



*Wellenenergie
und
ihre Nutzung*

Stefan Tannhauer
Am Pansbach 29a
33818 Leopoldshöhe
E-mail: stefan.tannhauer@freenet.de
Matrikel-Nr.: 1714361

Master-Arbeit

zum Thema

Wellenenergie und ihre Nutzung

an der Fakultät für Physik
der Universität Bielefeld

bei

Frau Dr. Michaela Schulz

im WS 2008/2009

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1) Einleitung	1
1.1 Physik und Schule	2
1.2 Allgemeines zur Arbeit	3
2) Physikalische Grundlagen	4
2.1 Voraussetzungen zur Wellentheorie	4
2.2 Entstehung von Meereswellen	5
2.3 Die Energie der Meereswellen	8
2.3.1 Potentielle Energie	9
2.3.2 Kinetische Energie	11
2.4 Tidenenergie	17
3) Nutzung der Wellenenergie	24
3.1 Anlagen an Küstenlinien	24
3.1.1 Gezeitenkraftwerke	25
3.1.2 OWC-Kraftwerke	26
3.2 Anlagen vor der Küste	29
3.2.1 Nickende Ente	29
3.2.2 Wellenroller	31
3.2.3 Platten-Wellen-Kraftwerk	32
3.2.4 OWC-Bojen	34
3.2.5 Brandl-Generator-Boje	35
3.2.6 Mighty-Whale-OWC	36
3.3 Offshore-Anlagen	38
3.3.1 Archimedischer Wellenschwinger	38
3.3.2 Wave Dragon	39
3.3.3 Pelamis	41
3.3.4 Kraftwerksbojen	42

	Seite
3.4 Weitere Anlagen zur Energiegewinnung aus dem Meer	43
3.4.1 Strömungsanlagen	44
3.4.2 Tocardo	45
3.5 Die Wellenkraftwerke im Unterricht	47
4) Chancen und Risiken der Nutzung von Wellenenergie	48
4.1 Chancen der Wellenenergienutzung	48
4.2 Risiken der Wellenenergienutzung	48
4.3 Diskussion der Argumente	49
5) Bau eigener Wellenkraftwerke	50
5.1 Die OWC-Boje	50
5.1.1 Vorüberlegungen	50
5.1.2 Benötigte Materialien	51
5.1.3 Konstruktion der Anlage	52
5.1.4 Betrieb der Anlage	55
5.1.5 Einsatz im Physikunterricht	56
5.1.6 Mögliche Probleme / Komplikationen	56
5.2 Der Archimedische Wellenschwinger	57
5.2.1 Vorüberlegungen	57
5.2.2 Benötigte Materialien	58
5.2.3 Konstruktion der Anlage	58
5.2.4 Betrieb der Anlage	60
5.2.5 Einsatz im Physikunterricht	60
5.2.6 Mögliche Probleme / Komplikationen	61
5.3 Die Brandl-Generator-Boje	61
5.3.1 Vorüberlegungen	61
5.3.2 Benötigte Materialien	62
5.3.3 Konstruktion der Anlage	62
5.3.4 Betrieb der Anlage	65
5.3.5 Einsatz im Physikunterricht	65
5.3.6 Mögliche Probleme / Komplikationen	66

	Seite
6) Zusammenfassung	67
7) Glossar	68
8) Literaturverzeichnis	70
8.1 Bücher	70
8.2 Internetseiten	71
8.3 Sonstige Quellen	72
9) Erklärung	74
10) Anhang	

1) Einleitung

Klimawandel und steigende Energiekosten. Dieses waren 2007 und 2008 häufig diskutierte Themen in der Politik und Weltöffentlichkeit. Der Begriff Klimakatastrophe ist sogar Wort des Jahres 2007 geworden.¹

Der vom Menschen durch Industrie, Verkehr und Energieproduktion verursachte CO₂-Ausstoß ist ohne Zweifel verantwortlich für den Anstieg der globalen Temperatur und die damit verbundenen Folgen wie etwa das Abschmelzen der Polkappen oder das Ausbreiten der Wüstenregionen auf unserem Planeten.

Immer höhere Kosten für Heizöl, Benzin und Lebensmittel bei immer geringer werdenden Vorräten an Rohöl und Erdgas. Dieses führte insbesondere Anfang des Jahres 2008, als der Preis für ein Barrel (159 Liter) Rohöl auf dem Rekordniveau von US-\$ 147,00 stand², zu heftigen Diskussionen über die Energie- und Wirtschaftspolitik in vielen Ländern der Erde.

Auch werden im Jahr 2009 nach dem Abklingen der Finanz- und Wirtschaftskrise die knapper werdenden Ressourcen wieder ein großes Gesprächsthema liefern. Schon der Gasstreit zwischen Russland und der Ukraine zu Beginn des Jahres verdeutlichte die Abhängigkeit von den begrenzten Energieträgern Öl und Gas.

Der Ausbau und die effizientere Nutzung der regenerativen und umweltfreundlichen Energien ist ein möglicher Ausweg.³

Neben den bereits bekannten und zum Teil auch intensiv genutzten Energiequellen Sonnenenergie, Windkraft, Biomasse und Wasserkraft aus Stauseen gibt es aber auch noch eine weitere, unerschöpfliche Energiequelle: Die Energie des Meeres.

Wer kennt nicht die Bilder, auf denen Sturmfluten Küsten überspülen, Tsunamis ganze Landstriche vernichten oder Schiffe auf hoher See kentern. Diese Energie der Meereswellen zur Energiegewinnung zu nutzen und zugleich den Verbrauch an fossilen Energieträgern und den Ausstoß von CO₂ zu verringern, sollte ebenso Schwerpunkt der Forschung nach erneuerbaren Energien werden.

Da der größte Teil der Erdoberfläche mit Wasser bedeckt ist und viele Länder über weite Küstenlandschaften verfügen, bietet sich die Nutzung der Wellenenergie als nachhaltige Energieversorgung geradezu an.⁴ Die Technik ist somit in fast allen Ländern der Welt mit Zugang zum Meer nutzbar.

¹ <http://www.gfds.de/index.php?id=11>

² <http://www.handelsblatt.com/finanzen/rohstoffe/oel-bleibt-auf-lange-sicht-teuer;2025032>

³ <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/ziele-der-energiepolitik,did=9170.html>

⁴ Ruprecht, A.: *Strom aus dem Meer*, S. 73.

Zumal können im Zeitraum der Wirtschaftskrise durch die effiziente Nutzung der erneuerbaren Energien auch zusätzliche Arbeitsplätze im Bereich der Forschung und Produktion geschaffen werden. Die Nutzung der Wellenenergie ist daher ökologisch und ökonomisch sinnvoll.

Wellenkraftwerke nutzen die hydrodynamische Energie, d.h. die Energie von Bewegung und Druckunterschieden von Meereswellen zur Elektroenergieerzeugung.⁵

Bei vollständiger Ausnutzung der Wellenenergie entlang aller Küsten der Erde könnte so die Hälfte des weltweiten Strombedarfs aus dem Meer gedeckt werden.⁶

Zur Zeit werden verschiedene Prototypen zur Nutzung der Wellenenergie getestet und es arbeiten bereits auch die ersten kommerziellen Kraftwerke wie etwa Brandungskraftwerke in Schottland und Tidenkraftwerke in den Niederlanden.

Ein Ausbau der Nutzung dieser Form von Energie kann dazu beitragen, den Anteil an erneuerbaren Energien im täglichen Leben zu erhöhen und auch zugleich den Küstenschutz zu verbessern.

1.1 Physik und Schule

Bei der immer größer werdenden Bedeutung der effizienten Energienutzung ist es umso wichtiger, sich schon frühzeitig mit dieser auseinander zu setzen. Hierfür eignet sich insbesondere der Physikunterricht.

Nach dem Kernlehrplan des Landes NRW soll im Fach Physik bei den Schülerinnen und Schülern „für ein besseres Verständnis der natürlichen und technischen Umwelt“ gesorgt werden.⁷

Ebenso ist es sinnvoll, sich im Physikunterricht bereits in der Unterstufe zum Thema Energie mit den erneuerbaren und alternativen Energiequellen auseinander zu setzen.

Wo – wenn nicht in der Schule – ist es der frühestmögliche Zeitpunkt, sich mit diesem wichtigen Thema zu beschäftigen und wo – wenn nicht in der Schule – kann man alle Menschen dafür sensibilisieren?

Der Physikunterricht bietet die Möglichkeit, sich der Bedeutung der erneuerbaren Energien bewusst zu werden, diese zu verstehen und ihre Nutzung und Einsatzmöglichkeiten kennen zu lernen.

⁵ Gaede, P.-M. u.a.: *GEO Themenlexikon in 20 Bänden*, Band 8, S. 1293.

⁶ ZDF-Dokumentationssendung „Abenteuer Wissen“ vom 07.01.2009.

⁷ Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW: *Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule in NRW – Physik*, S. 5 im Lehrplanteil

1.2 Allgemeines zur Arbeit

In dieser Arbeit soll das Thema der Wellenenergie und ihrer Nutzung behandelt werden.

Hierzu wird zunächst auf die Wellentheorie eingegangen. Diese beschäftigt sich mit den Grundlagen der Wellenenergie auf Schulniveau bis zur Sekundarstufe II und beschreibt die verschiedenen Typen wie potentielle und kinetische Energie, sowie die Energie der Tide.

Der Hauptteil der Arbeit besteht in der Beschreibung der Möglichkeiten zur Nutzung der Wellenenergie. Verschiedene Arten von Kraftwerken werden erklärt und deren Einsatzmöglichkeiten erläutert. Ebenso wird die Behandlung dieser Wellenkraftwerke im Physikunterricht thematisiert.

Weiterhin werden die Chancen und Risiken der Nutzung von Wellenenergie aufgezeigt. Hier soll neben den technischen Möglichkeiten und eventuellen Komplikationen auch der Aspekt der Umweltverträglichkeit diskutiert werden.

Abschließend werden Anleitungen zum Bau eigener Wellenkraftwerke gegeben. Diese können im Schulunterricht nachgebaut werden. Am Modell kann so die Arbeits- und Funktionsweise des Kraftwerks nachvollzogen und im Unterricht behandelt werden.

2) Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der Wellentheorie auf Schulniveau und leicht darüber hinaus beschrieben werden.

Hierzu wird zunächst ein Überblick über die Voraussetzungen gegeben, welche die Schülerinnen und Schüler haben sollten, um die allgemeine Theorie der Wellenenergie und –Fortbewegung behandeln und nachvollziehen zu können.

Daran schließt sich die Beschreibung der beiden Arten von Energie – potentielle und kinetische – und der Energie von Ebbe und Flut, der so genannten Tide, an.

Zu jedem der einzelnen Bereiche der Wellenenergie sind Anmerkungen zur Behandlung im Unterricht gegeben. An welcher Stelle der Beschreibung der Wellenenergie ein Ausstieg für die Schülerinnen und Schüler aufgrund des Schwierigkeitsgrades sinnvoll wäre, wird somit deutlich.

2.1 Voraussetzung zur Wellentheorie

Das Thema der regenerativen Energien, zu denen auch die Wellenenergie gezählt wird, soll laut Kernlehrplan für Gymnasien in Nordrheinwestfalen in den Jahrgangsstufen 7 und 9 behandelt werden.⁸

Im fachlichen Kontext der effizienten Energienutzung soll in diesen Jahrgangsstufen unter anderem auch über den Aufbau und die Funktionsweise von Kraftwerken gesprochen werden. Dieses würde im Rahmen der erneuerbaren Energien auch die Wellen- und Wasserkraftwerke umfassen.⁹

Aber auch in den früheren Klassen der Sekundarstufe I kann und sollte das Thema der regenerativen Energien angesprochen und behandelt werden. So kann zum Beispiel im Bereich der Elektrizität in den Jahrgangsstufen 5 und 6, in denen die elektrische Energie über Energiewandler und –Transportketten eingeführt werden soll¹⁰, bereits das Wellen- oder Gezeitenkraftwerk als mögliches Beispiel für eine Art der Energiegewinnung dienen.

Auch in Zeiten der knapper werdenden Öl- und Gasreserven ist es von Bedeutung, die Grundlagen der regenerativen Energien und deren Nutzung bereits in der Sekundarstufe I zu behandeln und zu diskutieren.

⁸ Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW: *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in NRW*, S. 36.

⁹ Meyer, L. und Schmidt, G.-D.: *Duden Physik – Basiswissen Schule*, S. 342.

¹⁰ Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW: *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in NRW*, S. 34.

Zudem sieht auch der Kernlehrplan vor, dass die Schülerinnen und Schüler zum Ende der Sekundarstufe I in der Lage sein sollen, die Dringlichkeit des Sparens von Energie zu begründen, sowie verschiedene Möglichkeiten zur Gewinnung von Energie zu nennen und unter ökologischen Gesichtspunkten zu vergleichen.¹¹

Die eigentliche Behandlung und Beschreibung der Wellenenergie, wie sie im Kapitel 2.3 erfolgt, ist allerdings erst ab der Sekundarstufe II und dann auch nur in Ausschnitten möglich. Es werden beispielsweise die Begriffe der Phasen- und Gruppengeschwindigkeit, sowie der Amplitude und Wellenlänge verwendet, welche erst in der Sekundarstufe II ausführlich erläutert und gefestigt werden.

Sowohl in Grund-, als auch in Leistungskursen sollen im Bereich der Energie und Arbeit die Themen Lageenergie und Hubarbeit, sowie Bewegungsenergie behandelt werden.¹² Hierzu kann auch die Energie einer Meereswelle gezählt und als mögliche Energiequelle genannt werden.

Die Behandlung der Wellentheorie ist im Themenbereich der mechanischen Schwingungen möglich. In diesem sollen Schwingungsvorgänge und –Größen behandelt, sowie harmonische Schwingungen beschrieben werden.¹³ Diese bilden auch die Grundlage für die Betrachtung der Meereswellenenergie.

In einigen Schulbüchern wird die Meereswelle als typisches Beispiel einer allgemeinen Welle aus dem Alltag genannt.¹⁴ Ausgehend von dieser Vorstellung kann auch in der Schule die Theorie der Meereswellen in Grundzügen beschrieben werden.

Eine etwas ausführlichere Möglichkeit der Behandlung von Meereswellen bieten die drei nachfolgenden Abschnitte.

2.2 Entstehung von Meereswellen

Meereswellen werden neben der Einwirkung von Sonne und Mond überwiegend durch Wind angefacht. Das Wetter spielt somit eine große Rolle bei der Wellenentstehung.

Während Wellen mit extremen Längen auch durch die Gezeiten erzeugt werden, werden kurze bis mittlere Wellen fast ausschließlich durch Wind an der Wasseroberfläche erzeugt. Längere Wellen können aber auch durch Erdbeben oder wetterbedingte Luftdruckunterschiede verursacht werden, wie es z.B. bei Tsunamis der Fall ist.¹⁵

¹¹ Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW: *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in NRW*, S. 27.

¹² Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW: *Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule in NRW – Physik*, S. 10 im Lehrplan-Teil.

¹³ Ebd.

¹⁴ Dorn, F. und Bader, F.: *Physik Sek. II – Gymnasium Gesamtband*, S. 298.

¹⁵ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 82 f.

Da bei Meeres- oder allgemeinen Wasserwellen gegenüber den elektromagnetischen Wellen die Erdgravitation eine große Rolle spielt, werden diese Wellen, die den Hauptteil der Energie speichern, auch Schwerewellen genannt.

Das Aussehen und die Form dieser durch Stürme erzeugten Wellen hängt dabei von vielen Faktoren ab:

Windgeschwindigkeit, Dauer des Windes, Windangriffsfläche auf der Wasseroberfläche (engl.: fetch), Wassertiefe und Wellenlänge.¹⁶

Der Einfluss der Wellenlänge wird auch in Kapitel 2.3 beschrieben.

Schwerewellen werden überwiegend über tiefem Wasser gebildet. Die Gebiete mit der meisten Energie in Wasserwellen sind daher die offenen Meere in äquatorfernen Regionen.¹⁷ Die größte Wellenaktivität kann zwischen dem 30. und 60. Breitengrad sowohl nördlicher, als auch südlicher Breite gefunden werden.¹⁸

Sie entstehen dadurch, dass der Wind durch Reibung an der Wasseroberfläche die oberflächennahen Wasserpartikeln beschleunigt. Die Meeresoberfläche beginnt sich zu kräuseln.

Die durch Luftturbulenzen verursachten Druckunterschiede in den Oberflächenabschnitten werden durch das Heben und Senken des Meeres ausgeglichen. Der Wind kann auf der rauen Oberfläche nun noch größere Druckunterschiede erzeugen, sodass die Intensität der Ausschläge immer mehr zunimmt und höhere Wellen entstehen.¹⁹

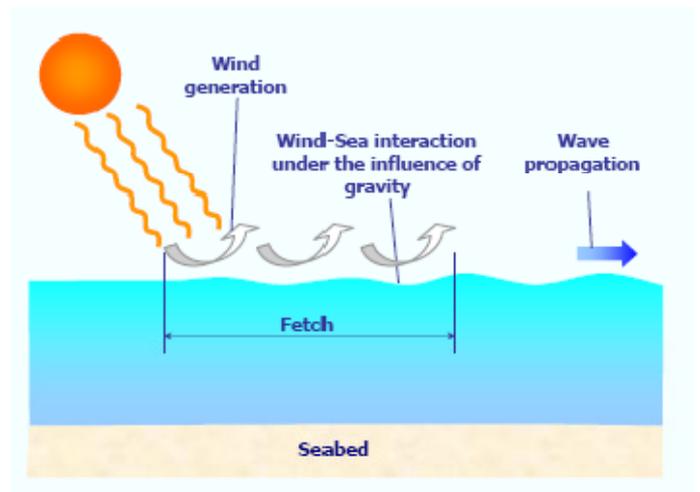


Abb. 1: Die Erzeugung von Meereswellen auf dem offenen Meer: Der Wind türmt die Wassermassen auf, die sich unter dem Einfluss der Gravitation fortbewegen. [Quelle: http://www.thew2o.net/events/oceanenergy/images/wave_energy.pdf]

Neben den durch Wind verursachten Schwerewellen sind für die Energiegewinnung auch Ebbe und Flut von Interesse. Diese so genannten Gezeiten werden durch die Gravitationskräfte von Sonne, Mond und Erde hervorgerufen. Dabei wird auf der jeweils Mond zu- und abgewandten Seite der Meeresspiegel angehoben, dazwischen entsprechend abgesenkt.²⁰

Einen genaueren Einblick in die Entstehung dieser so genannten Tide ist in Kapitel 2.4 gegeben.

¹⁶ Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 70.

¹⁷ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 83.

¹⁸ http://www.thew2o.net/events/oceanenergy/images/wave_energy.pdf

¹⁹ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 83.

²⁰ http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm.

Die nachfolgende Grafik zeigt zusammenfassend den Einfluss von Wind und anderen Ereignissen auf die Entstehung von Meereswellen:

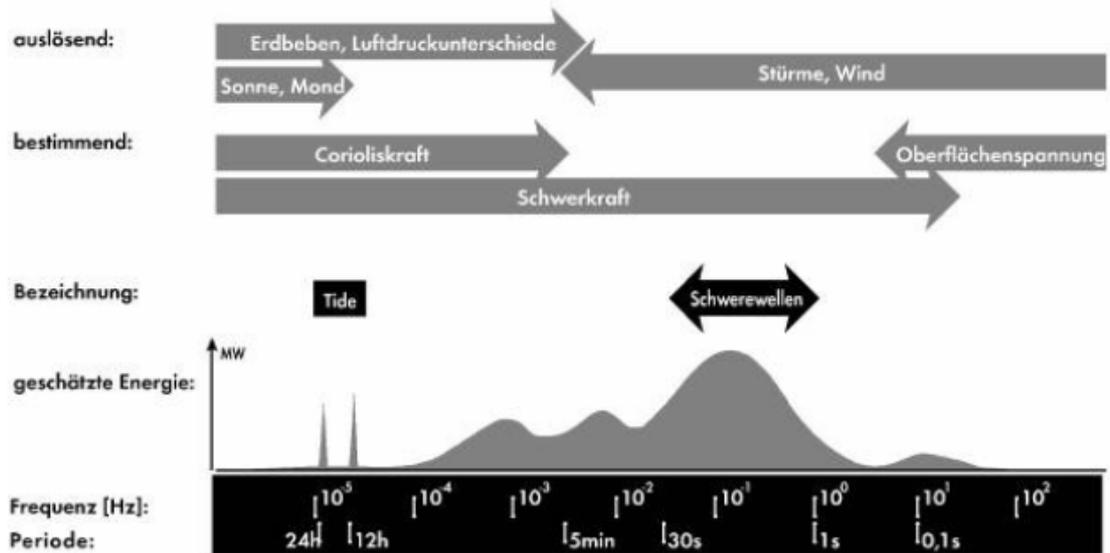


Abb. 2: Die Entstehung von Wellen durch die Einwirkung verschiedener Kräfte und die zugehörigen Daten wie Energie und Frequenz.

[Quelle: http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte_100/104_2001/104_2001_WEKatalyse.htm]

Wenn die Wellen ihre maximale Höhe von ca. 14 % der Wellenlänge (vgl. Kap. 2.3.1) erreicht haben und sich auch Frequenz und Wellenlänge nicht mehr ändern, wird der Seegang als „ausgereift“ bezeichnet. Die nun in den Wellen gespeicherte Energie kann auch bei Nachlassen oder Ausbleiben des Windes über tausende Kilometer transportiert werden. Dieses beschreibt der Begriff der „Dünung“.²¹

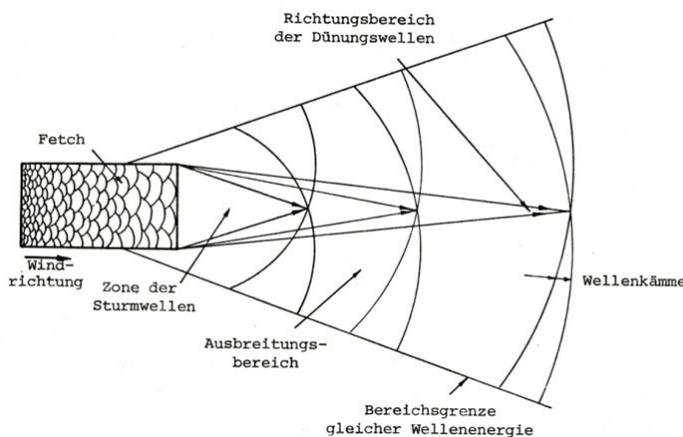


Abb. 3: Die Ausbreitung eines ausgereiften Seegangs im Tiefwasserbereich wird Dünung genannt.

[Quelle: Eckener, U. u.a.: *Systemuntersuchung Technologie und Nutzung der Wellenenergie*, S. 16]

Die Ausbreitung der Wellen erfolgt überwiegend in die selbe Richtung, die auch die antreibende Kraft, d.h. der Wind, hatte. Wellen mit einer großen Wellenlänge haben dabei eine geringere Abweichung von der Ausbreitungsrichtung als kurze Wellen.²²

Die nebenstehende Grafik zeigt die typische fächerartige Ausbreitung der Wellen.

²¹ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 83.

²² Eckener, U. u.a.: *Systemuntersuchung Technologie und Nutzung der Wellenenergie*, S. 16.

Die Meereswellen laufen, nachdem sie auch mehrere tausend Kilometer ohne nennenswerten Energieverlust zurückgelegt haben, auf flacheres Ufer und Küsten auf. Dort verringern sich Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge mit der abnehmenden Tiefe des Wassers. Die Höhe der Welle nimmt dabei bedingt durch das „Aufstauen“ der Wassermassen stetig zu.²³

Durch Reibung mit dem Meeresboden wird den Wellen zunehmend Energie entzogen. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf einen bestimmten Wert abgesunken, überrollen die Wellenberge die Wellentäler und die Welle bricht. Es bilden sich kleinere, schäumende Wellen, die auch als „Brandung“ bezeichnet werden.²⁴

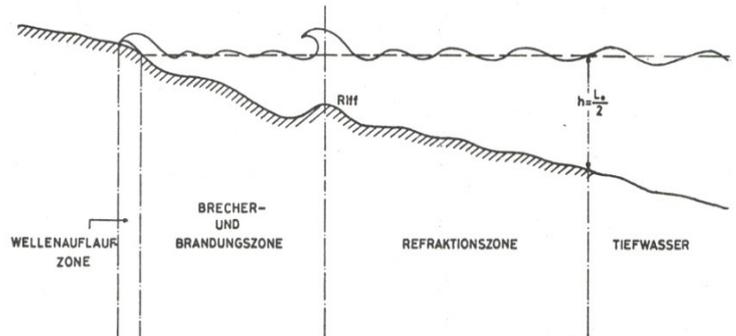


Abb. 4: Das Auflaufen einer Welle auf flache Ufer und Küsten.
[Quelle: Eckener, U. u.a.: *Systemuntersuchung Technologie und Nutzung der Wellenenergie*, S. 16]

Danach läuft die Welle in der Auflaufzone, z.B. dem Strand, aus, verliert zunehmend an Energie und die Wassermassen werden durch die Erdbeschleunigung anschließend wieder zurückgezogen.

