Die dadurch entstehende Zirkulation im Stauraum verbessert die Qualität des Wassers im Lagan-River und leistet somit einen weiteren Beitrag zur Attraktivität der Innenstadt von Belfast.

Die Bauarbeiten für das Wehr wurden Anfang 1991 aufgenommen und sollten etwa zwei Jahre dauern. Die Baukosten belaufen sich auf etwa 350 Mio Schweizer Franken.

Nach einer Pressemitteilung des London Pictures Service bearbeitet von *Martin Aemmer*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, CH-8092 Zürich.