Die Behandlung der Entstehung von Meereswellen kann auch in der Schule in dem Umfang besprochen werden, wie es im obigen Abschnitt der Fall ist.

Für das Verständnis des Themas auf diesem Niveau sind keine besonderen Voraussetzungen notwendig und die Kernaussagen der Wellenentstehung können bereits in den ersten Klassen der Sekundarstufe I behandelt werden.

2.3 Energie der Meereswellen

Die physikalische Beschreibung von Wasserwellen und ihrer Energie ist einerseits hoch interessant, andererseits auf der theoretischen Behandlungsebene aber auch sehr komplex. Aus diesen Gründen ist es für die Schulphysik meist nur möglich, das Thema in seinen Grundlagen zu behandeln und tiefere Untersuchungen zu vernachlässigen.

Im Folgenden soll dennoch eine etwas genauere Beschreibung der Theorie von Oberflächenwellen auf Flüssigkeiten gegeben werden, als es in der Schule der Fall wäre. Entsprechende Vermerke zu Stellen, an denen ein Ausstieg aus der Theorie für den Physikunterricht sinnvoll ist, werden im Text gegeben.

²³ <http://encyclopedie-de.snyke.com/articles/wasserwelle.html>.

²⁴ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 83.

Die Energie einer Meereswelle kann in die beiden grundlegenden Energieformen, potentielle und kinetische Energie (siehe Abb. rechts), zerlegt werden, die in den beiden folgenden Kapiteln einzeln behandelt werden.

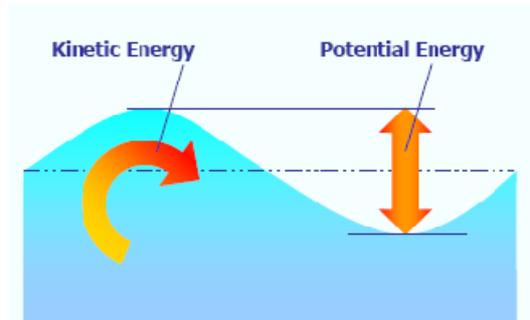


Abb. 5: Die Energie einer Meereswelle lässt sich in kinetische und potentielle Energie unterteilen.
[Quelle: http://www.thew2o.net/events/oceanenergy/images/wave_energy.pdf]

2.3.1 Potentielle Energie

Die potentielle Energie ist gegenüber der kinetischen Energie die wohl leichter zu beschreibende Energieform einer Wasserwelle.

Sie beruht auf dem Druckunterschied zwischen dem Wellenberg und dem Wellental.²⁵

Aus der Mechanik ist bekannt, dass sich die potentielle Energie E_{pot} eines auf die Höhe h angehobenen Körpers mit der Masse m beschreiben lässt durch²⁶

$$E_{pot} = mgh \quad (1)$$

Dieses ist auch hier die grundlegende Formel für die potentielle Energie der Meereswellen, wobei $g = 9,80665 \frac{m}{s^2}$ die Konstante der Erdbeschleunigung ist.

Das Profil der Welle entspricht im Allgemeinen dem einer Trochoide oder einer Zykloide. Dieses sind periodisch wiederkehrende Wellenbewegungen, bei denen die Wellentäler breiter sind als die Wellenberge.

Vereinfacht kann der Wellenquerschnitt aber als sinus-förmig angenommen werden. Zwar trifft dieses nur für relativ kleine Amplituden zu, ist aber für die Betrachtung der potentiellen Energie ausreichend.²⁷

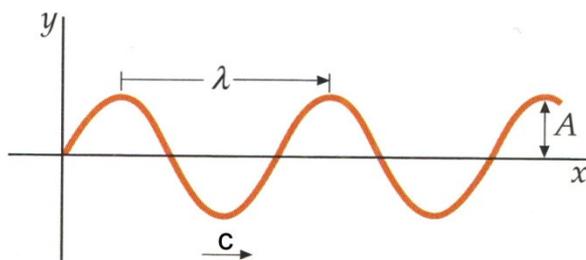


Abb. 6: Das Profil einer Meereswelle entspricht vereinfacht einem Sinus.
[Veränderte Quelle: Tipler, P.A. und Mosca, G.: *Physik*, S. 471]

Die nebenstehende Abbildung zeigt das vereinfachte, sinusförmige Querschnittsprofil einer Welle.

Hier ist λ die Wellenlänge, c die Phasengeschwindigkeit, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in x -Richtung, und A die Amplitude der Welle.

²⁵ Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 70.

²⁶ Fischer, T. und Dorn, H.-J.: *Physikalische Formeln und Daten*, S. 8.

²⁷ Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 198.

Nimmt man an, dass sich der normale Meeresspiegel auf der Höhe $y = 0$ befindet, so haben die Wellenberge die Höhe $h_{Berg} = A$. Die Wellentäler liegen demnach unter dem Wasserspiegel und haben die größte Tiefe von $h_{Tal} = -A$.

Überträgt man diese Höhenunterschiede auf die Formel (1), so ergibt sich für die potentielle Energie einer Meereswelle:

$$E_{pot} = MgA \quad , \quad (2)$$

welches für eine Wassermenge mit der Masse M an der höchsten Stelle der Welle gegenüber dem normalen Wasserspiegel gilt.

Die potentielle Energie einer Meereswelle wird folglich durch die Ausmaße der Welle, d.h. Länge und Breite der Wassermassen, sowie die Höhe der Welle bestimmt.

Eine Meereswelle kann aber nicht beliebig groß werden. Die lineare Wellentheorie liefert eine Maximalhöhe A_{max} der Meereswelle von etwa 14 % der Wellenlänge λ . Bei größeren Amplituden würde entsprechend Gleichung (5) die Geschwindigkeit der Wasserteilchen über der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle liegen. Die Wassermassen würden aus dem Wellenberg ins Tal stürzen und die Welle bricht.²⁸

Die Leistung in Watt, welche einer Welle dadurch entnommen werden kann, dass die Wellenberge in die Täler hinabstürzen, kann abgeschätzt werden durch:²⁹

$$P = 3060 \text{ kg s}^{-3} \text{ m}^{-\frac{3}{2}} \cdot A^2 \cdot \sqrt{\lambda} \cdot l \quad . \quad (3)$$

Hierbei ist A wiederum die Amplitude der sinusförmigen Welle, λ die Wellenlänge und l die Breite in Metern, über welche sich die Wellenfront erstreckt. Der Vorfaktor ergibt sich aus dem Zusammenfassen von empirisch ermittelten Konstanten und kompensiert die Längeneinheiten.

Betrachtet man die für die deutsche Nordsee typischen Werte³⁰ von $A = 0,75 \text{ m}$, $\lambda = 60 \text{ m}$, so ergibt sich eine Leistung von $P = 13,3 \text{ kW}$ pro Meter Wellenfront.

Die potentielle Energie einer Meereswelle kann aufgrund der Anforderungen und der verwendeten Begriffe wie beispielsweise der Wellenlänge erst in der Oberstufe ausführlich behandelt werden. Dort kann die Theorie der potentiellen Energie dann aber im kompletten Umfang behandelt werden, wie es oben der Fall ist.

Einige Kernaussagen, wie beispielsweise „je höher die Welle, desto höher die potentielle Energie“, können aber auch bereits in der Mittelstufe angesprochen und z.B. auch mit Speicherkraftwerken oder Staudämmen in Verbindung gebracht werden.

²⁸ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 83.

²⁹ Fricke, J. und Borst, W.L.: *Energie aus dem Meer*, S. 85.

³⁰ Ebd.

2.3.2 Kinetische Energie

Die Bewegungsenergie einer Welle setzt sich aus Bewegungen in orbitaler, d.h. senkrechter, und horizontaler, d.h. waagerechter Ebene zusammen.³¹

Für die Betrachtung der kinetischen Energie einer Welle ist es nötig, sich deren Entstehung durch phasenverschobene Kreisbewegungen in Richtung der Wellenbewegung vorzustellen.³² Dieses ist in der nachfolgenden Grafik verdeutlicht.

Die Länge einer Welle ist gegeben durch die Wellenlänge λ . Die Phasengeschwindigkeit c beschreibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, welche aber zunächst nichts mit der Geschwindigkeit v der Wasserteilchen zu tun hat, was leicht an schwimmenden Körpern im Wellengang zu erkennen ist.

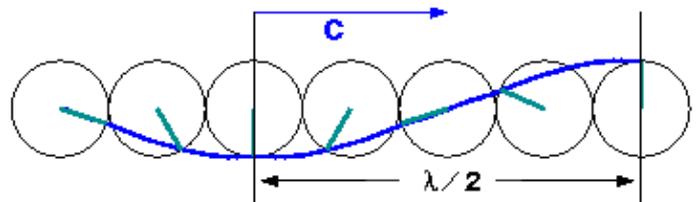


Abb. 7: Die Beschreibung einer Welle durch eine phasenverschobene Kreisbewegung.
[Veränderte Quelle: http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/wellen_w.htm]

Das System der Welle lässt sich nun aus zwei Punkten beobachten:³³ Zum einen aus der Sicht eines relativ zum Meeresboden ruhenden Systems, zum anderen als Beobachter auf der sich fortbewegenden Welle selbst.

Die Phasengeschwindigkeit c beschreibt demnach die Relativgeschwindigkeiten der beiden Systeme zueinander.

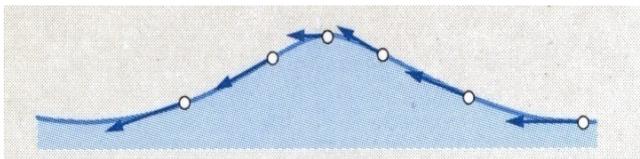


Abb. 8: Geschwindigkeit der Wasserteilchen aus Sicht des auf der Welle mitfahrenden Beobachters.
[Quelle: Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 198]

Aus Sicht des Systems auf der Welle bewegen sich die Wasserteilchen parallel zur Wasseroberfläche mit der mittleren Geschwindigkeit c am Beobachter, welcher auf der Welle ruht, vorbei. Dieses ist im nebenstehenden Bild verdeutlicht.

Wie in Kapitel 2.3.1 bereits beschrieben haben die Wasserteilchen auf dem Wellenberg eine höhere potentielle Energie als in den Wellentälern. Dieses führt dazu, dass die Wasserteilchen nach hinablaufen in die Wellentäler eine höhere Geschwindigkeit besitzen als die Teilchen auf den Wellenbergen. Die potentielle Energie wurde in kinetische Energie umgewandelt und die Wasserteilchen werden schneller.

³¹ Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 70.

³² http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/wellen_w.htm.

³³ Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 198.

Die grundlegende Formel zur Berechnung der kinetischen Energie E_{kin} einer Meereswelle ist die aus der Mechanik bekannte Formel

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \tilde{v}^2 . \quad (4)$$

Hierbei ist m die Masse und \tilde{v} die Geschwindigkeit des bewegten Objektes.

Der Gewinn an kinetischer Energie ergibt sich aus der Differenz von der kinetischen Energie $E_{k,2}$ im Wellental und der kinetischen Energie $E_{k,1}$ auf dem Wellenberg.³⁴

$$E_{res} = E_{k,2} - E_{k,1} = \frac{1}{2} M (c + v)^2 - \frac{1}{2} M (c - v)^2 = 2Mcv , \quad (5)$$

wobei hier v die Geschwindigkeit der Wasserteilchen aus Sicht des die Welle begleitenden Beobachters und M die Masse eines Wasserpaketes ist.

Da dieser Energiezuwachs gleich der potentiellen Energie E_{pot} auf dem Wellenberg mit der Höhe $2 \cdot A$ gegenüber dem Wellental ist, gilt:

$$2Mcv = Mg2A \quad \Leftrightarrow \quad v = \frac{gA}{c} . \quad (6)$$

Die eigentliche Geschwindigkeit v der Wasserteilchen hängt demnach antiproportional mit der Phasengeschwindigkeit c zusammen und ist direkt abhängig von der Amplitude A der Welle.

Aus Sicht des relativ zum Meeresboden ruhenden Beobachters bewegt sich das System der Welle mit der Geschwindigkeit c fort. Würde man diese vektoriell von den Beobachtungen abziehen, ergibt sich für die Wasserteilchen eine kreisförmige Bewegung.

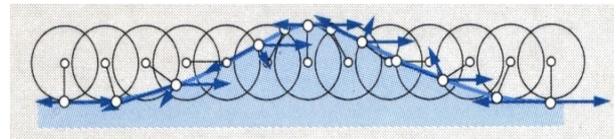


Abb. 9: Die Wasserteilchen bewegen sich für den ruhenden Beobachter auf einer Kreisbahn.
[Quelle: Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 198]

Die Bahngeschwindigkeit der Teilchen auf der Wasseroberfläche beträgt gerade v und der Radius r des zugehörigen Kreises ist die Amplitude A . Für die Winkelgeschwindigkeit ω auf der Kreisbahn gilt:³⁵

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{v}{A} = \frac{gA}{Ac} = \frac{g}{c} . \quad (7)$$

Um nun die Phasengeschwindigkeit c bestimmen zu können, benötigt man die Wellenlänge λ , welche über die Formel³⁶

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} \quad \Leftrightarrow \quad \omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \quad (8)$$

³⁴ Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 198.

³⁵ Erbrecht, R. u.a.: *Das Große Tafelwerk interaktiv – Formelsammlung für die Sek. I und II*, S. 91.

³⁶ Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 198.

mit der Winkelgeschwindigkeit ω zusammenhängt. Für die Phasengeschwindigkeit c ergibt sich aus Einsetzen von (8) in die Gleichung (7):

$$\frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{g}{c} \quad \Leftrightarrow \quad c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}. \quad (9)$$

Die Phasengeschwindigkeit c nimmt demnach mit der Wellenlänge λ zu. Diesen Effekt nennt man normale Dispersion.³⁷ Wellen von großen Längen besitzen somit eine höhere Geschwindigkeit als kurze Wellen.

Unter Berücksichtigung des Zusammenhanges von Phasengeschwindigkeit c , der Wellenlänge λ und der Frequenz f , bzw. der Schwingungsdauer T über³⁸

$$c = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T} \quad (10)$$

ergibt sich die Phasengeschwindigkeit c aus Gleichung (9) auch zu

$$c = \frac{g}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi} \quad \text{für } d \geq \frac{\lambda}{2}. \quad (11)$$

Die vorherige Gleichung gilt allerdings nur für den Bereich des Tiefwassers, d.h. dass die Wassertiefe d größer oder gleich der halben Wellenlänge λ , also $d \geq \frac{\lambda}{2}$ ist.

Allgemeiner gilt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c einer Wasserwelle die klassische Dispersionsrelation nach Airy-Laplace, welche zudem den Einfluss der Wassertiefe d auf die Dispersion berücksichtigt:³⁹

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}. \quad (12)$$

Wird die Welle im Tiefwasser, d.h. $d \geq \frac{\lambda}{2}$, betrachtet, so nähert sich $\tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)$ dem Wert 1 und es ergibt sich die Gleichung (11) bzw. (9).

Im Bereich der begrenzten Wassertiefe, d.h. $d \leq \frac{\lambda}{2}$, gilt die vollständige Dispersionsgleichung (12).⁴⁰

Im Flachwasserbereich mit $d \leq 0,05 \lambda$ gilt nachfolgende Näherung:⁴¹
Für x -Werte nahe bei Null gilt $\tanh(x) \approx x$, d.h. in diesem Falle

$$\tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \approx \frac{2\pi d}{\lambda} \quad \text{für } d \leq 0,05 \lambda \quad (13)$$

³⁷ Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 199.

³⁸ Fischer, T. und Dorn, H.-J.: *Physikalische Formeln und Daten*, S. 25.

³⁹ <http://encyclopedie-de.snyke.com/articles/wasserwelle.html>.

⁴⁰ http://www.calsky.com/lexikon/de/txt/d/di/dispersion__wasserwellen_.php.

⁴¹ <http://encyclopedie-de.snyke.com/articles/wasserwelle.html>.

und damit vereinfacht sich Gleichung (12) zu:

$$c = \sqrt{gd} . \quad (14)$$

Für die kinetische Energie im Tal einer Welle, welche mit der Phasengeschwindigkeit c auf ein Ufer aufläuft, kann nach Einsetzen der Gleichungen (14) und (6) in die Teilformel $E_{k,2} = \frac{1}{2}M(c + v)^2$ aus Gleichung (5) zusammenfassend folgende Energie angegeben werden:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}M(c + v)^2 = \frac{1}{2}M\left(\sqrt{gd} + \frac{gA}{\sqrt{gd}}\right)^2 = \frac{1}{2}M\left(\frac{gd+gA}{\sqrt{gd}}\right)^2$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2}M\frac{g}{d}(d + A)^2 . \quad (15)$$

Die Behandlung der kinetischen Energie von Meereswellen im Schulunterricht bietet sich maximal bis zu diesem Punkt an.

Alle bis hier verwendeten Begriffe der Wellentheorie und der Energien werden auch in der Oberstufe eingeführt und besprochen. Lediglich die zuletzt erwähnte Dispersionsrelation nach Airy-Laplace wird in der Schule nicht behandelt, sodass ein Ausstieg aus der Theorie auch bereits nach Gleichung (11) sinnvoll ist.

Eine tiefgehende Auseinandersetzung mit der Wellentheorie, wie sie im Folgenden durchgeführt wird, ist in der Schule nur bedingt oder gar nicht möglich.

Neben den Schwerewellen, welche bei Meereswellen den bestimmenden Anteil ausmachen, gibt es aber auch die sogenannten Kapillarwellen, welche aufgrund der Oberflächenspannung von Wasser entstehen und insbesondere bei sehr kurzen Wellen eine Rolle spielen. Diese lassen sich wie folgt betrachten:⁴²

Ist die Wasseroberfläche nicht eben, sondern gekräuselt, so wurde neben Hubarbeit auch Arbeit an der Oberfläche vollbracht. Es entsteht der so genannte Kapillardruck p_{Kap} :

$$p_{Kap} = \frac{\sigma}{r} . \quad (16)$$

Hierbei ist σ die spezifische Oberflächenspannung und r der Krümmungsradius der Oberfläche, welcher sich bei kleiner Amplitude durch

$$r = \left(\frac{d^2y(x)}{dx^2}\right)^{-1} = \left(-4h\pi^2\lambda^{-2} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)\right)^{-1} \quad (17)$$

⁴² Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 199.

berechnen lässt, wenn die Oberflächenform durch

$$y(x) = h \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (18)$$

näherungsweise beschrieben wird.

Am höchsten Punkt der Welle, d.h. bei $y(x) = h$ bzw. $\sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = 1$, ergibt sich aus Gleichung (16) ein maximaler Kapillardruck von

$$p_{Kap} = \sigma \frac{4\pi^2}{\lambda^2} h . \quad (19)$$

Schreibt man Gleichung (9) so um, dass der Schweredruck $p_{Schwere} = g\rho h$ eine einfließende Größe ist und ersetzt diesen durch den Kapillardruck, so erhält man für die Geschwindigkeit c_{Kap} der Kapillarwellen

$$c = \sqrt{\frac{p_{Schwere}\lambda}{2\pi\rho h}} \quad \Rightarrow \quad c_{Kap} = \sqrt{\frac{p_{Kap}\lambda}{2\pi\rho h}} . \quad (20)$$

Hierbei ist ρ die Dichte des Wassers, welche über $p = \frac{F}{A} = \frac{Mg}{A} = \frac{\rho \tilde{A}hg}{A} = g\rho h$ mit dem Druck p zusammenhängt, wobei M die Masse des Wassers und \tilde{A} die Fläche ist, auf die der Druck p wirkt.⁴³

Durch Einsetzen von (19) erhält man für die Phasengeschwindigkeit c_{Kap} der Kapillarwellen

$$c_{Kap} = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}} . \quad (21)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_{Kap} von Kapillarwellen hängt wie in der obigen Gleichung zu erkennen antiproportional von der Wellenlänge λ ab, d.h. sie hat anomale Dispersion.

Wird die Wellenlänge λ größer, so werden aus Kapillarwellen Schwerewellen. Berechnet werden kann die Wellenlänge des Übergangs durch das Gleichsetzen der beiden Dispersionskurven $c_{Schwere}$ und c_{Kap} .⁴⁴

$$c_{Schwere} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}} = c_{Kap} . \quad (22)$$

Für die kleinste auftretende Wellenlänge λ_{min} ergibt sich durch umstellen der obigen Gleichung folgender Wert:

$$\lambda_{min} = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} . \quad (23)$$

⁴³ Erbrecht, R. u.a.: *Das Große Tafelwerk interaktiv – Formelsammlung für die Sek. I und II*, Seite 97.

⁴⁴ Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 199.

Die kleinste Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche bei Wasserwellen auftreten kann, ergibt sich nach Gleichung (9) zu:

$$c_{min} = \sqrt{\frac{g2\lambda}{2\pi}} = \sqrt{2} \sqrt[4]{\frac{g\sigma}{\rho}}. \quad (24)$$

Der Faktor 2 bzw. $\sqrt{2}$ ergibt sich aus einer Korrektur im Verlauf der Dispersionskurven.

Betrachtet man die für Wasser typische Oberflächenspannung von $\sigma = 0,07 \text{ Nm}^{-1}$, so ergibt sich als kleinstmögliche Wellenlänge $\lambda_{min} = 0,0172 \text{ m}$ und für die geringstmögliche Phasengeschwindigkeit $c_{min} = 0,23 \text{ ms}^{-1}$.⁴⁵

Mit diesen Kenntnissen zu Wellenlänge und Phasengeschwindigkeit kann nun abschließend die kinetische Energie und Leistung einer Wasserwelle betrachtet werden:

Hierzu ist zunächst eine Betrachtung der Wassermasse nötig. Diese ist über den gesamten Wellenquerschnitt gleichmäßig verteilt. Dabei liegt der Mittelwert y_s , um den die gesamte Masse M des Wassers angehoben bzw. abgesenkt wird, zwischen Null und der maximalen Amplitude A . Der Gesamtabstand zwischen den Schwerpunkten eines Wellenberges und eines Wellentales beträgt dann $\Delta y = 2y_s$.



Abb. 10: Wellenquerschnitt mit den Abständen y_s der Schwerpunkte der beiden halbkreisförmigen Wellenhälften.
[Quelle: http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/wellen_w.htm]

Dieser Schwerpunkt y_s einer halbkreisförmigen Wellenwalze berechnet sich mit $y = r \sin \varphi$, der Integration über den Winkel φ von Null bis π und der Integration über den Radius r von Null bis zur Amplitude A zu:⁴⁶

$$y_s = \frac{2}{\pi A^2} \int_0^A \int_0^\pi r^2 \sin \varphi \, d\varphi \, dr = \frac{4R}{3\pi}. \quad (25)$$

Die Masse M des halbkreisförmigen Wellenberges mit der Amplitude A , der Breite l und dem Volumen V berechnet sich mit⁴⁷

$$M = \rho \cdot V = \rho \frac{1}{2} \pi A^2 l. \quad (26)$$

Setzt man dieses in Gleichung (15) für die Masse M des Wassers ein, so ergibt sich für die kinetische Energie E_{kin} einer Meereswelle beim Auflaufen auf das Ufer, d.h. im

⁴⁵ Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 199.

⁴⁶ http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/wellen_w.htm.

⁴⁷ Erbrecht, R. u.a.: *Das Große Tafelwerk interaktiv – Formelsammlung für die Sek. I und II*, S. 28 u. 97.

Flachwasserbereich mit $d \leq 0,05 \lambda$, folgende abschließende Formel:

$$E_{kin} = \frac{1}{4} \rho \pi A^2 \frac{g \cdot l}{d} (d + A)^2 . \quad (27)$$

Für die Leistung P einer Schwerewelle mit Bahngeschwindigkeit $v = \frac{y_s}{T}$ der Wasserteilchen gilt mit Einsetzen der obigen Werte nachfolgende Formel:⁴⁸

$$P = F \cdot v = mg \frac{y_s}{T} = \frac{2}{3} \rho g l A^3 f . \quad (28)$$

Hierbei ist $f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}$ die Frequenz der Welle in Hertz, welche mit Gleichung (9) zu

$$f = \frac{\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}}{\lambda} = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}} \quad (29)$$

umgeschrieben und in Gleichung (28) ersetzt werden kann. Für die Leistung einer Schwerewelle ergibt sich dann:

$$P = \frac{2}{3\sqrt{2\pi}} \rho l A^3 \sqrt{\frac{g^3}{\lambda}} . \quad (30)$$

Fasst man alle konstanten Größen, darunter die Dichte ρ und die Gravitationskonstante g , zu einem Proportionalitätsfaktor zusammen, so ergibt sich folgende Leistung P pro Meter Wellenfront und Jahr:⁴⁹

$$P = 71,586 \cdot A^3 \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \text{ kWh } a^{-1} m^{-1} . \quad (31)$$

Mit den für die deutsche Nordseeküste typischen Werten⁵⁰ von etwa $A = 0,75$ m und $\lambda = 60$ m ergibt sich folgende Leistung pro Meter Wellenfront und Jahr:

$$P = 4,27 \text{ kWh } a^{-1} m^{-1} . \quad (32)$$

Das heute weltweit nachhaltig nutzbare Leistungspotential der Wellenenergie wird auf insgesamt 1700 TWh pro Jahr geschätzt.⁵¹

2.4 Tidenenergie

Zum Abschluss des Kapitels 2 zur Energie von Meereswellen sollen im Folgenden kurz die physikalischen Grundlagen der Entstehung von Ebbe und Flut, der sogenannten Tide, und deren Energie behandelt werden.

Wie im Kapitel 2.2 bereits beschrieben, versteht man unter den Gezeiten das Heben und Senken des Meeres unter dem Einfluss der Gravitation von Mond und Sonne.

⁴⁸ Fischer, T. und Dorn, H.-J.: *Physikalische Formeln und Daten*, S. 8.

⁴⁹ http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/wellen_w.htm.

⁵⁰ Fricke, J. und Borst, W.L.: *Energie aus dem Meer*, S. 85.

⁵¹ Ruprecht, A.: *Strom aus dem Meer*, S. 74.

Die Flut tritt immer sowohl auf der dem Himmelsgestirn zugewandten, als auch auf der dem Gestirn abgewandten Seite der Erde auf. Da die Rotationsperiode des Mondes um die Erde etwa 24 Stunden und 50 Minuten beträgt, können Ebbe und Flut jeweils zweimal an einem Tag auftreten.

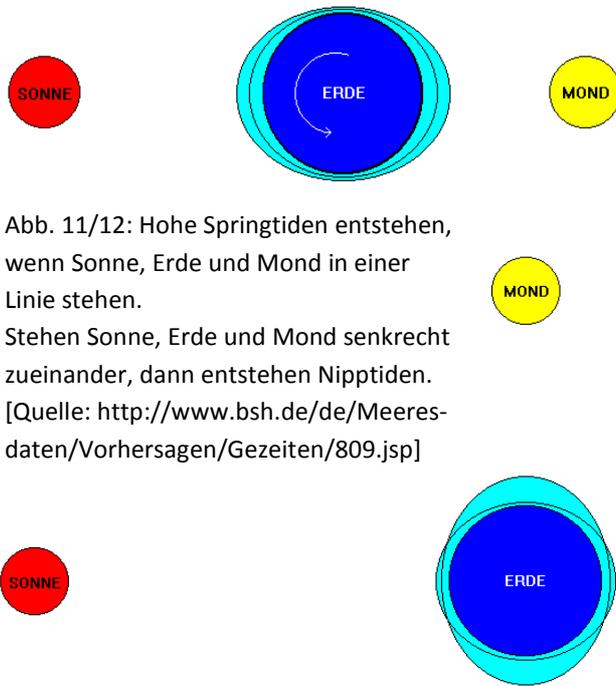


Abb. 11/12: Hohe Springtiden entstehen, wenn Sonne, Erde und Mond in einer Linie stehen.

Stehen Sonne, Erde und Mond senkrecht zueinander, dann entstehen Nipptiden.

[Quelle: <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Vorhersagen/Gezeiten/809.jsp>]

Die Periodendauer der Erde um die Sonne beträgt bekanntlich 24 Stunden, was aufgrund der Zeitdifferenz der beiden Perioden dazu führt, dass sich die beiden gezeitenerzeugenden Kräfte von Sonne und Mond überlagern oder auch senkrecht zueinander stehen können.

Wirken die beiden Himmelskörper in einer Linie, so entsteht eine größer ausfallende Springtide. Stehen die Gestirne senkrecht aufeinander, so bezeichnet man die schwächer ausfallenden Gezeiten als Nipptiden.⁵²

Die Gravitation des Mondes hat einen etwa doppelt so großen Einfluss wie die Gravitationswirkung der Sonne.⁵³ Aus diesem Grund soll in der nachfolgenden Betrachtung von Ebbe und Flut nur der Einfluss des Mondes behandelt werden.

Zur Betrachtung der Entstehung von Ebbe und Flut auf Grund der Gravitationskraft des Mondes stelle man sich zur Vereinfachung des Systems die Erdoberfläche vollständig mit Wasser gefüllt und die Erde ruhend relativ zum Mond vor.⁵⁴

Betrachtet werden nun zunächst die Gravitationskräfte F_1^W und F_2^W zwischen dem Wasser mit der Masse m_W und der Erde in den Punkten P_1 und P_2 auf der Erdoberfläche.

Allgemein gilt:

$$F^W = -\gamma \frac{m_E \cdot m_W}{R^2}, \quad (33)$$

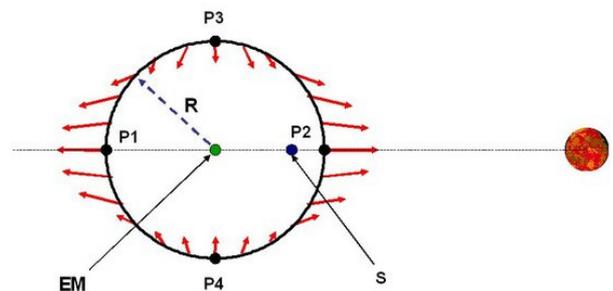


Abb. 13: Das Erde-Mond-Systems mit Schwerpunkt S.

[Quelle: <http://www.weltderphysik.de/de/5252.php>]

⁵² Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 76.

⁵³ Fricke, J. und Borst, W.L.: *Energie aus dem Meer*, S. 87.

⁵⁴ http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm.

wobei hier $R = 6,378 \cdot 10^6 \text{ m}$ der Erdradius, $m_E = 5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ die Masse der Erde und $\gamma = 6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ die Gravitationskonstante ist.⁵⁵

Betrachtet man das Gleichgewicht zwischen diesen beiden Punkten, so muss die Summe der beiden Kräfte F_1^W und F_2^W gleich Null sein. Es gilt also:

$$\sum_{i=1}^2 F_i^W = F_1^W + F_2^W = 0 \quad \Leftrightarrow \quad F_1^W = -F_2^W . \quad (34)$$

Division der Gleichung (33) durch die Masse des Wassers liefert:

$$\frac{1}{m_W} F_1^W = -\gamma \frac{m_E}{R^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{m_W} F_2^W = \gamma \frac{m_E}{R^2} . \quad (35)$$

Ebenso kann das System zwischen Erde und Mond mit deren Gravitationskräften betrachtet werden. Hier gilt ebenfalls für den Gleichgewichtszustand:

$$\sum_{i=1}^2 F_i^E = F_1^E + F_2^E = 0 \quad \Leftrightarrow \quad F_1^E = -F_2^E , \quad (36)$$

wobei nun

$$F_i^E = (-1)^i \gamma \frac{m_E m_M}{d^2} , \quad i = 1, 2 \quad (37)$$

die Gravitationskraft zwischen Erde und Mond im Punkt P_i , m_M die Masse des Mondes und d der Abstand Erde-Mond ist.

In diesem Fall lässt sich ebenfalls nach Division durch die Masse der Erde zeigen, dass:

$$\frac{1}{m_E} F_1^E = -\gamma \frac{m_M}{d^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{m_E} F_2^E = \gamma \frac{m_M}{d^2} \quad (38)$$

Zwar wird in diesem Fall nicht berücksichtigt, dass sich Erde und Mond zusätzlich um den gemeinsamen Schwerpunkt S drehen, der nicht in der Mitte zwischen den beiden Gestirnen liegt, dieses kann aber für die grundlegende Betrachtung zunächst vernachlässigt werden.

Durch die Anhebung der Wassermassen in P_1 und P_2 um die Strecke δ werden die entsprechenden Gleichgewichte gestört. Mit der Gleichung $F = m \cdot a$ ergibt sich für den Beschleunigungszuwachs Δa_i^W für die Wassermasse an der Stelle P_i :⁵⁶

$$\Delta a_i^W = \gamma m_E \left(\frac{-1}{(R+\delta)^2} + \frac{1}{R^2} \right) . \quad (39)$$

Ebenso ändert sich die Beschleunigung Δa_i^E für die Punkte P_1 und P_2 im Erde-Mon-System um:

$$\Delta a_i^E = \gamma m_M \left(\frac{-1}{(d+(-1)^{i+1} (R+\delta))^2} + \frac{1}{d^2} \right) , \quad i = 1, 2 . \quad (40)$$

⁵⁵ Fischer, T. und Dorn, H.-J.: *Physikalische Formeln und Daten*, S. 1 und S. 45.

⁵⁶ http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm.

Mit der Berücksichtigung, dass der Radius R der Erde bedeutend größer als der Tidenhub δ , aber dennoch wesentlich kleiner als der Abstand d der Erde zur Sonne, d.h. $\delta \ll R \ll d$ ist, lassen sich die Gleichungen (39) und (40) vereinfachen zu:⁵⁷

$$\Delta a_i^W \approx \gamma m_E \frac{2\delta}{R^3} \quad \text{bzw.} \quad \Delta a_i^E = (-1)^{i+1} \gamma m_M \frac{2R}{d^3}, \quad i = 1, 2. \quad (41)$$

Dieser Zustand soll ebenfalls im Gleichgewicht sein, d.h. es muss gelten:

$$\Delta a_i^W + \Delta a_i^E = \gamma m_E \frac{2\delta}{R^3} + (-1)^{i+1} \gamma m_M \frac{2R}{d^3} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (42)$$

Daraus folgt für den Tidenhub δ :

$$\delta = \pm \frac{m_M R^4}{m_E d^3}. \quad (43)$$

Mit den Werten für die Masse des Mondes $m_M = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$, die Masse der Erde $m_E = 5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, den Radius der Erde $R = 6,378 \cdot 10^6 \text{ m}$ und den Abstand Erde-Mond $d = 3,844 \cdot 10^8 \text{ m}$ ergibt sich für den Tidenhub δ :⁵⁸

$$\delta = \pm 0,358 \text{ m}. \quad (44)$$

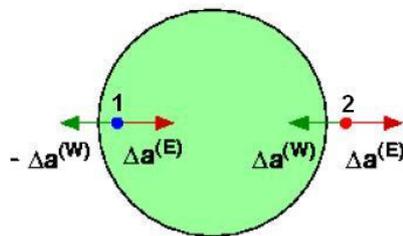


Abb. 14: Die aus der Gravitation resultierende Anhebung bzw. Absenkung.
[Veränderte Quelle: http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm]

Dieses bedeutet, dass aus den Gravitationskräften im Punkt P_2 eine Anhebung des Meeresspiegels um etwa 36 cm und im Punkt P_1 eine Absenkung um den selben Wert ergeben würde. Dieses ist in der nebenstehenden Grafik verdeutlicht.

Allerdings widerspricht dieses den allgemeinen Beobachtungen, dass sich in beiden Punkten P_1 und P_2 der Meeresspiegel hebt und nur in P_3 und P_4 abgesenkt wird (vgl. Abb. 13).

Korrigiert werden kann dieses Ergebnis durch die genauere Betrachtung des Erde-Mond-Systems. Dieses dreht sich ebenfalls im Raum und zwar um den gemeinsamen Schwerpunkt S (siehe Abb. rechts), der sich im Abstand r_S vom Erdmittelpunkt befindet. Dieser Schwerpunkt hat den Abstand $r_S = 0,73 R = 6,656 \cdot 10^6 \text{ m}$ vom Erdmittelpunkt.⁵⁹

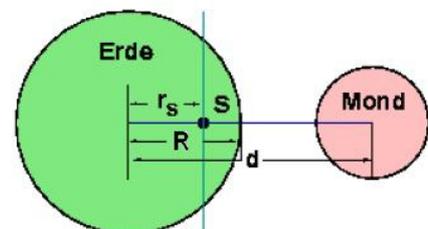


Abb. 15: Das Erde-Mond-Systems mit Schwerpunkt S .
[Veränderte Quelle: http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm]

⁵⁷ http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm.

⁵⁸ Erbrecht, R. u.a.: *Das Große Tafelwerk interaktiv – Formelsammlung für die Sek. I und II*, S. 84.

⁵⁹ Pfeifer, H. u.a.: *Kompaktkurs Physik*, S. 36.

Die Winkelgeschwindigkeit dieser Drehung beträgt $\omega = 2,66 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, sodass sich folgender zentrifugaler Gravitationsbeitrag $a_{i,z}$ für den Punkt P_i ergibt:⁶⁰

$$a_{i,z}^E = (-1)^{i+1} (R + (-1)^{i+1} r_S) \omega^2, \quad i = 1, 2. \quad (45)$$

Zugleich wird durch den Mond der Gravitationsbeitrag $a_{i,M}^E$ erbracht, der sich unter Berücksichtigung der Lage der Punkte P_1 und P_2 ergibt zu:

$$a_{i,M}^E = -\gamma \frac{m_M}{(d + (-1)^{i+1} R)^2}, \quad i = 1, 2. \quad (46)$$

Setzt man alle oben angegebenen Werte für die Masse des Mondes, die Abstände und die Gravitationskonstante ein, so ergeben sich die Gesamt-Beschleunigungen a_1^E und a_2^E in den Punkten P_1 und P_2 zu:

$$a_1^E = a_{1,z}^E + a_{1,M}^E = (R + r_S) \omega^2 - \gamma \frac{m_M}{(d+R)^2} = 4,596 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-2}, \quad (47)$$

$$a_2^E = a_{2,z}^E + a_{2,M}^E = -(R - r_S) \omega^2 - \gamma \frac{m_M}{(d-R)^2} = -4,65 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-2}. \quad (48)$$

Würde man nur die eigentliche Gravitation des Mondes berücksichtigen, wie es zu Beginn der Gezeitenbetrachtung getan wurde, so ergäbe sich nach Gleichung (46) ein Wert von:

$$a_{1,M}^E = 3,212 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-2} \quad \text{bzw.} \quad a_{2,M}^E = -3,432 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-2}. \quad (49)$$

Wie hier bereits zu erkennen ist, haben die Beschleunigungen unterschiedliche Vorzeichen. Dieses hat zur Folge, dass sich an beiden Stellen, d.h. sowohl der dem Mond zugewandten, als auch der dem Mond abgewandten Seite, jeweils Anhebungen des Meeresspiegels ergeben, wie es in der Natur zu beobachten ist.

Aber auch eine weitere Folgerung ist zu beachten. Als Quotient der Beschleunigungen ergibt sich:

$$\frac{a_1^E}{a_{1,M}^E} = 1,431 \quad \text{bzw.} \quad \frac{a_2^E}{a_{2,M}^E} = 1,355. \quad (50)$$

Die Werte für die Gesamtbeschleunigung a_1^E und a_2^E an den Stellen P_1 und P_2 liegen demnach etwa um den Faktor 1,4 über der Beschleunigung durch den Mond.

Dieses hat zur Folge, dass sich durch die Gleichungen (42) und (43) auch der Tidenhub δ um den Faktor 1,4 erhöht.⁶¹ Die Anhebung des Wasserspiegels beträgt demnach:

$$\delta = 0,5 \text{ m}. \quad (51)$$

⁶⁰ http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm.

⁶¹ Ebd.

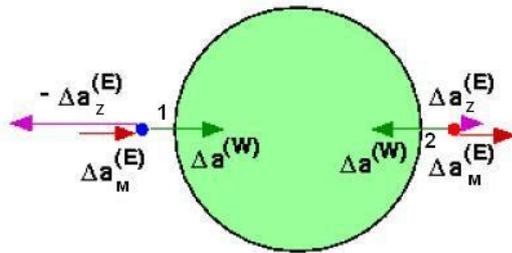


Abb. 16: Die Beschleunigungen von Mond, Erde und Rotation um den Schwerpunkt.
[Veränderte Quelle: http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm]

Aus diesen Werten ist zu erkennen, dass der Anstieg des Meeresspiegels etwa 50 cm beträgt. Dieser fällt auf der dem Mond zugewandten Seite, d.h. Position P₂, stärker aus und es entstehen wie bereits erwähnt sowohl auf der dem Mond zugewandten, als auch auf der dem Mond abgewandten Seite Flutberge. Die gesamten Beschleunigungen sind auch in der nebenstehenden Grafik nochmals verdeutlicht.

Dieses ist aber nur der unter vereinfachten theoretischen Annahmen berechnete Wert. Allein die Annahme, die Erde bestehe vollständig aus Wasser, und die Vernachlässigung der Gravitation der Sonne beeinflussen den Theoriewert stark.

Der eigentlich beobachtete Tidenhub beträgt auf dem offenen Meer ca. 1 m. Bei Springfluten und Überlagerungs- bzw. Trichtereffekten bei geeigneten Küstenformationen können Tidenhube von bis zu 20 Metern beobachtet werden.⁶²

Die nun zu betrachtende potentielle Energie der Gezeiten hängt zum einen vom eben erwähnten Tidenhub ab: Ist dieser größer, so auch die potentielle Energie. Zum anderen hängt die Energie aber auch von der Masse, besser gesagt dem Volumen des Wassers ab. Je größer das gespeicherte Volumen, desto größer die gespeicherte Energie.

Für die Energie, welche durch die in einem Bassin befindlichen Wassermassen in einem Gezeitenkraftwerk gespeichert werden kann, gilt folgende grundlegende Formel:⁶³

$$W = mgh . \tag{52}$$

Hierbei ist m die Masse des Wassers, g die Erdbeschleunigung und h die Höhe des über dem normalen Wasserspiegel gefüllten Depots.

Die Masse des Wassers kann über die Dichte ρ und das Volumen V bestimmt werden, wobei sich das Volumen aus dem Produkt von Wasseroberfläche A und Höhe h ergibt:⁶⁴

$$W = \rho Vgh = \rho Agh^2 . \tag{53}$$

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass sich nicht die gesamte Masse m des Wassers in der Höhe h befindet, sondern im Mittel nur in einer Höhe $\frac{h}{2}$. Die maximale Füllhöhe h des Bassins ist gerade die des Tidenhubs δ . Es gilt demnach insgesamt:

$$W = \rho g A \frac{\delta^2}{2} . \tag{54}$$

⁶² Fricke, J. und Borst, W.L.: *Energie aus dem Meer*, S. 87.

⁶³ Fischer, T. und Dorn, H.-J.: *Physikalische Formeln und Daten*, S. 8.

⁶⁴ Erbrecht, R. u.a.: *Das Große Tafelwerk interaktiv – Formelsammlung für die Sek. I und II*, S. 97.

Wird ein Gezeitenkraftwerk effektiv genutzt, d.h. kann es sowohl den Wasserzufluss bei Auflaufen der Flut, als auch den Abfluss beim Übergang zur Ebbe nutzen, so bedeutet dies eine Periodendauer von etwa 6 Stunden und 10 Minuten, d.h. $T = 22.200 \text{ s}$.

Damit ergibt sich mit $\rho \approx 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ eine mittlere Leistung von

$$P = \frac{W}{T} = \frac{\rho g A \delta^2}{2T} = 2,21 \cdot 10^{-4} \text{ W} \quad (55)$$

pro Quadratmeter Wasserfläche und einem Tidenhub von $\delta = 1 \text{ m}$, die mit einem Wirkungsgrad von 0,1 bis 0,2 in elektrische Leistung überführt werden kann.⁶⁵

Das aus heutiger Sicht nachhaltig nutzbare Potential der Tidenenergie, welches sich aus der Gezeitenströmung und der potentiellen Gezeitenenergie zusammensetzt, wird weltweit auf insgesamt 1400 TWh pro Jahr geschätzt.⁶⁶

Die Betrachtung der Tidenenergie im Schulunterricht kann und sollte nur in den Grundlagen und nicht, wie hier beschrieben, ausführlicher erfolgen.

Zwar ist eine Beschreibung der Gravitationskraft des Mondes mit Gleichung (33) und die anschließende Betrachtung des Kräftegleichgewichts auch in der Schule möglich, aber die darauf folgende genauere Untersuchung des Tidenhubs mit vielen Fall- und Positionsunterscheidungen ist relativ anspruchsvoll.

⁶⁵ http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm.

⁶⁶ Ruprecht, A.: *Strom aus dem Meer*, S. 73

3) Nutzung der Wellenenergie

Die Nutzung der Wellenenergie ist auf verschiedene Art und Weise möglich. Je nach Energieform bieten sich verschiedene Möglichkeiten an:⁶⁷

- Für die potentielle Energie kann zum einen die Veränderung des Profils der Meeresoberfläche ausgenutzt werden, die durch das Vorbeilaufen einer Welle über tiefem Wasser entsteht.
Zum andern kann über die potentielle Energie der Meereswellen die Druckschwankung unter der Wasseroberfläche beim Vorbeilaufen einer Welle ausgenutzt werden.
- Im Bereich der kinetischen Energie bietet sich auf der einen Seite die Nutzung der Wellenlaufbewegung und die orbitale, d.h. senkrechte Bewegung der Wasserteilchen an.
Auf der anderen Seite steht die Bewegung der Wasserteilchen in Laufrichtung der Wellen. Diese Longitudinalbewegung ist insbesondere in flachen Bereichen von Bedeutung.

Zudem kann bei Wellenkraftwerken zwischen Offshore-, Near-Shore- oder Shoreline-Anlagen unterschieden werden.⁶⁸ Letztere werden direkt in die Küstenlinie integriert. Offshore-Anlagen sind für den Einsatz auf offener See gebaut und Near-Shore-Anlagen werden im Flachwasserbereich in Küstennähe eingesetzt.

Im Folgenden sollen nun verschiedene Möglichkeiten der Nutzung von Wellenenergie beschrieben werden. Neben den unten aufgeführten Kraftwerkstypen gibt es noch zahlreiche andere oder auch ähnlich arbeitende Wellenkraftwerke. Daher ist dies nur eine Auswahl der bekanntesten, effektivsten und physikalisch interessantesten Anlagen.

Nachfolgend werden diverse Kraftwerksarten erläutert und deren Funktionsweisen beschrieben. Auch die Einsatzgebiete, sowie Vor- und Nachteile solcher Anlagen werden angesprochen. Abschließend wird die Behandlung der Wellenkraftwerke für den Unterricht thematisiert.

3.1 Anlagen an Küstenlinien

Die im Englischen mit Shoreline-Devices bezeichneten Küstenanlagen werden direkt an der Meeresküste installiert und nutzen die Energie der auf das Ufer auflaufenden Wellen.

Nachfolgend werden nun Anlagen für diesen Einsatzbereich benannt und deren Funktionsweise und Aufbau beschrieben.

⁶⁷ Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 72.

⁶⁸ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 13 ff.

3.1.1 Gezeitenkraftwerke

Als erster Gedanke zur Energiegewinnung aus dem Meer an der Küste kommt die Nutzung der Gezeiten, d.h. Ebbe und Flut.

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, beträgt der durchschnittliche Tidenhub, verursacht durch die Gravitation des Mondes, auf dem offenen Meer etwa einen Meter. An Küsten mit unterschiedlichen Formen und geologischen Gegebenheiten kann allerdings der Tidenhub auch bis zu 20 m betragen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, Gezeitenkraftwerke direkt an der Küste und nicht auf dem offenen Meer zu installieren. Für eine optimale Nutzung der Gezeiten sollte der mittlere Tidenhub fünf Meter oder mehr betragen.⁶⁹

Aufbau:

Gezeitenkraftwerke nutzen primär die potentielle Energie zwischen den Wassermassen bei Ebbe und Flut aus. Demzufolge muss ein Gezeitenkraftwerk eine Möglichkeit haben, die potentielle Energie, welche die Flut mit sich bringt, zu speichern. Dieses kann mit einem Bassin erfolgen, welches bei Flut gefüllt und bei Ebbe entleert wird. Eine schematische Zeichnung eines solchen Kraftwerks zeigt die Abbildung 17.

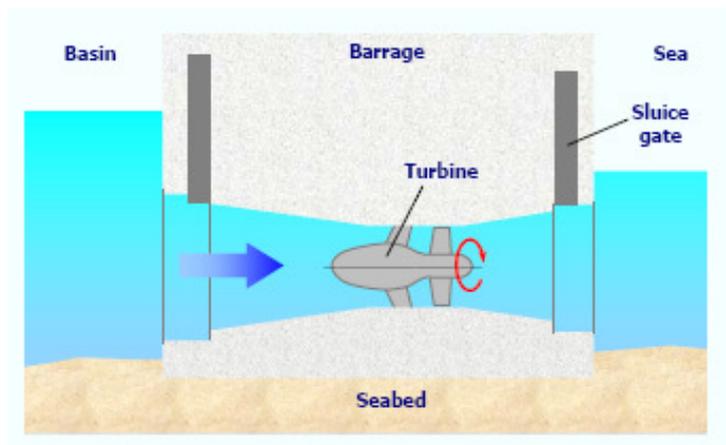


Abb. 17: Ein Gezeitenkraftwerk besteht aus einem Bassin, welches durch Schleusen und eine Turbine vom Meer getrennt ist.

[Quelle: http://www.thew2o.net/events/oceanenergy/images/wave_energy.pdf]

Funktionsweise:

Schleusen an den Eingängen des Reservoirs regeln das Ein- und Ausströmen der Wassermassen. Bei Flut sind die Schleusen geöffnet, damit Wasser vom Meer in das Bassin laufen kann. Während des Sinkens des Meeresspiegels bleiben die Tore geschlossen, bis der maximale Höhenunterschied zwischen Bassin und Meeresoberfläche bei Ebbe erreicht ist.

Der Ausgleich der potentiellen Energieunterschiede zwischen Bassin und Meer erfolgt durch das Abfließen der Wassermassen nach Öffnen der Schotts. In diese Strömung wird eine Turbine installiert, die ähnlich wie bei Staudämmen, durch die abfließenden Wassermassen angetrieben wird und die kinetische Energie in elektrische umwandelt.

Neben der Möglichkeit zur Nutzung von sowohl abfließendem Wasser bei Ebbe, als auch einfließendem Wasser bei Flut, gibt es auch Gezeitenkraftwerke, die mit mehreren Reservoirs, verschiedenen Turbinen und Speicherpumpen arbeiten und so den

⁶⁹ Gaede, P.-M. u.a.: *GEO Themenlexikon in 20 Bänden*, Band 6, S. 361.

Wirkungsgrad erhöhen oder die Energiegewinnung an Spitzenzeiten anpassen können. Insgesamt kann so ein Wirkungsgrad von bis zu 92 % erreicht werden.⁷⁰

Eines der bekanntesten Gezeitenkraftwerke ist das La Rance bei St. Malo in der Bretagne mit einer Leistung von 240 MW, welches zwischen 1961 und 1967 erbaut und als Prototyp für eine größere Anlage in der angrenzenden Bucht bei Iles de Chaussey mit einer Spitzenleistung von 15 GW gedacht war.⁷¹

Vorteile:

- Hoher Wirkungsgrad
- In vielen Variationen und Größen einsetzbar
- Integrierter Küstenschutz
- Kurze Anbindungswege an das örtliche Stromnetz

Nachteile:

- Veränderung der natürlichen Meeresströmung
- Versandung des Bassins⁷²
- Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten an der Küste
- Gezeitenabhängige Schwankungen in der Energielieferung bei einfachen Kraftwerken ohne Speicherpumpen
- Schwerer Eingriff in die Natur, d.h. Bau von Beton-Anlagen, evtl. Uferangleichungen und die Notwendigkeit eines Staubeckens im Hinterland⁷³
- Optische Beeinträchtigung der Küstenlandschaft
- Wandlung der Frequenz auf 50 Hz notwendig
- Hohe Investitionskosten und lange Bauzeiten⁷⁴

3.1.2 OWC-Kraftwerke

Die Abkürzung OWC steht für den englischen Ausdruck Oscillating Water Column, also für eine oszillierende, d.h. in der Höhe schwankende Wassersäule.⁷⁵

Dies ist das Prinzip, auf dem die Arbeitsweise eines OWC-Kraftwerks funktioniert. Durch das Heben und Senken der Meeresoberfläche wird in einer Kammer Luft bewegt, welche eine Turbine antreibt.

Wie im Kapitel 2.3.2 der kinetischen Energie beschrieben, wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Meereswelle bei abnehmender Wassertiefe geringer und dadurch die Amplitude größer. Dieses hat zur Folge, dass OWC-Kraftwerke

⁷⁰ Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 78 ff.

⁷¹ Taylor, R.-H.: *Alternative energy sources*, S. 177.

⁷² Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 80 f.

⁷³ ZDF-Dokumentationssendung „Abenteuer Wissen“ vom 07.01.2009.

⁷⁴ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 26.

⁷⁵ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 84.

möglichst direkt an Küsten installiert werden, da hier ein Maximum an Erhebung der Meeresoberfläche erreicht werden kann.

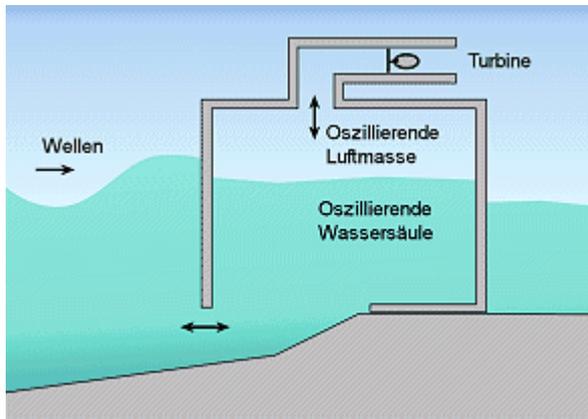


Abb. 18: Beim OWC-Kraftwerk drückt eine steigende Wassersäule Luft durch eine Turbine.
[Quelle: <http://brandlmotor.de/pics/OAS-System.gif>]

Aufbau:

Ein OWC-Kraftwerk besteht im Wesentlichen aus einem großen Hohlraum in einem Betonkonstrukt. Diese große Kammer hat eine Öffnung unterhalb der Wasserlinie in Richtung Meer, durch welche die Wellen einlaufen können. Eine zweite Öffnung mit einer Turbine befindet sich über dem Meeresspiegel und dient zum Druckausgleich mit der Umgebung.⁷⁶

Die nebenstehende Abbildung zeigt eine schematische Darstellung.

Funktionsweise:

Eine durch die untere Öffnung in die Kammer einlaufende Welle hebt im Inneren den Wasserspiegel an und drückt die darüber liegende Luft zusammen. Diese entweicht durch die obere Öffnung und treibt dabei eine Turbine an. Beim Abfließen der Welle wird durch den abnehmenden Druck im Inneren des Hohlraumes Luft durch die obere Öffnung angesaugt, welche erneut die Turbine antreibt.

Bei der in Abbildung 18 gezeigten einfachsten Variante eines OWC-Kraftwerks wird durch die oszillierende Wassersäule beim Einlaufen der Welle ein Luftstrom aus der Kammer und beim Abfließen der Welle ein entgegengesetzter Luftstrom erzeugt.

Dieses hat wechselnde Laufrichtungen der Turbine zur Folge, welches einen Großteil an Energieverlust durch Abbremsung und technische Schwierigkeiten bei der Frequenzumwandlung auf übliche 50 Hz mit sich bringt. Daher gibt es OWC-Kraftwerke, die durch die Verwendung verschiedener Klappventile die Strömungsrichtung der Luft durch die Turbine konstant halten (vgl. Abb. 19).

Diese Möglichkeit zur gleichmäßigen Luftströmung hat sich aber gegenüber der nachfolgenden Variante noch nicht durchgesetzt.⁷⁷

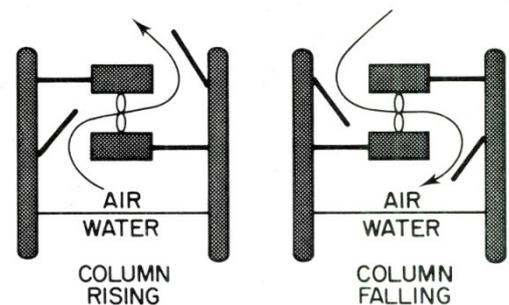


Abb. 19: Alternative Luftführung bei einem OWC-Kraftwerk.
[Quelle: Taylor, R.-H.: *Alternative energy sources*, S. 95]

⁷⁶ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 84.

⁷⁷ Handout „OWC-Wellenbrecher“, S. 2.

Eine weitere Alternative zur Nutzung der Luftströmung in beiden Richtungen bietet die Verwendung einer sogenannten Wells-Turbine, benannt nach ihrem Erfinder Dr. A. Wells von der Queen's Universität Belfast. Diese besteht aus senkrecht zur Luftströmung stehenden Flügeln, deren Profile symmetrisch sind. Sind diese Flügel einmal in Bewegung, behalten sie ihre Bewegungsrichtung unabhängig von der wechselnden Luftströmung bei.⁷⁸

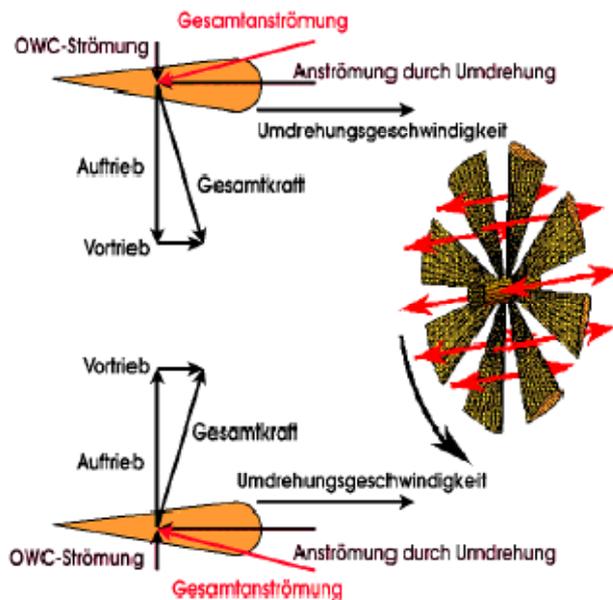


Abb. 20: Eine Wells-Turbine hat auch bei wechselnder OWC-Strömung die selbe Drehrichtung.
[Quelle: Handout „OWC-Wellenbrecher“, S. 2]

Dieses ist durch die aus zwei Komponenten zusammengesetzte Gesamtanströmung auf die Turbine möglich: Zum einen besteht diese aus der Luftströmung des OWC-Kanals und zum anderen aus dem Anströmen der Turbinenflügel, welche von der Umdrehungsgeschwindigkeit abhängt.

Senkrecht auf der resultierenden Gesamtströmung steht die Kraft, welche auf die einzelnen Flügel wirkt. Diese hat einen Anteil in Vortriebsrichtung, welcher auch bei Umkehrung der OWC-Strömung die gleiche Richtung hat. Die nebenstehende Grafik verdeutlicht die Arbeitsweise einer Wells-Turbine.⁷⁹

Aufgrund der besonderen Flügelform hat die Wells-Turbine mit 50 % bis 70 % aber einen deutlich niedrigeren Wirkungsgrad gegenüber herkömmlichen Turbinen, deren Wirkungsgrad bei etwa 90 % liegt.⁸⁰

Bisher erfolgreich eingesetzte europäische OWC-Kraftwerke sind u.a. eine 400-kW-Anlage auf der Azoren-Insel Pico und eine OWC-Anlage auf der Insel Islay vor der schottischen Küste mit zwei 250-kW-Wells-Turbinen.⁸¹

Letztere wird aufgrund des fauchenden Geräusches beim Ein- und Ausströmen der Luft auch „Scottish Dragon“ genannt.⁸²

Weitere Anwendungsmöglichkeiten des OWC-Prinzips finden sich in OWC-Bojen und dem schwimmenden Mighty-Whale-OWC, welche im Kapitel 3.2 beschrieben werden.

⁷⁸ Taylor, R.-H.: *Alternative energy sources*, S. 95.

⁷⁹ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 87.

⁸⁰ Handout „OWC-Wellenbrecher“, S. 2.

⁸¹ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 14 f.

⁸² ZDF-Dokumentationssendung „Abenteuer Wissen“ vom 07.01.2009.

Vorteile:

- Hoher Wirkungsgrad bei Verwendung geeigneter Turbinen und Mechanismen zur Luftführung
- In vielen Variationen und Größen einsetzbar
- Integrierter Küstenschutz
- Kurze Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Schutz der Turbine vor Korrosion durch Salzwasser, da luftbetrieben
- Einfache Installation und Wartung in Zusammenhang mit dem Küstenschutz

Nachteile:

- Meist schwerer Eingriff in die Natur nötig, d.h. Bau von Beton-Anlagen und evtl. Angleichungen des Ufers
- Optische Beeinträchtigung der Küstenlandschaft
- Wandlung der Frequenz auf 50 Hz notwendig
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten entlang der Küstenlinie
- Eingeschränkte Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen und Sturmfluten

3.2 Anlagen vor der Küste

Kraftwerksanlagen, die in unmittelbarer Nähe zur Küste installiert werden, werden im Englischen mit „Near-Shore-Devices“ bezeichnet. Sie sind üblicher Weise bis zu einem Abstand von 500 Metern zu der Küste und einer Wassertiefe von bis zu 30 Metern montiert.⁸³

Im Folgenden werden einige dieser Anlagen beschrieben, sowie ihre Vor- und Nachteile aufgezeigt.

3.2.1 Nickende Ente

Die von S. H. Salter von der University of Edinburgh entwickelte „Nodding duck“ (engl.: Nickende Ente) ist ein schwimmfähiger Widerstandskörper, der um eine horizontale Achse drehbar gelagert ist.⁸⁴ 1973 entwickelt war es eines der ersten Kraftwerke aus dem englischen Wellenenergieprogramm.⁸⁵

Die auch als Schaufelradkraftwerk bekannte Anlage ist als Halbtaucher konzipiert und nutzt die kinetische Energie der Orbitalbewegung von Meereswellen.⁸⁶ Das Einsatzgebiet solcher Kraftwerke ist daher der Raum vor der Küstenlinie mit relativ flachem Wasser.

⁸³ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 16.

⁸⁴ Eckener, U. u.a.: *Systemuntersuchung Technologie und Nutzung der Wellenenergie*, S. 220.

⁸⁵ Taylor, R.-H.: *Alternative energy sources*, S. 80.

⁸⁶ Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 72.

Aufbau:

Das Schaufelkraftwerk besteht aus einem Schwimmkörper, der drehbar an einer Achse befestigt ist. Sowohl an der relativ zum Meeresboden ruhenden Achse, als auch an den Schwimmkörpern sind zahnradartige Erhebungen angebracht, die bei Bewegungen des Schwimmkörpers eine gegenläufige Bewegung ausführen können. In den Räumen zwischen diesen Erhebungen befindet sich ein Arbeitsmedium, d.h. etwa ein Hydraulik-Öl, welches Druck auf einen Speicher oder einen Generator weitergeben kann.⁸⁷

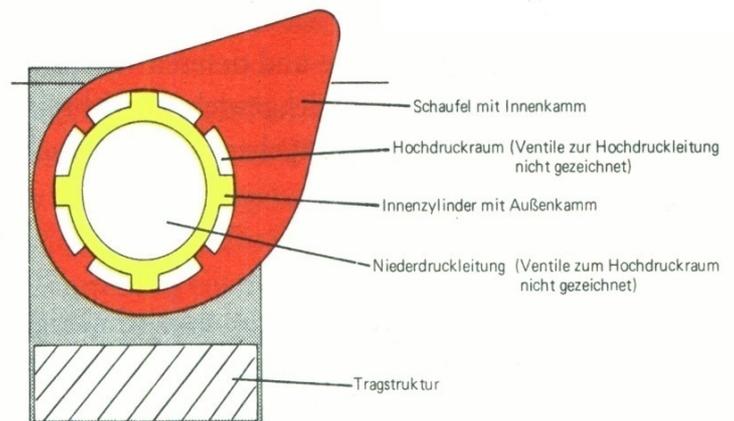


Abb. 21: Ein Schaufelradkraftwerk mit den Hochdruckräumen, in denen durch die Wellenbewegung Öl komprimiert wird.

[Quelle: Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 73.]

Die hier dargestellte Abbildung 21 zeigt den Querschnitt einer „Nodding duck“, deren Schwimmkörper die Form eines Entenkopfes hat.

Funktionsweise:

Durch eine vorbeilaufende Welle wird der Schwimmkörper in eine Rotationsbewegung um die Achse versetzt. Die gegenläufige Bewegung der „Zahnrad“-Erhebungen bewirkt, dass Hydraulik-Öl in den Hochdruckräumen komprimiert wird. Dieses betreibt dann eine Pumpe, welche einen gleichmäßigen Wasserfluss mit hohem Druck erzeugt, mit dem ein Generator betrieben werden kann.⁸⁸

Der Wirkungsgrad einer „Nickenden Ente“ kann bei gleichförmigen Wellen im Resonanzbereich der Anlage bis zu 90 % betragen. Unter sonst üblichen Bedingungen liegt die Effizienz bei etwa 50 %.⁸⁹

Eine bei „Loch Ness“ in Schottland getestete Anlage mit einer Gesamtlänge vom 50 Metern mit 20 einzelnen Schwimmkörpern von jeweils einem Meter Durchmesser ergab eine Leistung von 10 kW. Wird die Anlagengröße vervierfacht, d.h. vier Meter Durchmesser der rotierenden Schwimmkörper und 200 Meter Gesamtlänge, so liegt die Leistung bei 650 kW.⁹⁰

⁸⁷ Eckener, U. u.a.: *Systemuntersuchung Technologie und Nutzung der Wellenenergie*, S. 220 f.

⁸⁸ Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen?*, S. 72.

⁸⁹ Taylor, R.-H.: *Alternative energy sources*, S. 82.

⁹⁰ Eckener, U. u.a.: *Systemuntersuchung Technologie und Nutzung der Wellenenergie*, S. 221.

Vorteile:

- Hoher Wirkungsgrad bei entsprechender Wellenfrequenz
- In vielen Größen und Dimensionen einsetzbar
- Integrierter Küstenschutz durch „Abbremsen“ der Wellen
- Relativ kurze Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Kein Eingriff in die direkt sichtbare Küstenlinie

Nachteile:

- Eingriff in die Bodengegebenheiten im Vorküstenbereich, z.B. Bau von Beton-Anlagen
- Geringe optische Beeinträchtigung der Küstenlandschaft
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten entlang der Küstenlinie
- Eingeschränkte Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen und Sturmfluten
- Gefahr der Umweltverschmutzung durch evtl. austretendes Hydraulik-Öl
- Veränderung der natürlichen Meeresströmung

3.2.2 Wellenroller

Der Wellenroller ist eine Anlage, die auf dem gleichen Prinzip wie die „Nodding duck“ (vgl. Kapitel 3.2.1) basiert. Hier werden allerdings senkrechte Platten anstelle der Schwimmkörper verwendet und die gesamte Anlage befindet sich unter der Wasseroberfläche bei einer Wassertiefe von etwa sieben bis 15 Metern.⁹¹



Abb. 22: Bei einem Wellenroller-Kraftwerk wird die kinetische Energie der Wellen über Platten auf eine Kolbenpumpe übertragen und anschließend ein Generator oder eine Turbine betrieben.

[Quelle: Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 17]

Aufbau:

Beim Wellenroller sind auf der aus Beton bestehenden Grundstruktur bewegliche Metallplatten in senkrechter Position montiert. Diese sind an eine Kolbenpumpe angeschlossen, welche direkt mit einem Generator oder einem Hydraulik-System kombiniert ist.

Mehrere Platten können zu einem großen System kombiniert werden. Das nebenstehende Bild zeigt eine auf dem Meeresboden installierte Anlage.

⁹¹ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 17.

Funktionsweise:

Eine durchlaufende Welle versetzt die Platte in eine schwingende Bewegung, sodass die kinetische Energie der Meereswelle auf die Kolbenpumpe übertragen werden kann. Diese betreibt dann entweder direkt einen Generator oder über ein separates, geschlossenes Hydraulik-System eine Turbine.

Nach Test- und Modellphasen im Labor wurden 2005 die ersten Prototypen im Maßstab 1:3 im europäischen Meeresenergiezentrum in Orkney und in Ecuador in der offenen See getestet.

Die Leistung einer einzelnen Platte liegt bei etwa 13 kW. Ein im Jahr 2007 realisiertes System mit mehreren Platten erreicht eine Leistung von 1 MW.⁹²

Vorteile:

- In vielen Größen und Dimensionen einsetzbar
- Integrierter Küstenschutz durch „Abbremsen“ der Wellen
- Relativ kurze Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Kein Eingriff in die direkt sichtbare Küstenlinie
- Keine optische und akustische Beeinträchtigung an der Küste

Nachteile:

- Eingriff in die Bodengegebenheiten im Vorküstenbereich, z.B. Bau von Beton-Anlagen
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten entlang der Küstenlinie
- Eingeschränkte Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen und Sturmfluten
- Gefahr der Umweltverschmutzung durch evtl. austretendes Hydraulik-Öl
- Veränderung der natürlichen Meeresströmung

3.2.3 Platten-Wellen-Kraftwerk

Eine weitere Möglichkeit zur Energienutzung und zum gleichzeitigen Schutz der Küsten bietet der Einsatz eines sogenannten Platten-Wellen-Kraftwerks. Dieses besteht im Wesentlichen aus einer horizontalen Platte mit darunter angebrachter Turbine.

Der Einsatzort eines solchen Kraftwerks ist der küstennahe Bereich mit einer Wassertiefe von etwa 25 bis 30 Metern. Ausgenutzt zur Energiegewinnung wird hier die pulsierende Strömung der rücklaufenden Wellen. Gegenüber herkömmlichen Wellenbrechern, welche die Energie reflektieren und die Wellen durch Reibung abschwächen, arbeitet dieses Wellenbrecher-Kraftwerk mit der Verminderung der Wellenhöhe.⁹³

⁹² Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 17.

⁹³ http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte_099/59__1999/59_1999_hansa.htm

Aufbau:

Das Platten-Wellen-Kraftwerk besteht aus einer trichterförmigen Plattenkonstruktion, welche die Strömung durch einen kleinen kanalartigen Durchlass führt. In diesem befindet sich eine Turbine. Abgedeckt wird die Konstruktion ebenfalls durch eine Platte. Die Ausmaße betragen etwa 40 Meter in der Breite, 14 Meter in der Tiefe und sieben Meter in der Höhe.

Die Konstruktion ist so ausgelegt, dass sich die horizontale Platte in ca. 25 % der Wassertiefe befindet. Hierdurch entsteht ein wellenbrechender Effekt, wie er bei vergleichbaren Unterwasserwellenbrechern typisch ist.

Diese Konstruktion ist auch als Wellenfilter bekannt, da die Platte Wellen mit einer bestimmten Wellenlänge besonders gut dämpft. Als besonders effektiv hat sich ein Wellenlängen-Plattenlängen-Verhältnis von 1:1 bis 1:3 ergeben, welches somit die obigen Ausmaße für die Nordsee ergibt.⁹⁴

Funktionsweise:

Eine auf das Platten-Wellen-Kraftwerk auflaufende Welle wird gedämpft und trifft danach mit verminderter Energie auf die Küste. Dieses ist auch das Prinzip bei „normalen“ Unterwasserwellenbrechern.

Beim Rücklaufen der Wassermassen allerdings kommt das eigentliche Kraftwerk zum Einsatz: Durch die spezielle Konstruktion werden die Wassermassen direkt durch die Turbine geleitet, welche durch die Strömung angetrieben wird.

Vorteile:

- Integrierter Küstenschutz durch „Verringerung“ der Wellenhöhe und durch Filtern einzelner Wellenlängen.
- Relativ kurze Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Kein Eingriff in die direkt sichtbare Küstenlinie
- Keine optische und akustische Beeinträchtigung an der Küste
- Geringer Verschleiß und guter Widerstand gegen extreme Wellen⁹⁵
- Kaum Beeinträchtigung der Klein-Schiffahrt
- Einfache Bauweise; auch im Trockendock möglich

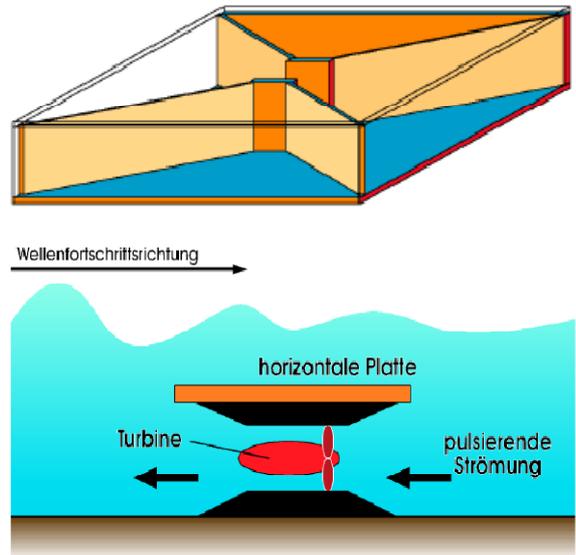


Abb. 23/24: Die Bauweise eines Platten-Wellen-Kraftwerks besteht aus einer horizontalen und mehreren senkrechten Platten, welche die Küste schützen und zugleich die Meeresströmung durch eine Turbine leiten. [Quelle: http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte_099/59__1999/59_1999_hansa.htm]

⁹⁴ http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte_099/59__1999/59_1999_hansa.htm

⁹⁵ Handout „Plattenwellenbrecher“, S. 2.

Nachteile:

- Eingriff in die Bodengegebenheiten im Vorküstenbereich, z.B. Bau von Beton-Anlagen als Untergrund
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten großer Schiffe entlang der Küstenlinie
- Geringe Veränderung der natürlichen Meeresströmung
- Versandung der Anlage möglich

3.2.4 OWC-Bojen

OWC-Bojen arbeiten wie die im Kapitel 3.1.2 beschriebenen OWC-Kraftwerke mit dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule. Das Steigen und Fallen des Wasserpegels in einer Kammer führt zu Luftbewegungen, welche eine Turbine antreiben.

Ihr Einsatz ist der nahe Küstenbereich, aber auch das offene Meer. Insbesondere in den relativ flachen Gewässern vor den Küsten, in denen Schifffahrtsrouten ausgewiesen werden müssen, bietet sich diese Technik an.

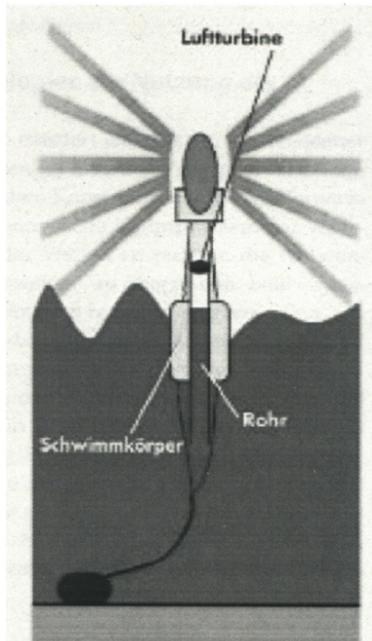


Abb. 25: Eine OWC-Boje für den küstennahen Einsatz. [Quelle: Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 85.]

Aufbau:

Eine OWC-Boje besteht aus einem langen, senkrechten Rohr, welches bis in die ruhigen Wasserschichten hinab reicht. In diesem Rohr sitzt über der Wasseroberfläche eine Luft-Turbine.

Das eigentliche, bojen-artige Oberteil ist auf Schwimmkörpern befestigt, sitzt über dem Rohr und schließt die Luftkammer im oberen Bereich des Rohres ab.

Funktionsweise:

Im Gegensatz zu dem in Kapitel 3.1.2 erwähnten OWC-Kraftwerk ruht bei einer OWC-Boje der Wasserstand in dem senkrechten Rohr, da dieses in ruhigeren Wasserschichten reicht.

Allerdings hebt und senkt sich der obere Teil der Boje, welcher auf den Schwimmkörpern befestigt ist, mit den Wellen. So entsteht eine oszillierende Bewegung relativ zur ruhenden Wasserlinie im Rohr und die Luftströmung kann die Turbine antreiben.⁹⁶

Die von dem Japaner Masuda erfundenen OWC-Bojen sind bereits seit mehr als 20 Jahren im Einsatz und haben den Bedingungen auf dem offenen Meer standgehalten.⁹⁷

⁹⁶ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 84.

⁹⁷ http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte_099/59__1999/59_1999_hansa.htm

Vorteile:

- In vielen Größen und Dimensionen einsetzbar
- Direkte Nutzung bzw. Speicherung der gewonnenen Energie
- Kein großer Eingriff in die Natur nötig
- Kombination mit bisheriger Bojen-Technik möglich
- Keine zusätzlichen Einschränkungen für Schifffahrtsrouten beim Ersetzen herkömmlicher Bojen durch OWC-Bojen
- Keine weiteren optischen Beeinträchtigungen der Küstengebiete als bisher

Nachteile:

- Leichter Eingriff in die Bodenbeschaffenheit durch Verankerung der Boje
- Eingeschränkte Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen und Sturmfluten
- Nur für die direkte Nutzung der Energie für die Boje geeignet

3.2.5 Brandl-Generator-Boje

Eine Brandl-Generator-Boje basiert ähnlich wie eine OWC-Boje auf der schwingenden Bewegung der Wellen, arbeitet jedoch nicht mit Luftströmungen, sondern mit einem Linearmotor, der aus einer Spule und einem Magneten besteht.

Der Einsatz einer Boje mit Brandl-Motor ist sowohl für den Vorküstenbereich, als auch für das offene Meer möglich, da bereits niedrige Wellen für die Energiegewinnung ausreichen, größere Wellen aber ebenfalls nutzbar sind.

Aufbau:

Die Brandl-Generator-Boje besteht aus einem Schwimmkörper, an dem ein Rohr montiert ist, welches senkrecht im Wasser hängen kann. Im oberen Teil des Rohres befindet sich eine fest montierte Spule.

Daran angebracht ist eine Feder, an deren Ende ein Massestück im unteren Teil des Rohres schwingen kann. Ein Magnet, der über einen Stab mit dem Massestück verbunden ist, kann sich durch die Spule bewegen.

Ein Unterwasserkabel verbindet die Boje mit dem Stromnetz an der Küste.⁹⁸

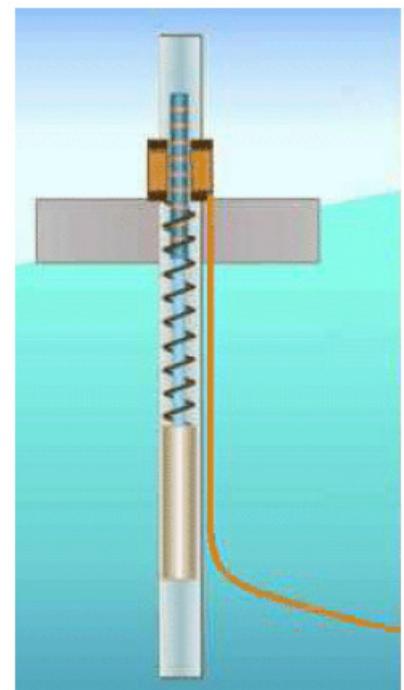


Abb. 26: In der Brandl-Generator-Boje schwingt ein Magnet in einer Spule und induziert eine Spannung. [Quelle: Info-Flyer „Saubere Energie aus Meereswellen durch den Brandl Generator“, S. 2]

⁹⁸ Info-Flyer „Saubere Energie aus Meereswellen durch den Brandl Generator“, S. 2.

Funktionsweise:

Der Schwimmkörper folgt der Wellenbewegung und schwingt im Meer auf und ab. Das Massestück und damit auch der Magnet kann an der Feder relativ gegenüber der Spule schwingen und induziert nach der Lenzschen Regel durch das veränderte Magnetfeld in der Spule eine Spannung.

Eine Boje mit einem Schwimmkörper von 15 Metern Durchmesser liefert eine Leistung von 1 MW. Durch die Installation mehrerer Anlagen in einem Energiepark kann die Leistung etwa auf 1 GW erhöht und so ein Atomkraftwerk ersetzt werden.⁹⁹

Vorteile:

- In vielen Größen und Dimensionen einsetzbar
- Relativ kurze Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Kein großer Eingriff in die Natur nötig
- Kombination mit bisheriger Bojen-Technik möglich
- Keine weitergehenden optischen Beeinträchtigungen entlang der Küste als bisher
- Keine Korrosion von Turbinen etc. durch Salzwasser
- Nicht sehr wartungsintensiv und geringe Betriebskosten
- Hohe Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen¹⁰⁰

Nachteile:

- Geringfügiger Eingriff in die Bodenbeschaffenheit durch Verankerung der Boje
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten durch Energieparks
- Wandlung der Frequenz auf 50 Hz notwendig

3.2.6 Mighty-Whale-OWC

Eine weitere Anwendung des Prinzips der oszillierenden Wassersäule ist das „Mighty-Whale-OWC“. Dieses ist ein schwimmendes Kraftwerk und zugleich ein Wellenbrecher. Der Name kommt von der Form der Anlage, die einem Wal gleicht.

Eingesetzt werden kann das Mighty-Whale-OWC-Kraftwerk in Gebieten vor der Küste, aber auch weiter draußen im offenen Meer.

Aufbau:

Das Mighty-Whale-OWC-Kraftwerk ist eine schwimmende Plattform in Form eines Wales. Ähnlich wie bei der OWC-Boje reichen auch hier Strukturen in tiefere Wasserschichten, damit die Anlage relativ zu den Wellen ruht. Über einem Hohlraum ist eine Turbine angebracht. Üblicherweise umfasst das Mighty-Whale-OWC-Kraftwerk gleich mehrere solcher Kammern und Turbinen.

⁹⁹ Info-Flyer „Saubere Energie aus Meereswellen durch den Brandl Generator“, S. 2.

¹⁰⁰ Ebd.

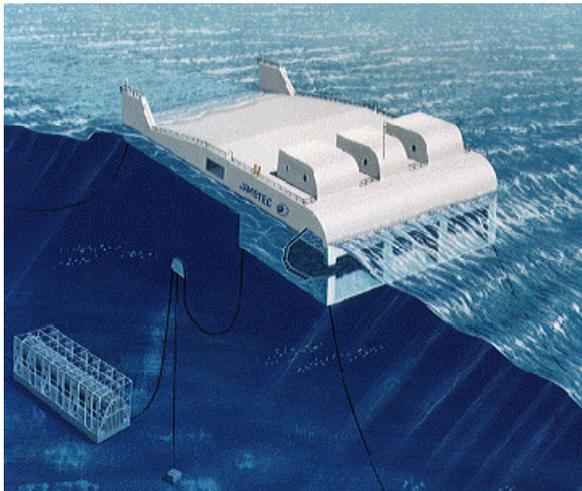


Abb. 27: Ein Mighty-Whale-OWC mit der Form eines Wales. Energiegewinnung und Küstenschutz in einer Anlage.
[Quelle: http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte_099/59_1999/59_1999_hansa.htm]

Funktionsweise:

Genau wie bei dem OWC-Kraftwerk in Kapitel 3.1.2 erzeugen die in die Hohlräume einlaufenden Wellen eine Luftströmung, welche durch die obere Öffnung entweicht und dort eine Turbine antreibt.

Zugleich dient das Kraftwerk aber auch dem Küstenschutz, weil es den Wellen auf breiter Front Energie entzieht und diese so abschwächt.

Das in Abbildung 27 gezeigte Mighty-Whale-OWC des japanischen Marine Science and Technology Centers ist eine 30 Meter breite Testanlage. Sie schwimmt in 40 Meter tiefem Wasser, liefert eine Leistung von 110 kW und wurde 1998 in Betrieb genommen.¹⁰¹

Vorteile:

- In vielen Größen und Dimensionen einsetzbar
- Kein großer Eingriff in die Natur nötig
- Integrierter Küstenschutz durch starke „Abschwächung“ der Wellen
- Schutz der Turbine vor Korrosion durch Salzwasser, da luftbetrieben
- Relativ kurze Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Bau der Anlage im Trockendock möglich; Anschließendes Schleppen zum Einsatzort und dortige Installation
- Kombination mit anderen Anlage-Typen, z.B. Windkraftanlagen, denkbar

Nachteile:

- Leichter Eingriff in die Bodenbeschaffenheit durch Verankerung der Anlage
- Hohe Produktionskosten
- Eingeschränkte Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen und Sturmfluten
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten
- Evtl. optische und akustische Beeinträchtigung der Landschaft bei der Installation vor der Küste

¹⁰¹ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 83.

3.3 Offshore-Anlagen

Im folgenden Abschnitt sollen nun die sogenannten Offshore-Anlagen betrachtet werden. Diese sind für den Einsatz auf offener See konzipiert und nutzen das energiereiche Wellenangebot im Tiefwasserbereich, d.h. bei einer Wassertiefe von mehr als 40 Metern.¹⁰²

Neben den bereits im Kapitel 3.2 beschriebenen OWC-Bojen, der Brandl-Generator-Boje und dem Mighty-Whale-OWC, welche ebenfalls im Tiefwasser eingesetzt werden können, gibt es noch die nachfolgenden Offshore-Kraftwerke mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen. Der Aufbau und die Funktionsweise der jeweiligen Anlagen werden ebenfalls erläutert.

3.3.1 Archimedischer Wellenschwinger

Der Archimedische Wellenschwinger (engl.: Archimedes Waveswing; AWS) ist eine in der offenen See auf dem Meeresboden verankerte Anlage, welche sich vollständig unter Wasser befindet. Sie besteht aus Tauchzylindern und nutzt die Auftriebsänderung einer vorbeilaufenden Welle zur Energiegewinnung.

Hintergrund der Erfindung des Archimedischen Wellenschwingers war es, eine Anlage zu bauen, die auch extremen Wellen widerstehen sollte und so langjährige Lebenszeit besitzt.¹⁰³



Aufbau:

Der Wellenschwinger besteht aus einer hohlen, druckfesten Stahlkonstruktion.¹⁰⁴ Ein äußerer Zylinder kann in den Wellenbewegungen gegenüber einem auf dem Meeresboden verankerten Innenzylinder senkrecht schwingen. Linearmotoren sind auf dem inneren Zylinder montiert und dienen der Energiegewinnung.¹⁰⁵

Die nebenstehende Abbildung zeigt einen AWS, welcher auf dem Meeresboden verankert ist, in einer Animation.

Abb. 28: Ein Archimedes Waveswing mit Linearmotoren (grau) zur Stromerzeugung. Der gelbliche Hohlkörper schwingt bei Druckänderungen durch Wellen. [Quelle: http://www.uni-leipzig.de/~grw/welle/wenergie_2_off.html]

¹⁰² Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 18.

¹⁰³ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 86.

¹⁰⁴ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 18.

¹⁰⁵ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 86.

Funktionsweise:

Der äußere Zylinder bewegt sich aufgrund von Druckänderungen durch darüber hinweg laufende Wellen gegenüber dem inneren Zylinder auf und ab. Möglich ist dieses aufgrund des archimedischen Prinzips: Der statische Auftrieb eines Körpers ist gleich der Gewichtskraft der von ihm verdrängten Flüssigkeit.¹⁰⁶

Diese Bewegung wird von den Linearmotoren, bestehend aus Spulen und Magneten, in elektrische Energie umgewandelt. Über Unterwasserkabel ist die Anlage an das örtliche Stromnetz angeschlossen.

Die Ausmaße der Zylinder betragen 21 Meter in der Höhe und 10 Meter im Zylinderdurchmesser. Der erste Prototyp mit Einsatz in der offenen See wurde 2004 in Portugal erfolgreich getestet. Die Effektivität und Widerstandsfähigkeit des Systems wurden mit diesem Prototyp belegt.¹⁰⁷ Seine Leistung betrug 2 MW.¹⁰⁸

Vorteile:

- In vielen Größen und Dimensionen zu einem Energiepark kombinierbar
- Kein großer Eingriff in die Natur nötig
- Bau der Anlage an Land möglich; anschließende Installation im Meer
- Vermeidung der Aussetzung gegenüber extremen Wellen, da Installation am ruhigeren Meeresgrund, d.h. längere Lebenszeiten der Anlagen
- Keine visuelle oder akustische Beeinträchtigung

Nachteile:

- Leichter Eingriff in die Bodenbeschaffenheit durch Verankerung der Anlage
- Geringe Ausnutzung der Wellenenergie, da Installation am ruhigen Meeresgrund
- Nur Einsatz im Tiefwasser möglich; im Flachwasser zu starke horizontale Schwingungen, die nicht genutzt werden können
- Lange Anbindungswege an das örtliche Stromnetz

3.3.2 Wave Dragon

Der Wave Dragon (engl.: Wellendrachen) nutzt die potentielle Energie der Wellen aus. Die Wassermassen der Wellen überfluten die Anlage, werden in einem höher gelegenen Reservoir gespeichert und betreiben eine Turbine. Der Wave Dragon funktioniert demnach wie ein Speicherkraftwerk, wobei die Wellen die Wassermassen in das Reservoir heben.

Der Einsatz des Wave Dragon ist wegen seiner Ausmaße und der höheren Effektivität bei gleichmäßig hohen Wellen für den Bereich weit vor der Küste vorgesehen.

¹⁰⁶ Gaede, P.-M. u.a.: *GEO Themenlexikon in 20 Bänden*, Band 6, S. 53.

¹⁰⁷ Präsentation „AWS MK II – Deployment, monitoring and evaluation of a prototype advanced wave energy device“.

¹⁰⁸ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 18.

Aufbau:

Mauerartige Wellenreflektoren bilden einen großen Trichter, der auf eine Rampe zuläuft. In erhöhter Position über dem Meeresspiegel befindet sich ein Reservoir mit einem Abfluss. In diesem ist eine Turbine installiert.

Funktionsweise:

Die anlaufenden Wellen werden durch die Konstruktion auf die Rampe geleitet. Die Wassermassen stauen sich auf und erreichen so das Reservoir. Durch das Abfließen der Wassermassen durch einen Kanal zurück ins Meer wird eine Turbine angetrieben und Strom erzeugt.¹⁰⁹



Abb. 29: Beim Wave Dragon werden die Wellen auf eine Rampe geleitet und füllen ein Bassin. Die potentielle Energie wird dann zur Energiegewinnung genutzt.
[Quelle: Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 22.]

Ein Prototyp im Maßstab 1:4,5 wurde im Mai 2003 von der dänischen Firma Wave Dragon ApS installiert. Dieser war 57 Meter breit, 27 Meter lang und wog 237 Tonnen.¹¹⁰

Da dieser Anlagentyp von sehr großer Dimension ist, lässt er sich zudem als Plattform für weitere Energieanlagen, z.B. von Windkraftanlagen, nutzen.

Vorteile:

- In verschiedenen Größen einsetzbar
- Kein großer Eingriff in die Natur nötig
- Bau der Anlage an Land möglich; anschließende Installation im Meer
- Integrierter Küstenschutz durch „Abschwächung“ der Wellen
- Keine aufwendige Neukonstruktion, d.h. Strukturen aus herkömmlichen Tiden-Speicherkraftwerken übertragbar

Nachteile:

- Leichter Eingriff in die Bodenbeschaffenheit durch Verankerung der Anlage
- Eingeschränkte Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen und Sturmfluten
- Lange Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Optische Beeinträchtigung entlang der Küstenlinie möglich
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten

¹⁰⁹ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 22.

¹¹⁰ Ebd.

3.3.3 Pelamis

Pelamis ist der griechische Begriff für Seeschlange, mit dem die Form und das Aussehen der Anlage beschrieben wird.¹¹¹ Der Sinn dieser Konstruktion sollte sein, ein Wellenkraftwerk zu entwickeln, welches möglichst unter geringem Aufwand an Kosten auch große Wellen übersteht.¹¹²

Eingesetzt wird die von der englischen Firma Ocean Power Delivery Ltd. entwickelte Seeschlange daher auf dem offenen Meer und ist auch für schweren Wellengang geeignet.¹¹³

Aufbau:

Das Wellenkraftwerk Pelamis besteht im Wesentlichen aus mehreren an der Wasseroberfläche schwimmenden Hohlzylindern. Diese sind durch hydraulische Pumpen verbunden und die gesamte Anlage ist mit Seilen am Meeresboden verankert.¹¹⁴

Die Anlage wird so beweglich verankert, dass sie bei größeren Wellen einfach durch diese hindurch tauchen kann.¹¹⁵

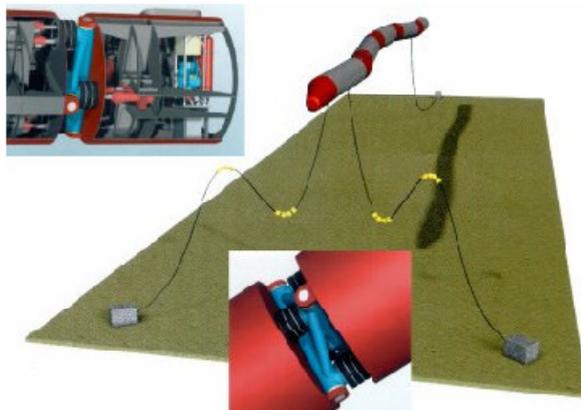


Abb. 31: Das Wellenkraftwerk Pelamis windet sich bei normalen Wellen und erzeugt so über eine Hydraulik-Anlage Strom. Durch extreme Wellen taucht es hingegen durch.

[Quelle: http://www.uni-leipzig.de/~grw/welle/wenergie_2_off.html]



Abb. 30: Pelamis-Anlagen schwimmen wie eine Schlange an der Wasseroberfläche.

[Quelle: http://www.contitech.de/pages/presse/presse-uebersicht/presse-messen/2008/080418_hm_01/presse_de.html]

Funktionsweise:

Die auf dem Wasser schwimmende Anlage wird durch den Wellengang in eine horizontale Bewegung versetzt. Dieses „sich winden“ der einzelnen Segmente wird von Hydraulikaggregaten ausgenutzt.¹¹⁶ Durch die Wellenbewegung wird mittels Pumpen Öl in einem Hochdruck-Speicher komprimiert, womit ein hydraulischer Generator betrieben wird.¹¹⁷

¹¹¹ Scheil, C.: *Seeschlange mit Auftrieb*, S. 15.

¹¹² Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 87.

¹¹³ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 19.

¹¹⁴ Scheil, C.: *Seeschlange mit Auftrieb*, S. 15.

¹¹⁵ http://www.uni-leipzig.de/~grw/welle/wenergie_2_off.html

¹¹⁶ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 87.

¹¹⁷ Scheil, C.: *Seeschlange mit Auftrieb*, S. 15.

Die Anlage verhält sich gegenüber extremen und hohen Wellen steif und unbeweglich, was dazu führt, dass sie durch diese hindurch taucht und so unbeschadet bleibt.¹¹⁸

2004 wurde im europäischen Marine Energy Center in Orkney der erste Prototyp in kommerzieller Größe installiert. Dieser war 120 Meter lang, hatte einen Durchmesser von 3,5 Meter und lieferte eine Leistung von 750 kW.¹¹⁹

Vorteile:

- In verschiedenen Größen einsetzbar
- Kein großer Eingriff in die Natur nötig
- Bau der Anlage an Land möglich; Anschließende Installation im Meer
- Hohe Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen von bis zu 20 Metern¹²⁰

Nachteile:

- Leichter Eingriff in die Bodenbeschaffenheit durch Verankerung der Anlage
- Lange Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Optische Beeinträchtigung entlang der Küstenlinie möglich
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten
- Gefahr der Umweltverschmutzung durch evtl. austretendes Hydraulik-Öl

3.3.4 Kraftwerksbojen

Neben den bereits in Kapitel 3.2.4 erwähnten OWC-Bojen existieren noch weitere Möglichkeiten Bojen als Kraftwerke zu verwenden. Eine weitere Kraftwerksboje ist die von der amerikanischen Firma Ocean Power Technologies entwickelte Power Buoy.¹²¹

Diese Boje gewinnt die elektrische Energie ebenfalls aus der Wellenbewegung und wird im Übergang zum Tiefwasserbereich eingesetzt.

Aufbau:

Die Power Buoy ist konstruiert wie eine übliche Boje. Ein Schwimmkörper an der Wasseroberfläche ist aber über eine Kolbenpumpe mit dem hydraulischen System in der Konstruktion verbunden, die auf dem Meeresboden verankert ist. Der Schwimmkörper kann gegenüber der starren Konstruktion unter Wasser mit den Wellen vertikal schwingen.

Abb. 32: Die Power Buoy ist eine hydraulische Kraftwerksboje, welche die schwingende Wellenbewegung ausnutzt.
[Quelle: <http://www.oceanpowertechnologies.com/>]



¹¹⁸ Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 87.

¹¹⁹ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 19.

¹²⁰ ZDF-Dokumentationssendung „Abenteuer Wissen“ vom 07.01.2009.

¹²¹ <http://www.oceanpowertechnologies.com/>

Funktionsweise:

Ähnlich wie die OWC-Boje schwingt bei der Power Buoy der Schwimmkörper vertikal auf der Wasseroberfläche, wenn sich die Wassermassen aufgrund der Wellen heben und senken. Hierdurch wird die Kolbenpumpe betrieben und komprimiert Hydraulik-Öl in der Bodenkonstruktion. Dieses betreibt dann einen Generator, welcher über Unterwasserkabel mit dem Stromnetz verbunden ist.

Diese Bojen haben eine Steuereinheit, welche bei extremen Wellen automatisch die vertikale Schwingbewegung blockiert und somit die Energiegewinnung unterbindet, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung der Anlage durch schweren Seegang verringert wird. Bei abschwächendem Seegang wird der Betrieb wieder aufgenommen.

Die ersten Anlagen dieses Typs wurden 2004 vor der Küste Hawaiis in Betrieb genommen und lieferten eine Leistung von 40 kW.¹²²

Mehrere vor der Küste Spaniens zu einem Energiepark zusammengeschlossene Anlagen wurden in einer Wassertiefe von 50 Metern installiert und liefern zusammen eine Leistung von 1,39 MW.¹²³

Vorteile:

- In vielen Dimensionen und in Energieparks einsetzbar
- Direkte Nutzung bzw. Speicherung der gewonnenen Energie für die Boje
- Kein großer Eingriff in die Natur nötig
- Kombination mit bisheriger Bojen-Technik möglich
- Keine Einschränkungen für Schifffahrtsrouten
- Keine zusätzlichen optischen oder akustischen Beeinträchtigungen
- Gute Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen und Sturmfluten

Nachteile:

- Leichter Eingriff in die Bodenbeschaffenheit durch Verankerung der Boje
- Lange Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Gefahr der Umweltverschmutzung durch evtl. austretendes Hydraulik-Öl

3.4 Weitere Anlagen zur Energiegewinnung aus dem Meer

Neben den in den vorherigen Kapiteln bereits erwähnten Wellenkraftwerken gibt es noch weitere Anlagen zur Energiegewinnung aus dem Meer.

Diese nutzen zum Teil die ständig vorhandenen Meeresströmungen oder die bei Ebbe und Flut auftretenden Tiden-Strömungen. Die Funktionsweisen und der Aufbau solcher Kraftwerke sind im Folgenden beschrieben.

¹²² Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 20.

¹²³ <http://www.oceanpowertechnologies.com/>

3.4.1 Strömungsanlagen

Es ist offensichtlich, dass neben der Nutzung der Wellenenergie auch die Energie der Meeresströmung genutzt werden kann. Ähnlich wie bei der Nutzung der Windenergie ist es hier der Gedanke, mit einem „Windrad unter Wasser“ die Strömungen der Meere zu nutzen. Dieses kann z.B. in Flussmündungen, im Ärmelkanal oder in Gebieten des Golfstroms der Fall sein.

Die Einsatzorte solcher Kraftwerke reichen daher von mäßig flachem Wasser bis hin zu tieferen Gewässern, in denen die globalen Meeresströmungen genutzt werden.

Ein solches „Wellenrad“, der sogenannte SeaFlow wurde von der Marine Current Turbines Ltd. in Großbritannien entwickelt.¹²⁴



Abb. 33: Der SeaFlow zur Nutzung der Meeresströmung ähnelt einem Windrad.

[Quelle: Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 29.]

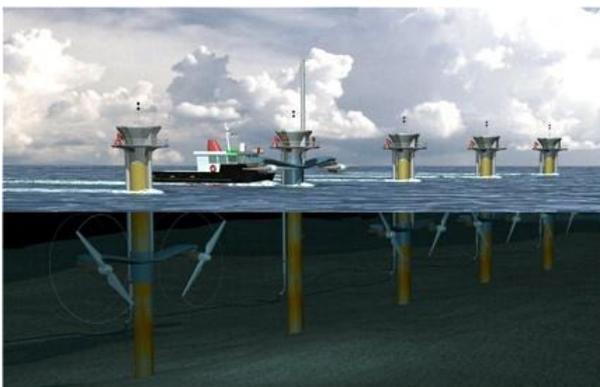


Abb. 34: Ein Energiepark aus mehreren SeaFlow-Anlagen mit zwei Rotorblättern.

[Quelle: <http://www.marineturbines.com/18/projects/>]

Aufbau:

Der SeaFlow sieht ähnlich aus wie ein großes Windrad. Der Unterschied ist, dass dieses Kraftwerk in Gegenden mit Meeresströmungen auf dem Meeresboden verankert wird und enorme Kräfte aushalten muss.

Die Anlage besteht aus einem Rotor mit horizontaler Achse und einem Durchmesser von 15 bis 20 Metern. Befestigt ist dieser an einer Stahlkonstruktion, die auf dem Meeresboden verankert wird.¹²⁵

Mehrere Anlagen, die auch mit mehreren Rotoren bestückt sein können, lassen sich zu einem großen Energiepark zusammenschließen und werden mit einem Unterwasserkabel an das örtliche Stromnetz angeschlossen.

Auch eine Kombination mit einem herkömmlichen Windrad, welches über dem Wasserspiegel auf der Anlage installiert wird und ebenfalls zur Energiegewinnung beiträgt, ist denkbar.

¹²⁴ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 29.

¹²⁵ <http://www.marineturbines.com/21/technology/>

Funktionsweise:

Die Anlage funktioniert im Prinzip wie ein Windrad, antreibende Kraft ist in diesem Fall allerdings die Meeresströmung. Die mit hoher Geschwindigkeit vorbeiströmenden Wassermassen versetzen den Rotor in eine Drehbewegung, welche auf eine Turbine übertragen wird. Diese wandelt die kinetische Energie in elektrische um und speist sie in das Stromnetz ein.¹²⁶

Die im Jahr 2003 etwa 1 km vor der englischen Südküste bei Devon getestete Anlage hatte einen Rotordurchmesser von 15 Metern und wurde in einer Tiefe von 30 Metern installiert. Sie lieferte eine Leistung von 300 kW.¹²⁷

Vorteile:

- In verschiedenen Größen einsetzbar
- Zu großen Energieparks kombinierbar
- Kein großer Eingriff in die Natur nötig
- Bau der Anlage an Land möglich; Anschließende Installation im Meer
- Hohe Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wellen, da nur strömungsbedingt
- Keine optische oder akustische Beeinträchtigung entlang der Küstenlinie bei vollständig untergetauchten Anlagen

Nachteile:

- Leichter Eingriff in die Bodenbeschaffenheit durch Verankerung der Anlage
- Teilweise lange Anbindungswege an das örtliche Stromnetz
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten
- Beeinträchtigung der natürlichen Strömungsverhältnisse
- Wandlung der Frequenz auf 50 Hz notwendig

3.4.2 Tocardo

Die Tocardo-Anlage wurde von der holländischen Firma Teamwork Technology BV entwickelt und ist für den Einsatz in den stark beanspruchten Ablaufkanälen der Sturmflutgebiete gedacht.¹²⁸

Der Einsatzort solcher Anlagen ist demnach im Flachwasserbereich direkt an der Küste, in Flussmündungen oder in zur Küste laufenden Kanälen in den Deichbereichen, wie sie beispielsweise in den Niederlanden zu finden sind.

Der Tocardo kann sowohl als Strömungs-, als auch als Gezeitenkraftwerk eingesetzt werden.

¹²⁶ <http://www.marineturbines.com/21/technology/>

¹²⁷ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 29.

¹²⁸ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 30.

Aufbau:

Die Tocardo-Anlage besteht genau wie die im Kapitel 3.4.1 beschriebene Strömungsanlage aus einer Turbine mit horizontaler Achse und großem Rotor. Installiert wird diese allerdings direkt in den Hochwasserschutz und in vorhandene Wehranlagen oder Kanäle.

Funktionsweise:

Die bei Sturmfluten aufgelaufenen Wassermassen treiben beim Abfließen durch die Kanäle den Rotor und damit die Turbine der Anlage an. Das Prinzip ist das gleiche wie bei der obigen Strömungsanlage.

Ein erster Prototyp mit einem Rotordurchmesser von 2,8 Metern wurde 2006 in Holland getestet. Die Anlage nutzte die bei Ebbe vom Ijsselmeer in die Nordsee abfließenden Wassermassen und lieferte eine Leistung von 35 kW.¹²⁹

Geplant ist auch ein 10-MW-Energiepark mit Tocardo-Anlagen, die jeweils einen Rotordurchmesser von 10 Metern haben und 2009 in Betrieb gehen sollen.¹³⁰

Vorteile:

- In verschiedenen Größen einsetzbar
- Kein großer Eingriff in die Natur nötig
- Integrierter Küstenschutz
- Einfache und robuste Technologie¹³¹
- Kurze Anbindung an das örtliche Stromnetz
- Hoher Wirkungsgrad

Nachteile:

- Veränderung der natürlichen Meeresströmung
- Beeinträchtigung der Schifffahrtsrouten an der Küste
- Gezeitenabhängige Schwankungen in der Energielieferung
- Meist schwerer Eingriff in die Natur nötig, d.h. Bau von Beton-Anlagen und evtl. Angleichungen des Ufers
- Optische Beeinträchtigung der Küstenlandschaft
- Wandlung der Frequenz auf 50 Hz notwendig



Abb. 35: Der Tocardo funktioniert wie die Strömungsanlage und wird in den Küstenschutz integriert.

[Quelle: <http://www.tocardo.com/>]

¹²⁹ Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*, S. 30.

¹³⁰ <http://www.energycurrent.com/index.php?id=3&storyid=8705>

¹³¹ <http://www.tocardo.com/>

Wie zu Beginn dieses Kapitels über die Nutzung von Wellenenergie bereits erwähnt, ist dieses nur eine kleine Auswahl an Wellenkraftwerken. Die Auswahl der hier beschriebenen Kraftwerkstypen dient dazu, die Funktionsweisen einer jeden Kraftwerksklasse stellvertretend mit einem Wellenkraftwerk zu beschreiben und den Aufbau anhand einer Anlage eines jeden Typs zu verdeutlichen.

Eine ausführlichere Auflistung der zur Zeit entwickelten Kraftwerkstypen findet sich auf der Internetseite des Wave Energy Centres (WavEC) unter <http://www.wavec.org/index.php/17/technologies/>.

Die in der ZDF-Sendung „Abenteuer Wissen“ am 7. Januar 2009 gezeigte Dokumentation zum Thema „Energie aus dem Meer“ ist auf der DVD im Anhang dieser Arbeit beigelegt und zeigt ebenfalls Aufbau und Funktionsweisen einzelner Kraftwerke.

3.5 Die Wellenkraftwerke im Unterricht

Aufgrund der großen Anzahl an Wellenkraftwerken und den vielen verschiedenen Funktionsweisen wird es für den Physikunterricht unmöglich sein, alle Kraftwerkstypen zu behandeln und zu untersuchen.

Auch ähneln sich einige Kraftwerke hinsichtlich ihres Aufbaus oder der Arbeitsweise, sodass nicht alle oben aufgeführten Anlagen besprochen werden müssen.

Dennoch ist es sinnvoll, sich im Physikunterricht mit einigen wenigen, gezielt ausgesuchten Wellenkraftwerken zu beschäftigen.

So ist es beispielsweise möglich, im Lehrplan enthaltene und damit im Unterricht verankerte Themengebiete mit der Untersuchung ausgewählter Kraftwerke zu verbinden. An das Themengebiet der elektromagnetischen Induktion kann sich beispielsweise die Beschreibung der Brandl-Generator-Boje anschließen. So kann gleichzeitig der Einsatz dieses Prinzips bei der Energiegewinnung besprochen und das Gelernte wiederholt werden.

Genauso bietet sich bei der Behandlung des Archimedischen Prinzips ein Blick auf den Wellenschwinger an. An diesem Wellenkraftwerk kann der Einfluss von Druck in Flüssigkeiten auf Hohlkörper verdeutlicht und zugleich mit der Funktionsweise des Wellenschwingers und der damit gekoppelten Energiegewinnung verbunden werden.

Für den Schulunterricht sollte es daher ausreichend sein, sich entsprechend der Unterrichtsinhalte mit ausgesuchten Wellenkraftwerken zu beschäftigen. Dabei müssen nicht alle Vor- und Nachteile oder sogar die Entwicklungsgeschichte der jeweiligen Technik im Detail besprochen werden. Eine Beschreibung der Funktionsweise und der Einsatzmöglichkeiten der Anlage können für das Verständnis der Technik bereits ausreichen.

4) Chancen und Risiken der Nutzung von Wellenenergie

Im Folgenden sollen nun die Chancen und Risiken der Nutzung von Wellenenergie zusammengefasst und noch einmal wichtige Vor- und Nachteile einzelner Anlagen aufgezeigt werden. Abschließend werden die Argumente diskutiert und teilweise gegenüber gestellt.

4.1 Chancen der Wellenenergienutzung

Offensichtlich liegen die großen Vorteile der Wellenenergie-Anlagen darin, einen Beitrag zur Nutzung der regenerativen Energie zu erbringen. Aber auch andere Chancen ergeben sich aus dem Einsatz von Wellenkraftwerken. Diese sind nachfolgend aufgelistet:

- Keine CO₂-Produktion während des Betriebs der Anlagen, d.h. Beitrag zum Schutz des Weltklimas und der Umwelt
- Nutzung einer unerschöpflichen Energiequelle, d.h. Energiesicherheit auch für die ferne Zukunft
- Möglichkeit zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien bei der Energiegewinnung, d.h. evtl. weniger konventionelle Kraftwerke nötig und weniger Abhängigkeit von den begrenzten Öl- und Gasreserven
- Beitrag zur autonomen Energieversorgung von Offshore-Anlagen, wie Ölbohrplattformen, Bojen oder Messstationen
- Gleichzeitiger Schutz der Küstenregion vor Sturmfluten und extremen Wellen beim Einsatz entsprechender Anlagen
- Keine optischen oder akustischen Beeinträchtigungen wie beispielsweise bei Windparks oder konventionellen Kraftwerken bei der Verwendung getauchter Wellenkraftwerke oder Offshore-Anlagen.
- Hohe Wirkungsgrade einzelner Anlagen von teilweise bis zu 90 %

4.2 Risiken der Wellenenergienutzung

Dass der Betrieb von Wellenkraftwerken aber nicht nur Vorteile mit sich bringt, zeigt die nachfolgende Auflistung der Risiken bei der Nutzung von Wellenenergie:

- Korrosion der Anlage, insbesondere der Turbine durch Salzwasser; ausgenommen OWC-Kraftwerke, bei denen die Turbine mit Luft betrieben wird
- Gefahr der Zerstörung der Anlage bei Extremwellen und Sturmfluten
- Frequenzwandlung auf 50 Hz bei allen Anlagen notwendig, da Meereswellen üblicherweise Frequenzen von 1/10 bis 1 Hz aufweisen

- Gefahr der Umweltverschmutzung bei austretendem Hydraulik-Öl, welches in einigen Anlagen verwendet wird
- Teilweise starke Eingriffe in die vorhandene Meeresströmung, d.h. z.B. Versandung einzelner Vorküstenbereiche möglich
- Evtl. Beeinträchtigung der Schifffahrt bei der Konstruktion großer Energieparks vor der Küste
- Optische und akustische Beeinträchtigung entlang der Küste bei Wellenkraftwerken oberhalb der Wasserlinie
- Keine genaue Erforschung der Auswirkungen von Unterwasseranlagen auf die Tier- und Pflanzenwelt des Meeres

4.3 Diskussion der Argumente

Zusammenfassend kann zu den Chancen und Risiken der Nutzung von Wellenenergie gesagt werden, dass jede einzelne Anlage ihre eigenen Vor- und Nachteile aufweist. Diese müssen bei der Installation des Kraftwerks für jeden Einsatzort und jede dort auffindbare Gegebenheit neu berücksichtigt werden.

Zwar haben alle Wellenkraftwerke den Vorteil, dass sie einen enormen Beitrag zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes erbringen können, dennoch sollte aber der Einsatz einer bestimmten Anlage an einem bestimmten Ort unter Berücksichtigung der jeweiligen Eigenschaften der Anlage erfolgen.

So ist beispielsweise beim Einsatz eines hydraulischen Wellenroller-Kraftwerks zum Schutz der Küste eines Naturschutzgebietes der schützende Effekt gegen eine mögliche Gefährdung der im Naturschutzgebiet beheimateten Tier- und Pflanzenarten durch evtl. austretendes Hydraulik-Öl abzuwägen.

Ebenso kann das Argument des Eingriffs in die Natur und Küstenlandschaft dem des Küstenschutzes gegenübergestellt werden. Muss auf der einen Seite für die Installation eines Wellenkraftwerks eine Veränderung an der Landschaft und Natur vorgenommen werden, auf der anderen Seite aber auch die Küste vor Sturmfluten geschützt werden, so können diese beiden Funktionen mit der entsprechenden Technik auch kombiniert werden.

Auch bleibt es genau zu prüfen, ob sich die Installation einer Anlage unter Berücksichtigung des evtl. hohen Wartungsbedarfs z.B. durch Korrosion energetisch rentiert und so die investierten Rohstoffe und Energien zur Herstellung durch die dann gewonnene Energie kompensiert und ausgeglichen werden.

Dennoch ist es mit Hilfe der Wellenkraftwerke möglich, einen effektiven Beitrag zum Küstenschutz und zum Schutz der Umwelt und des Weltklimas zu erbringen.

5) Bau eigener Wellenkraftwerke

In diesem Abschnitt werden die Anleitungen für den Nachbau einer OWC-Boje, eines Archimedischen Wellenschwingers und einer Brandl-Generator-Boje für den Schulunterricht gegeben.

Anhand dieser Nachbaumöglichkeit der einzelnen Kraftwerke soll es den Schülerinnen und Schülern ermöglicht werden, sich den Aufbau, sowie die Funktionsweise solcher Anlagen besser vorstellen zu können. Auch kann anhand der Modelle deren Einsatz und Nutzen, sowie mögliche Vor- und Nachteile diskutiert und deren Einsatz zur alternativen Energiegewinnung besprochen werden.

Alle Nachbauten der Kraftwerke sind so konzipiert, dass sie mit einfachen Mitteln des Alltags und aus der Physiksammlung hergestellt werden können. Zum Teil werden einige Materialien aus dem Baumarkt benötigt, welche aber ebenfalls handelsüblich und den Schülerinnen und Schülern bekannt sind.

Neben den Beschreibungen der benötigten Bauteile und deren Zusammenbau soll auch die Möglichkeit des Einsatzes im Physikunterricht diskutiert, sowie Hinweise zu möglichen Problemen beim Nachbau gegeben werden.

5.1 Die OWC-Boje

In diesem Kapitel soll die Möglichkeit des Nachbaus einer OWC-Boje, welche im Kapitel 3.2.4 beschrieben wurde, für den Physikunterricht erläutert werden.

5.1.1 Vorüberlegungen

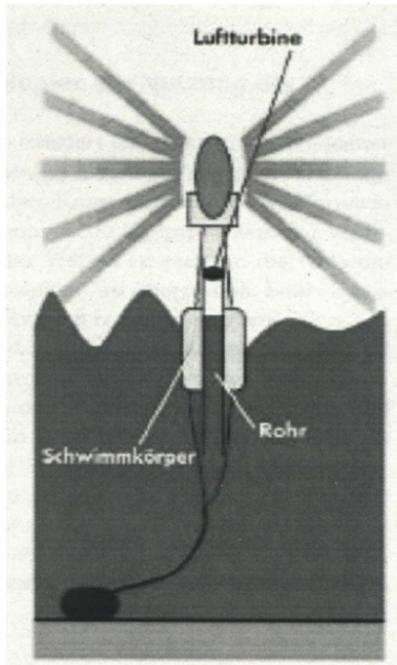
Zunächst einmal ist es notwendig, sich zu überlegen, in welcher Größe und welchen Ausmaßen die OWC-Boje im Unterricht nachgebaut werden soll.

Da es im Physikunterricht schwierig ist, hohe Wellen auf einer breiten Fläche zu erzeugen und somit die Bedingungen des offenen Meeres zu simulieren, wird es erforderlich sein, die OWC-Boje in einem verkleinerten Maßstab zu konstruieren. Aber auch bei kleineren Wellen und verkleinerten Ausmaßen des Kraftwerks wird es möglich sein, die Funktionsweise zu betrachten und Energie zu gewinnen.

Auch wird es aufgrund des kleineren Maßstabs der Anlage nicht möglich sein, Energien zu gewinnen, die denen größerer Anlagen entsprechen. Daher sollte in diesem Fall die gewonnene Energie allein zum Betreiben einer kleinen Leuchtdiode genutzt oder das einfache Ablesen der erzeugten Energie mit einem Messgerät geplant werden.

Des Weiteren wird der Generator nicht wie in der Vorlage im unteren Rohr montiert, sondern auf das obere Rohr gesetzt. Dieses ist zum einen leichter zu bauen und zu befestigen. Zum anderen kann durch kleine Veränderungen am Deckel der Boje der Luftstrom der Turbine so besser angepasst werden.

5.1.2 Benötigte Materialien



Ziel ist es, die OWC-Boje mit möglichst alltäglichen Gegenständen oder Materialien aus der Physiksammlung nachzubauen.

Die nebenstehende Abbildung zeigt erneut den Aufbau einer OWC-Boje. Diese soll als Vorlage für die Konstruktion einer eigenen Anlage dienen.

Wie zu erkennen ist, werden zwei Rohre benötigt, die ineinander fassen können, sowie eine Turbine und eine entsprechende Lampe. Zur Stabilisierung werden Schwimmkörper und eine Verankerung benötigt.

Abb. 36: Die Original-OWC_Boje dient als Vorbild für den Nachbau im Unterricht.

[Quelle: Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 85.]

Nachfolgend die Liste mit den benötigten Materialien:

- Kleiner Generator (z.B. Fahrraddynamo) mit Rotoraufsatz
- Kunststoffrohr A ($\varnothing_{\text{au\ss en}}$: 110 mm, Länge: 1200 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoffrohr B ($\varnothing_{\text{au\ss en}}$: 125 mm, Länge: 1000 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoffrohr C ($\varnothing_{\text{innen}}$: 110 mm, Länge: 130 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoff-Reduzierstück von 1250 mm (innen) auf 1000 mm (innen)
- Kunststoff-Deckel ($\varnothing_{\text{Anschluss}}$: 110 mm)
- Styropor-Platte (Größe: 1 m², Stärke: 50 mm)
- Klebstoff (z.B. Pattex-Alleskleber)
- Seil (Länge: 10 m, \varnothing : 1 mm)
- Spax-Holzschrauben (30 x 15)
- Stein (Masse: 5 kg)
- LED (passend zum Generator) mit Halterung
- Volt- und Amperemeter
- Anschlusskabel
- Stangen und Klemmen (zur Befestigung der Turbine)
- Bohrmaschine inkl. Holzbohrer
- Schraubendreher
- Messer

Eine detaillierte Auflistung der Beschaffungsorte und Kosten der oben aufgeführten Materialien findet sich im Anhang.

Alle hier aufgelisteten Materialien werden für den Bau eines OWC-Kraftwerks benötigt, welches nach Konstruktion im Hallenbad oder in einem kleinen See getestet werden soll. Der Vorteil daran ist, dass dort zum einen besser Wellen erzeugt werden können, als es in der Schule möglich wäre. Zum anderen ist mit Hilfe der etwas größeren Ausmaße die Funktionsweise deutlicher zu erkennen und ein Funktionieren garantiert.

Natürlich kann die Anlage auch in noch kleinerem Maßstab nachgebaut werden, sodass dann auch ein Betrieb direkt im Klassenzimmer möglich ist. Hier stößt die Technik aber bereits an ihre Grenzen und die Anschaulichkeit verringert sich bei kleineren Anlagen.

Die Größe der einzelnen Bauteile müssen entsprechend des Maßstabs und des zur Verfügung stehenden Generators angepasst werden. Alle oben aufgelisteten Materialien wurden auf die Turbine abgestimmt und auch die Ausmaße der Rohre so gewählt, dass ein optimaler Betrieb möglich ist.

Die Kosten der Materialien belaufen sich auf insgesamt € 32,81 (vgl. Materialliste im Anhang). Vielleicht besteht im Unterricht auch die Möglichkeit, dass einige Schülerinnen und/oder Schüler entsprechende Materialien von zu Hause mitbringen, sodass sich so die Kosten reduzieren lassen.

5.1.3 Konstruktion der Anlage

Ziel der Konstruktion einer solchen Anlage wird es sein, den Aufbau der Original-OWC-Boje mit alltäglichen Materialien möglichst genau nachzubauen und die Funktionsweise nachvollziehen zu können.

Wie bei der OWC-Boje benötigt man auch bei dem nachgebauten Kraftwerk ein Rohr, welches in die tieferliegenden Wasserschichten reicht. Dieses sorgt für eine relativ zu den Wellen ruhende Wasserlinie. Diese Aufgabe übernimmt das Rohr A, welches den zweitgrößten Durchmesser und eine Länge von 1,2 m besitzt.



In dieses Rohr werden nahe des unteren Randes drei Löcher gebohrt, durch die das Seil zur Befestigung der Anlage am Stein gezogen werden kann. Die drei Löcher sollten gleichmäßig über den Rand des Rohres verteilt liegen, damit die Boje später möglichst senkrecht im Wasser hängt und wenig Schräglage bekommt. Es sind mindestens drei Bohrungen nötig, da nur mit drei oder mehr Haltepunkten die Neigung korrigiert werden kann.

Abb. 37: Das kleinere Rohr A erhält am unteren Rand drei Bohrungen für die Befestigung am Stein.

Die Abbildung 37 zeigt diese Bohrlöcher für das Seil. Das Seil sollte so angebunden werden, dass ein eventuelles Korrigieren der Neigung im Wasser leicht möglich ist.

Das Rohr A wird zudem im oberen Bereich von innen mit ein wenig Styropor ausgekleidet, damit es schwimmt.

Zum Zuschneiden der Schwimmkörper bietet es sich an, das Rohr senkrecht auf die Styropor-Platte zu stellen und mit einem Stift zu um-malen. Anschließend lässt sich das Styropor mit einem Messer ausschneiden. Zur Befestigung im Rohr dienen die Holz-Schrauben, damit das Styropor nicht heraus schwimmt.

Die nebenstehende Abbildung zeigt einen ausgeschnittenen Schwimmkörper und dessen Befestigung.

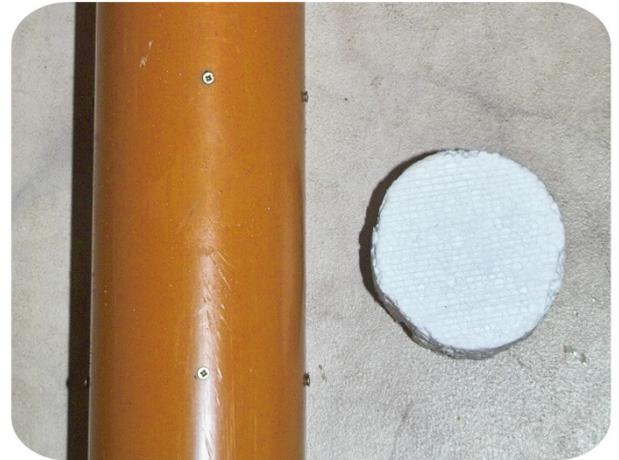


Abb. 38: Die zugeschnittenen Schwimmkörper (rechts) werden im oberen Drittel des Rohres A mit Schrauben fixiert.

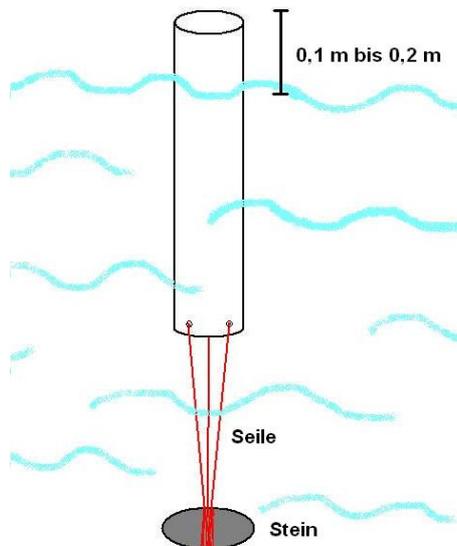


Abb. 39: Die Skizze zeigt die Montage des inneren Rohres im Wasser mit Hilfe des Seiles und des Steins.

Das Seil kann nun in drei etwa gleich lange Teile geschnitten werden. Danach wird das Rohr A so mit den Seilen am Stein befestigt, dass es später senkrecht im Wasser schwimmt und etwa 10 bis 20 cm aus dem Wasser ragt.

Hierbei kann es notwendig sein, die Lage des Rohres zu korrigieren. Über die Länge der Seile kann die Neigung des Rohres variiert werden. Dieses sollte möglichst senkrecht im Wasser hängen, damit eine spätere Beeinträchtigung der Boje durch Reibung vermieden wird.

Als Veranschaulichung dient die nebenstehende Skizze.

Für den oberen Teil der Anlage benötigt man zunächst das Rohr B mit dem größten Durchmesser. Dieses soll im Betrieb der Anlage durch die Wellen über dem senkrechten Rohr A schwingen und für eine Luftbewegung sorgen, welche den Generator antreibt.

Das Rohr B besitzt einen etwas größeren Durchmesser als das zuvor verwendete Rohr A, damit diese übereinander geschoben werden können. Andererseits ist der Durchmesser nicht zu groß, sodass noch eine gute Führung des Rohres möglich ist.

Auf das große Rohr B wird zunächst das Reduzierstück für die nächst kleinere Stufe gesteckt. Dieses ist nur notwendig, da es in diesem Fall keine Abdeckkappe für das große Rohr, sondern nur für Rohre des nächst kleineren Durchmessers gibt. Zum luftdichten Verschließen kann entweder der im Rohr enthaltene Dichtungsring oder der Kleber verwendet werden.

Auf das reduzierte Ende wird nun das kurze Rohrstück C gesetzt und ebenfalls abgedichtet. Die nebenstehende Abbildung zeigt diese Konstruktion.



Abb. 40: Der Durchmesser des großen Rohres B muss reduziert werden, damit ein Deckel aufgesetzt werden kann.



Abb. 41: Die ausströmende Luft trifft durch die Bohrlöcher direkt auf die Rotorblätter des montierten Generators.

Bevor der Deckel auf das schmalere Rohr-Ende gesetzt werden kann, muss dieser zunächst bearbeitet werden. Mit einer Bohrmaschine wird zunächst so ein Loch in den Deckel gebohrt, dass der Generator mit den Stangen und Klemmen daran befestigt werden kann. Dann werden zwei bis drei kleinere Löcher so in den Deckel gebohrt, dass die hierdurch strömende Luft direkt auf die Rotorblätter treffen kann.

Die gesamte Konstruktion des Deckels ist in der Abbildung 41 im Detail dargestellt.

Auch die LED kann bereits mit den Kabeln an den Generator angeschlossen und muss ggf. festgeklebt werden.

Nachdem der Deckel auf der Rohrkonstruktion (Rohr B + Reduktion) montiert wurde, können nun Schwimmkörper angebracht werden. Diese haben die Form von Ringen, werden aus dem Styropor zugeschnitten und um das Rohr B gesetzt. Der Durchmesser der Styropor-Kreise sollte etwa 0,2 m betragen und das Loch im Innerem dem Durchmesser des großen Rohres von 0,125 m entsprechen.

Abb. 42: Die Schwimmkörper werden aus der Styropor-Platte zugeschnitten und über das Rohr B geschoben.



Abbildung 42 zeigt die Montage der Schwimmkörper am Rohr B. Die Anzahl der Ringe hängt davon ab, wie viel Auftrieb die Konstruktion benötigt, um an der Wasseroberfläche zu schwimmen und sich mit den Wellen zu bewegen.



Die gesamte äußere Konstruktion besteht nun aus dem großen Rohr B, dem Reduzierstück, dem kleineren Rohr C und dem Deckel mit dem montierten Generator. Die nebenstehende Abbildung zeigt den oberen Teil dieser äußeren Konstruktion.

Abschließend können nun beide Teile (Rohr A mit Rohr B + Reduktion + Deckel) zusammengefügt und im Wasser montiert werden. Das Rohr A wird mit dem Seil und dem Stein senkrecht in das Wasser gehängt, sodass es etwa 0,1 m bis 0,2 m aus dem Wasser ragt. Verdeutlicht ist dieses in der Abbildung 39.

Darüber wird nun die zweite Rohrkonstruktion (Rohr B + Reduktion + Deckel) gesetzt. Diese lässt sich gegenüber dem inneren Teil bewegen und die Anlage ist betriebsbereit.

Abb. 43: Die gesamte äußere Konstruktion besteht aus den Rohren B und C, dem Reduzierstück, dem bearbeiteten Deckel und den Schwimmkörpern.

5.1.4 Betrieb der Anlage

Schwimmt die Anlage in einem Becken und werden Wellen erzeugt, so schwingt der obere Teil mit der Turbine und den Schwimmkörpern gegenüber dem unteren Teil auf den Wellen. Aufgrund der Verbindung zu den ruhigeren Wassermassen in der Tiefe befindet sich im Inneren des unteren Rohres ein relativ konstanter Wasserspiegel.

Der obere Teil hingegen schwingt auf den Wellen und verändert so ständig das Volumen des im System befindlichen Hohlraumes. Der Ausgleich der Luftmassen findet mittels eines Luftstroms durch die kleinen Öffnungen im Deckel statt. Dieser Luftstrom trifft auf die Rotorblätter und treibt die Turbine an.

Der Generator liefert beim Ausströmen der Luft Strom für die LED, welche so bei jeder Wellenbewegung leuchtet.

Ein Video zu der nachgebauten OWC-Boje ist auf der im Anhang enthaltenen DVD zu sehen. Dieses zeigt den Betrieb der Boje im Hallenbad und verdeutlicht nochmals die Arbeits- und Funktionsweise des Kraftwerks.

5.1.5 Einsatz im Physikunterricht

Der Bau und der anschließende Einsatz der OWC-Boje ist im regulären Physikunterricht aufgrund von Zeitaufwand und Schwierigkeitsgrad schlecht möglich.

Auf der einen Seite werden nur alltägliche Gegenstände oder solche benötigt werden, die in jeder Physiksammlung vorhanden sind.

Auch ist der Effekt der Kraftwerksboje bereits bei kleineren Wellen ersichtlich, sodass nicht notwendigerweise ein großes Becken mit hohen Wellen benötigt wird. Ein Heben und Senken der Boje mit der Hand in einem großen, mit Wasser gefüllten Gefäß, wie z.B. einer Regentonne, verdeutlicht bereits die Arbeitsweise der Boje im Meer.

Auf der anderen Seite sind der zeitliche Aufwand von etwa zwei bis drei Stunden und die Kosten von etwa € 33,00 für den Bau der Boje für den Unterricht zu umfangreich und zu hoch.

Ebenso ist die Konstruktion der Anlage aufgrund des Schwierigkeitsgrades und des Einsatzes einer Bohrmaschine in den unteren Klassen problematisch.

Es bietet sich aber an, dieses Thema als Facharbeit an einzelne Schülerinnen und Schüler zu vergeben. Diese könnten die Kraftwerkstechnik und die Funktionsweise ausarbeiten, nachbauen und abschließend präsentieren.

Die OWC-Boje kann zudem als Thema in einer Projektwoche behandelt werden: Eine Gruppe aus drei bis vier Schülerinnen und Schülern macht sich zunächst Gedanken über die Grundlagen der Wellentheorie, baut anschließend eine OWC-Boje, testet diese in Zusammenarbeit mit der Sportfachschaft im Hallenbad und präsentiert abschließend die Ergebnisse, sowie die Vor- und Nachteile der Anlage.

Ein Arbeitsblatt mit allen benötigten Materialien und der Anleitung zum Nachbau des Wellenkraftwerks befindet sich im Anhang und kann z.B. für die Projektwoche verwendet werden.

5.1.6 Mögliche Probleme / Komplikationen

Ein mögliches Problem, welches bei der Konstruktion der Boje auftreten kann, ist die Befestigung des Generators. Zum optimalen Anströmen der Rotorblätter ist es notwendig, den Generator direkt über die in den Deckel gebohrten Löcher zu hängen. Dieses ist mit den Stativstangen nicht immer sofort möglich und erfordert evtl. den Einsatz weiterer Stangen und Klemmen.

Es bietet sich auch an, eine Gewindestange als Grundhalterung durch den Deckel zu montieren und mit Muttern auf beiden Seiten des Deckels zu fixieren. Hieran kann dann mit einer einzigen Klemme der Generator befestigt werden.

Wichtig beim Bau des Kraftwerks ist die Abstimmung des Generators auf die zu betreibende Lampe bzw. LED. Auf der einen Seite muss der Generator eine entsprechend große Leistung bringen, damit eine Glühlampe betrieben werden kann. Andererseits lässt sich ein leistungsstarker, schwergängiger Generator durch den leichten Luftstrom nicht bewegen. In diesem Fall sind Tests verschiedener Generatoren und LEDs hilfreich, sofern diese zur Verfügung stehen.

Beim Bau und dem anschließenden Test der Anlage hat sich herausgestellt, dass es am sinnvollsten ist, einen möglichst leichtläufigen Generator mit einer hohen Drehzahl zu betreiben und daran eine LED mit geringer Leistung anzuschließen.

Auch ist das Austarieren der Anlage wichtig. Diese sollte möglichst senkrecht im Wasser hängen und sich bei Wellen nur wenig neigen, da sonst die Schwingung des äußeren Rohres durch Reibung abgebremst wird. Es bietet sich an, das äußere Rohr zum einen im unteren Bereich mit Steinen zu beschweren. Diese können in kleine Säcke gepackt mit Band befestigt werden. Zum anderen muss das Rohr im oberen Bereich mit ausreichend Schwimmkörpern versehen werden. So wird der Schwerpunkt der Anlage nach unten verlagert und das Neigen reduziert.

Auf Grund der vielen möglichen Komplikationen beim Bau und Betrieb der Anlage ist ein hoher Grad an Tüfteln und Ausprobieren nötig. Dieser verlängert zwar auf der einen Seite den zeitlichen Aufwand für die Konstruktion der Anlage. Auf der anderen Seite wird aber der Einfallsreichtum und die Improvisation der Schülerinnen und Schüler gefragt und damit gefördert.

5.2 Der Archimedische Wellenschwinger

Nachfolgend wird nun die Bauanleitung für ein Modell des in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Archimedischen Wellenschwingers gegeben.

5.2.1 Vorüberlegungen

Der Archimedische Wellenschwinger ist ein Wellenkraftwerk, welches mit Druckunterschieden in der Tiefe arbeitet. Die völlig untergetauchte Anlage ist von den Wellen an der Oberfläche zunächst nicht direkt betroffen. Darüber hinweg laufende Wellen verursachen aber Druckschwankungen, welche den schwebenden Hohlkörper zum Schwingen anregen.

Abb. 44: Der Archimedische Wellenschwinger besteht aus zwei sich relativ zu einander bewegenden Hohlzylindern. Ein Linear- motor wandelt diese Bewegung in elektrische Energie um.

[Quelle: http://www.uni-leipzig.de/~grw/welle/wenergie_2_off.html]



Linearmotoren wandeln diese Relativbewegung gegenüber einem ruhenden Zylinder im Inneren in elektrische Energie um. Abbildung 44 zeigt die Anlage in einer Animation.

Dass der Nachbau eines solchen Kraftwerks für den Schulunterricht in einem deutlich kleineren Maßstab erfolgen muss, ist allein aus logistischen Gründen ersichtlich.

Da es für den Physikunterricht in der Schule schwierig ist, Hohlkörper herzustellen, welche auf feinste Druckunterschiede reagieren und Linearmotoren in der Anschaffung hohe finanzielle Kosten erfordern, wird sich diese Anleitung auf den Bau eines Modells beschränken, welches lediglich das Archimedische Prinzip beschreibt.

Dennoch steht dieses Modell stellvertretend für die Arbeits- und Funktionsweise des eigentlichen Wellenschwingers und verdeutlicht das Archimedische Prinzip mit einfachen Mitteln.

5.2.2 Benötigte Materialien

Der Nachbau des Archimedischen Wellenschwingers soll mit möglichst einfachen und alltäglichen Gegenständen hergestellt werden. In diesem Fall sind es sogar Materialien, welche fast jede Schülerin und jeder Schüler schon einmal in der Hand hatte und in jedem Haushalt vorhanden sind.

Die benötigten Materialien für den Nachbau eines Archimedischen Wellenschwingers:

- Ein Ferrero-Überraschung-Ei
- Sechs bis zehn kleine Bohnen
- Schlüssel-Schraube (8 x 100 mm)
- M8 Mutter
- Messer

Eine genauere Auflistung der benötigten Materialien, sowie deren Kosten und Beschaffungsorte befindet sich im Anhang.

Die Kosten für einen Wellenschwinger betragen € 2,48 (vgl. Materialliste im Anhang) und können ggf. abweichen. Auch lassen sich die Kosten verringern, wenn die Schülerinnen und Schüler evtl. eigene Materialien wie beispielsweise die innere Kunststoff-Hülle eines Überraschungseies mitbringen können.

5.2.3 Konstruktion der Anlage

Zunächst muss das Überraschung-Ei ausgepackt und die Schokolade vom eigentlichen Ei getrennt werden. Das enthaltene Spielzeug, sowie die Schokolade können anderweitig verwendet werden.

Das gelbe Ei wird in seine beiden Einzelteile zerlegt, von denen zunächst das größere und höhere Teil benötigt wird.

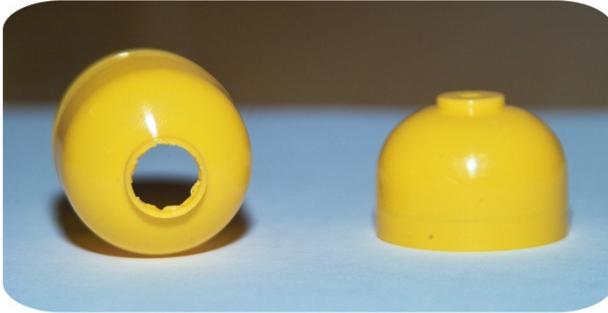


Abb. 45: Bei der größeren Ei-Hälfte wird der Fuß mit einem Messer aufgeschnitten. Die kleinere Hälfte bleibt ganz erhalten.

Mit dem Messer wird bei der größeren Ei-Hälfte das Innere des Ei-Fußes aufgeschnitten, sodass ein Loch von ca. 1 cm entsteht.

Hierbei ist bei den Schülerinnen und Schülern insbesondere auf die Verletzungsgefahr mit dem Messer hinzuweisen, da ein Abrutschen möglich ist. Die nebenstehende Abbildung zeigt das entstandene Loch.

Nun wird die Schraube durch das Loch gesteckt. Hierbei sollte sich der Schraubenkopf außerhalb der Ei-Hälfte befinden. Die Mutter wird ein kleines Stück auf das Gewinde der Schraube gedreht und befindet sich im Inneren der Ei-Hälfte. Die Ei-Hälfte kann nun über die Schraube bewegt werden, aber nicht mehr entweichen. Abbildung 46 verdeutlicht diese Konstruktion.



Abb. 46: Die Schraube wird durch das Loch im Ei gesteckt. Anschließend wird die Mutter aufgeschraubt.

Zum Anpassen des Masse-Volumen-Verhältnisses werden nun etwa sechs Bohnen in die so eben eingebaute Ei-Hälfte gelegt. Diese dienen dazu, dass das Ei unter Wasser schwebt und so mit den Wellen schwingen kann. Die genaue Anzahl der Bohnen richtet sich nach deren Größe und ist durch Ausprobieren zu ermitteln.



Nun wird das Ei mit der zweiten Hälfte verschlossen. Wichtig hierbei ist, dass dieses nicht über, sondern unter Wasser geschieht und jede Möglichkeit von Lufteinschlüssen vermieden wird. Dieses ist ebenfalls dafür notwendig, dass das Masse-Volumen-Verhältnis des Eies ausgeglichen ist und dieses unter Wasser schweben kann.

Im Inneren des Eies befinden sich nun die sechs Bohnen, das Wasser und die Mutter, welche auf der Schraube sitzt und verhindert, dass das Ei von der Schraube rutscht.

Abb. 47: Der gesamte Aufbau des Wellenschwingers besteht aus der Schraube mit dem aufgesetzten Ei. In diesem befinden sich Bohnen, Wasser und die Mutter als Halt.

Die gesamte Konstruktion wird nun mit dem Schraubenkopf auf den Boden eines mit ausreichend Wasser gefüllten Gefäßes gestellt. Das Ei befindet sich am oberen Ende der Schraube und lässt sich gegenüber dieser leicht bewegen.

Das gesamte Modell außerhalb des Wassers ist noch einmal in Abbildung 47 dargestellt.

5.2.4 Betrieb der Anlage

Das Modell des Archimedischen Wellenschwingers wird wie oben beschrieben mit dem Schraubenkopf auf den Boden eines mit Wasser gefüllten Gefäßes gestellt. Das Ei befindet sich am anderen Ende der Schraube und schwebt im Wasser.

Hierbei ist es wichtig, dass sich mindestens fünf Zentimeter Wasser über dem Ei befinden und dieses somit vollständig untergetaucht ist. Ragt das Ei aus dem Wasser, so wird nicht genügend Auftrieb erzeugt und das Ei kann nicht schwingen, sondern bleibt auf der Schraube liegen.

Werden in dem Gefäß mit der Hand oder einem kleinen Brett leichte Wellen erzeugt, so entstehen Druckschwankungen in der Tiefe. Diese führen dazu, dass sich das Ei hebt und senkt.

Durch die Verbindung des Eies zur Schraube und die aufgesetzte Mutter kann das Ei nicht ganz von der Schraube weg treiben, sondern senkt sich nach dem Vorbeilaufen der Welle wieder auf die Schraube ab.

Die Relativbewegung des Eies gegenüber der Schraube im Modell würde durch die Linearmotoren im Original in elektrische Energie umgewandelt werden.

Auf der sich im Anhang befindenden DVD ist ein Video enthalten, welches das Modell des Archimedischen Wellenschwingers im Einsatz zeigt und dessen Funktionsweise veranschaulicht.

5.2.5 Einsatz im Physikunterricht

Gegenüber der OWC-Boje in Kapitel 5.1 ist die Behandlung des Archimedischen Wellenschwingers im regulären Physikunterricht gut möglich.

Aufgrund des geringen zeitlichen Aufwands von ca. 15 Minuten und des leichten Schwierigkeitsgrades ist die Behandlung dieses Wellenkraftwerks auch in einer Einzelstunde möglich.

Zwar wird mit diesem Modell nicht das komplette Kraftwerk konstruiert und auch nicht die eigentliche Energiegewinnung nachgebaut, aber dennoch ist die gesamte Funktionsweise des Wellenschwingers verdeutlicht. Zudem ist der materielle Aufwand zum Bauen des Modells sehr gering und kostengünstig.

Anbieten würde sich die Konstruktion eines solchen Wellenschwingers demnach direkt im regulären Unterricht beispielsweise zum Thema des Archimedischen Prinzips.

Vorteilhaft bei dieser Konstruktion ist ebenfalls, dass die Schülerinnen und Schüler am Ende ihre eigenen Wellenschwinger mit nach Hause nehmen und dort im vollen Umfang wieder einsetzen können.

Besonders gut geeignet ist der Nachbau des Wellenschwingers daher für die Klassen der Sekundarstufe I. Die einfache Anleitung und die wenigen benötigten Materialien ermöglichen es bereits jungen Schülerinnen und Schülern das Modell selbstständig zu konstruieren.

Im Anhang befindet sich ein Arbeitsblatt, welches als Vorlage für den Nachbau eines Wellenschwingers im Unterricht dienen kann.

5.2.6 Mögliche Probleme / Komplikationen

Das einzige, möglicherweise auftretende Problem ist, dass die Schrauben bei zu starken Wellen nicht auf ihrem Kopf stehen bleiben, sondern umkippen. Um dieses zu vermeiden, können die Schrauben mit etwas Kleber auf dem Boden des Gefäßes fixiert werden. Auch die Verwendung von doppelseitigem Klebeband bietet sich zur Lösung dieses Problems an.

5.3 Die Brandl-Generator-Boje

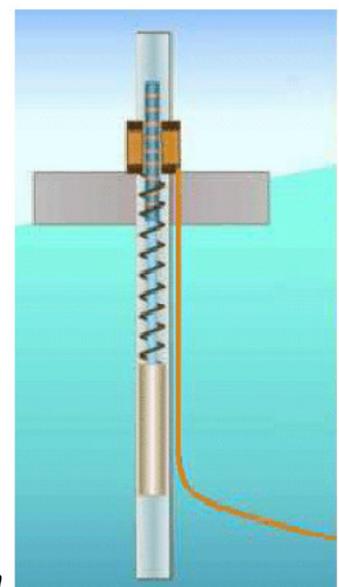
Nachfolgend eine Bauanleitung und Informationen zum Nachbau der im Kapitel 3.2.5 beschriebenen Brandl-Generator-Boje im Physikunterricht.

5.3.1 Vorüberlegungen

Das Prinzip, mit dem die Brandl-Generator-Boje arbeitet, ist das der elektromagnetischen Induktion. In diesem Fall wird kein Rotor durch Luft- oder Wassermassen angetrieben, sondern die Wellenbewegung wird direkt auf einen Linearmotor übertragen. Dieser besteht aus einem gegenüber einer Spule beweglich gelagertem Magneten.

Dies führt dazu, dass sehr wenig Bauteile verwendet werden und der Nachbau der Anlage mit schulischen und alltäglichen Materialien relativ einfach ist.

Abb. 48: Als Vorlage für einen Nachbau im Physikunterricht dient die Skizze des Herstellers.
[Quelle: Info-Flyer „Saubere Energie aus Meereswellen durch den Brandl Generator“, S. 2]



Aus Gründen der leichteren Bauweise wird der Magnet im Nachbau nicht wie im Original in Abbildung 48 am oberen Ende der Feder durch die Spule schwingen, sondern im unteren Bereich der Boje.

Direkt am Massestück hängend kann der Magnet durch die Spule schwingen, welche im Nachbau einfach in das Innere der Boje gestellt wird.

5.3.2 Benötigte Materialien

Der Nachbau einer Brandl-Generator-Boje benötigt relativ wenig Bauteile, die zudem zum Teil in der Physiksammlung zu finden sind. Dieses im Einzelnen:

- Kunststoffrohr A ($\varnothing_{\text{innen}}$: 110 mm, Länge: 600 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoffrohr B ($\varnothing_{\text{innen}}$: 41 mm, Länge: 200 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoff-Deckel ($\varnothing_{\text{Anschluss}}$: 110 mm)
- Styropor-Platte (Größe: 1 m², Stärke: 50 mm)
- Krepp-Klebeband
- Gewindestange M8 (Länge: 200 mm)
- 4 Muttern M8
- 2 Gummidichtungen (M8 für Gewindestange)
- Kleine Spule (12000 Windungen)
- Stabmagnet (Länge: 50 mm, \varnothing : 10 mm)
- Massestück (mit Aufhängung) Masse: 0,2 kg
- Feder (Länge: 100 mm, Federkonstante: 17,5 N/m)
- LED-Lampe (mit Fassung / Klemmen)
- Anschlusskabel
- Bohrmaschine inkl. Holzbohrer
- Messer

Eine detaillierte Auflistung aller benötigten Werkstoffe befindet sich im Anhang. Ebenso sind dort die einzelnen Beschaffungsorte und Preise der Materialien aufgelistet.

Der Kostenaufwand für die aufgeführten Materialien beträgt € 11,59. Dieser kann aber ggf. abweichen oder durch zum Teil bereits im Haushalt vorhandene Materialien reduziert werden.

5.3.3 Konstruktion der Anlage

Zunächst muss aus der Styropor-Platte mit dem Messer ein kreisrunder Schwimmkörper geschnitten werden, welcher die gesamte Anlage an der Wasseroberfläche hält. Dieser sollte einen Durchmesser von ca. 20 cm haben und in der Mitte mit einem Loch von zwölf Zentimetern Durchmesser versehen werden, durch welches das größere Rohr A gesteckt wird.

Der Schwimmkörper wird im oberen Drittel des Rohres angebracht und dient dazu, den Schwerpunkt der Boje nach unten zu verlagern, sodass diese in der vorgesehenen Weise senkrecht im Wasser hängt und nicht umkippt.

Die nebenstehende Abbildung zeigt den zugeschnittenen Schwimmkörper am Rohr A. Dieser muss evtl. mit Klebeband fixiert werden, wenn das innere Loch nicht passgenau zugeschnitten wurde, weil sonst ein Verrutschen möglich ist.

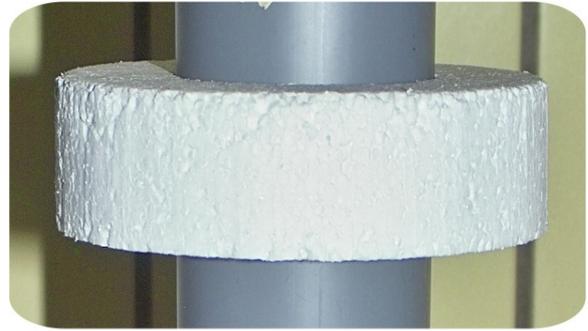


Abb. 49: Der Schwimmkörper wird möglichst so zugeschnitten, dass er über das Rohr A geschoben von selbst hält.

Anschließend wird das Rohr A am unteren Ende mit dem Deckel wasserdicht verschlossen.

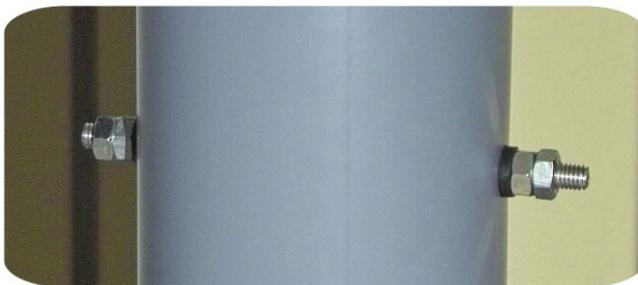


Abb. 50: Durch die Bohrlöcher wird die Gewindestange gesteckt und mit Muttern fixiert. Die Gummidichtungen verhindern das Eindringen von Wasser.

Des Weiteren müssen zwei sich gegenüberliegende Löcher in das Rohr A gebohrt werden. Diese haben zum unteren Deckel einen Abstand von ca. 0,35 m und dienen später mit der Gewindestange zum Aufhängen der Feder. Die Abbildung 50 zeigt diese Konstruktion bereits mit der Gewindestange im Detail.

An die Spule werden zwei Kabel angeschlossen, welche später mit der LED verbunden werden. Das kleine Rohr B wird auf die Öffnung durch das Spulenninnere gestellt und dort mit dem Krepp-Klebeband fixiert. Es dient als Führung für den schwingenden Magneten. Verdeutlicht ist dieses in Abbildung 51.

Anschließend wird die Spule so innen auf den verschlossenen Boden des großen Rohres A gestellt, dass von oben durch das Führungsrohr B der Magnet durch die Spule schwingen kann. Die Kabel werden dabei im Inneren des großen Rohres A nach oben geführt. Die LED wird später auf der Boje befestigt.

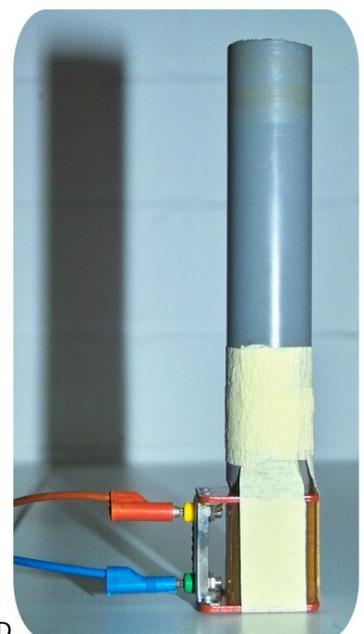


Abb. 51: Auf die Spule wird das kleine Rohr B als Führung für den Magneten gesetzt. Die Kabel verbinden die Spule mit der LED.



Das Massestück wird an einer Seite der Feder und diese später mit dem anderen Ende an der Gewindestange befestigt. Der Stabmagnet wird mit einem Ende von unten an das Massestück gehängt. Der genaue Aufbau ist in der nebenstehenden Abbildung zu erkennen.

Anschließend wird diese Konstruktion so in das kleinere Rohr B gehängt, dass der Magnet über das Massestück und die Feder frei im Inneren der Spule schwingen kann. Die Gewindestange dient dabei ähnlich wie die Stativstange in der nebenstehenden Abbildung als Aufhängung der Feder und wird mit den Muttern an den vorgebohrten Stellen fixiert.

Abb. 52: Der Magnet wird von unten an das Massestück gehängt, welches an der Feder schwingen kann. Aufgehängt ist diese hier an einer Stativstange und später in der Boje an der Gewindestange.

Die Gummidichtung verhindert das Eindringen von Wasser in das Rohr A und wird vor die Muttern über die Gewindestange gelegt, sodass das Bohrloch abgedichtet wird (vgl. Abbildung 50).

Wichtig bei der Installation der Gewindestange ist, dass sich die Federaufhängung direkt in der Mitte über dem Führungsrohr befindet, damit das Massestück mit möglichst wenig Energieverlust durch Reibung schwingen kann. Es bietet sich an, die Feder an der passenden Stelle mit dem Krepp-Klebeband an der Gewindestange zu fixieren.

Zuletzt wird die LED an den Klemmen befestigt und mit den Kabeln, welche oben aus der Boje gelegt werden, an die Spule angeschlossen. Die LED kann mit der Halterung und dem Klebeband oben auf der Boje fixiert werden, wie es in der nebenstehenden Abbildung verdeutlicht ist.

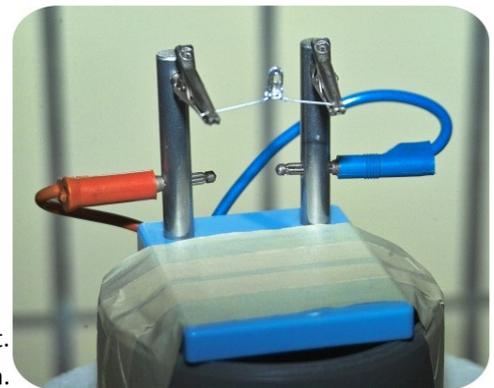


Abb. 53: Auf der Boje wird die Halterung der LED angebracht. Mit den Kabeln ist diese an die Spule angeschlossen.

Zu beachten ist hierbei, dass die Kabel im Inneren der Boje nicht in die Nähe der Feder gelangen und sich in dieser verfangen können. Das Massestück würde dann nicht frei schwingen und der Magnet das Innere der Spule ggf. nicht treffen.

Die gesamte Boje ist nun konstruiert und kann in Betrieb genommen werden. Abbildung 54 zeigt die Boje in ihrer abschließenden Form außerhalb des Wassers.

5.3.4 Betrieb der Anlage

Die Boje wird für den Betrieb einfach in ein großes Becken mit Wasser, z.B. eine Regentonne oder ein Schwimmbad gesetzt.

Bereits beim Heben und Senken des Schwimmkörpers durch Wellen mit geringer Höhe wird das Massestück im Inneren an der Feder in eine schwingende Bewegung relativ zum Rohr selbst versetzt. Der daran befindliche Magnet schwingt ebenfalls und bewegt sich relativ zur Spule.

Durch das veränderliche Magnetfeld in der Spule wird nach der Lenzschen Regel bei jeder Bewegung des Magneten ein Induktionsstrom induziert, welcher die Diode zum Aufblinken bringt.

Ein Video vom Betrieb der Boje im Schwimmbad befindet sich auf der DVD im Anhang und verdeutlicht nochmals die Funktionsweise der Brandl-Generator-Boje.



Abb. 54: Der Nachbau der Brandl-Generator-Boje in seiner endgültigen Form.

5.3.5 Einsatz im Physikunterricht

Die Brandl-Generator-Boje ist ein gut im Physikunterricht nachzubauendes Wellenkraftwerk. Fast alle hierfür benötigten Materialien befinden sich bereits in der Physiksammlung und die zusätzlich benötigten Gegenstände sind für wenig Geld im Baumarkt erhältlich.

Der Bau der Anlage ist in einem relativ kurzen Zeitraum von 30 bis 45 Minuten durchführbar und somit auch in den regulären Physikunterricht zu integrieren. Für Gruppen von drei bis vier Schülerinnen und Schülern ist es somit möglich, die Boje innerhalb einer Doppelstunde nachzubauen und deren Funktion zu testen.

Die Konstruktion der Anlage ist von mittlerem Schwierigkeitsgrad und kann daher in der Mittel- und Oberstufe durchgeführt werden.

Ebenso kann der Bau dieses Bojen-Typs wie die OWC-Boje aus Kapitel 5.1 aber auch in einer Projektwoche durchgeführt werden, wobei dann das Arbeitsprinzip untersucht und präsentiert werden kann. Genauso kann das Thema aber auch als Facharbeit vergeben werden.

Da das Prinzip, mit welchem der Brandl-Generator arbeitet, ein völlig anderes gegenüber den anderen Kraftwerken ist, bietet es sich an, diese Boje als eine andere Alternative der Nutzung von Wellenenergie zu betrachten und zu untersuchen.

Zugleich kann beim Nachbau dieses Bojen-Typs das Prinzip der elektromagnetischen Induktion aufgefrischt werden.

Ein Arbeitsblatt zum Nachbau einer Brandl-Generator-Boje befindet sich im Anhang. Dieses kann als Grundlage für die Gruppenarbeit oder auch als Information für eine Facharbeit dienen.

5.3.6 Mögliche Probleme / Komplikationen

Schwierig beim Nachbau der Brandl-Generator-Boje ist die Führung des Massestücks im inneren Rohr. Beim Schwingen in den Wellen wird die Boje zum Teil auch in eine Schiefelage versetzt. Hierdurch kann das Massestück im Inneren des Führungsrohres nicht frei nach unten schwingen, sondern reibt über die Wand des Rohres. Die Reibung führt zu einer Verlangsamung der Schwingung, sodass der erzeugte Induktionsstrom evtl. nicht ausreicht, um die LED zu betreiben.

Um dieses zu vermeiden, muss der Schwerpunkt der Boje weiter nach unten verlagert werden, sodass sie senkrecht im Wasser hängt und weniger anfällig für die Schiefelage ist. Möglich ist dieses durch zusätzliche Gewichte im unteren und Schwimmkörper im oberen Bereich.

Es ist evtl. ebenfalls notwendig, die Masse der Boje dem Auftrieb anzupassen. Da das Volumen des Rohres nicht variabel ist, muss die Masse des Kraftwerks variiert werden, damit die Boje optimal im Wasser hängt und effektiv schwingen kann. Hierzu können kleine Steine hilfreich sein, die nach Bedarf mit in das Rohr gelegt werden, um die Boje zu beschweren.

6) Zusammenfassung

Die Kraft der Meere in Form von Wellen ist eine unerschöpfliche Energiequelle.

In Zeiten knapper werdender Erdöl- und Erdgasreserven, sowie steigendem Energiebedarf ist es nicht nur aus energiepolitischem Denken notwendig, alternative Energiequellen zu nutzen. Auch aus Umweltgesichtspunkten ist eine Nutzung von regenerativen und emissionsarmen Energieträgern dringend empfehlenswert.

Die Nutzung der Wellenenergie bietet eine solche Möglichkeit.

Mit den verschiedenen Arten der oben genannten Kraftwerke lässt sich die Energie der Meereswellen in vielen Regionen der Erde situationsangepasst nutzen. Auch eine Kombination mit anderen Technologien wie der Windenergie, der Staudammtechnik oder dem Küstenschutz ist möglich.

Je nach Situation sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Anlagen abzuwägen und deren Installation zu prüfen. Bedeutend ist aber bei allen Wellenkraftwerken der Vorteil des CO₂-freien Betriebs. Einmal installiert benötigen die meisten Anlagen nur noch geringe Wartung und liefern Energie aus einer unerschöpflichen Quelle.

Aufgrund dieser enormen Bedeutung der Wellenenergie als eine Energiequelle der Zukunft ist es wichtig, sich mit ihr auch in der Schule auseinander zu setzen. Bereits in den unteren Klassen können die Funktionsweisen und die Einsatzmöglichkeiten einzelner Anlagen besprochen und diskutiert werden. In der Oberstufe ist dann auch die Erarbeitung von Grundlagen der Wellentheorie möglich.

Mit den in dieser Arbeit gegebenen Anleitungen zum Nachbau einzelner Wellenkraftwerke ist es möglich, sich den Aufbau und die Funktionsweise dieser Anlagen direkt im Unterricht am Modell zu verdeutlichen. Auch kann durch die Kombination von Physikunterricht, Projektwoche und Kraftwerksbau sowohl das Verständnis solcher Anlagen, als auch die Kreativität der Schülerinnen und Schüler gefördert werden.

Bietet doch die Schule nicht nur die Möglichkeit, mit anschaulichen Experimenten die physikalischen Zusammenhänge zu erläutern und die Schülerinnen und Schüler mit in die Gestaltung des Unterrichts einzubeziehen, sondern diese auch anhand der verschiedenen Kraftwerksmodelle frühzeitig für einen verantwortungsvollen Umgang mit Energie zu sensibilisieren.

So kann bereits in der Schule die Notwendigkeit der effizienten Energienutzung und deren Gewinnung aus alternativen Energiequellen vermittelt werden.

7) Glossar

Nachfolgend Erklärungen und Erläuterungen zu Namen und einigen ungebräuchlichen oder technischen Begriffen:

Archimedes	Griechischer Mathematiker und Physiker (285 – 212 v. Chr.), der in Syrakus auf Sizilien lebte. ¹³² Archimedes war Entdecker der Kreiszahl π , sowie der Entwickler der archimedischen Spirale. Bedeutenden Einfluss in der Physik erlangte Archimedes bei der Entdeckung des Hebelgesetzes und dem Auftriebsgesetz, dem sogenannten archimedischen Prinzip.
Dispersion	Als Dispersion bezeichnet man die Abhängigkeit einer physikalischen Größe von der Wellenlänge. ¹³³ So hängt beispielsweise die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Meereswelle von deren Länge ab.
Mighty-Whale-OWC-Kraftwerk	Bezeichnung für ein Kraftwerk, welches die OWC-Technik nutzt und von der Form her an einen großen Wal (engl.: mighty whale) erinnert.
Nodding duck	Englischer Begriff für „nickende Ente“. Bezeichnet wird mit diesem tierischen Vergleich ein Wellenkraftwerk bestehend aus halbgetauchten Schwimmkörpern, deren Form an den Kopf einer Ente erinnern und welche mit den Wellen schwingen.
OWC	Abkürzung für den englischen Ausdruck „oscillating water column“, welcher eine oszillierende, d.h. in der Höhe schwankende Wassersäule beschreibt. Auf diesem Prinzip beruht die Funktionsweise vieler Wellenkraftwerke.
Pelamis	Der griechische Begriff für „Seeschlange“. Das Pelamis-Kraftwerk hat seinen Namen von seiner schlangenartigen Form.
Schwerewelle	Begriff für eine gegen die Gravitation angehobene Wassermasse, in welcher der größte Anteil an Energie einer Meereswelle gespeichert ist.
Tocado	Bezeichnung für ein von der holländischen Firma Teamwork Technology BV entwickeltes Wellenkraftwerk, welches in den Kanälen entlang der niederländischen Küste installiert wird.

¹³² Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG: *Das große Welt Lexikon in 21 Bänden*, Band 1, S. 425.

¹³³ Gaede, P.-M. u.a.: *GEO Themenlexikon in 20 Bänden*, Band 6, S. 184.

Trochoide	Mit dem Begriff Trochoiden werden verlängerte oder verkürzte Zykloiden bezeichnet. Das Profil einer Meereswelle entspricht dem einer verkürzten Zykloide, d.h. die Wellentäler sind breiter als die Berge der Welle. ¹³⁴
Wave-Dragon	Englischer Begriff für „Wellen-Drachen“. Bezeichnet wird mit diesem Begriff ein Wellenkraftwerk, welches die anlaufenden Wellen mit ausladenden „Armen“ auf ein höher gelegenes Bassin fokussiert.
Zykloide	Als allgemeine Zykloide bezeichnet man eine Kurve, welche von einem Punkt auf einem Kreis beschrieben wird, der entlang einer Geraden rollt, ohne dabei zu gleiten. ¹³⁵

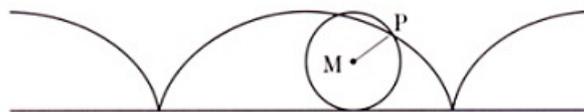


Abb. 55: Eine gewöhnliche Zykloide.

[Quelle: <http://www.wissenschaft-online.de/sixcms/media.php/373/thumbnails/zykloide.jpg.108371.jpg>]

¹³⁴ Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, S. 198.

¹³⁵ Bronstein, I.N. u.a.: *Taschenbuch der Mathematik*, S. 101.

8) Literaturverzeichnis

8.1 Bücher

- [1]. Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG: *Das Große Welt Lexikon in 21 Bänden*. Band 1, Axel Springer AG, Berlin 2007.
- [2]. Bronstein, I.N., Semendjajew, K.A., Musiol, G. und Mühlig, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. 5. Auflage, Harri Deutsch Verlag, Frankfurt am Main 2001.
- [3]. Dorn, F. und Bader, F.: *Physik Sek. II – Gymnasium Gesamtband*. Schroedel-Verlag, Hannover 2005.
- [4]. Eckener, U., Kröger, T. und Dursthoff, W.: *Systemuntersuchung Technologie und Nutzung der Wellenenergie*. Forschungsbericht FB T 81-117 des Bundesministeriums für Forschung und Technologie. Repro-Dienst GmbH, Freiburg 1981.
- [5]. Erbrecht, R., Felsch, M., König, H., Kricke, W., Martin, K., Pfeil, W., Winter, R. und Wörstenfeld, W.: *Das Große Tafelwerk interaktiv – Formelsammlung für die Sekundarstufe I und II*. Cornelsen Verlag, Berlin 2003.
- [6]. Fischer, T. und Dorn, H.-J.: *Physikalische Formeln und Daten*. Klett Verlag, Stuttgart 2004.
- [7]. Fricke, J. und Borst, W.L.: *Energie aus dem Meer*. In: Physik in unserer Zeit, Heft Nr. 3, Seite 85 bis 94, Chemie Verlag, Weinheim 1979.
- [8]. Gaede, P.-M., Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG: *GEO Themenlexikon in 20 Bänden*. Band 6, GEO, Gruner+Jahr AG & Co KG und Bibliographisches Institut, Mannheim 2007.
- [9]. Gaede, P.-M., Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG: *GEO Themenlexikon in 20 Bänden*. Band 8, GEO, Gruner+Jahr AG & Co KG und Bibliographisches Institut, Mannheim 2007.
- [10]. Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*. In: Physik in unserer Zeit, Heft Nr. 2, Seite 82 bis 88, Chemie Verlag, Weinheim 2002.
- [11]. Matthöfer, H.: *Energiequellen für Morgen? – Nichtnukleare, nichtfossile Primärenergiequellen*. Umschau Verlag, Frankfurt am Main 1976.
- [12]. Meschede, D.: *Gerthsen Physik*. 22. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg 2004.
- [13]. Meyer, L. und Schmidt, G.-D.: *Duden Physik – Basiswissen Schule*. Bibliografisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim, und DUDEN PAETEC GmbH, Berlin 2005.
- [14]. Pfeifer, H., Schmiedel, H. und Stannarius, R.: *Kompaktkurs Physik*. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2004.

- [15]. Ruprecht, A.: *Strom aus dem Meer*. In: Jahrbuch 2007 der Universität Stuttgart „Wechselwirkungen“. Stuttgart 2007.
- [16]. Scheil, C.: *Seeschlange mit Auftrieb – Die Wellenenergie des Atlantiks soll genutzt werden*. In: tec21 – Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt, Ausgabe 47/2002, Seite 15 bis 16, Verlags-AG der akademischen technischen Vereine, Zürich 2002.
- [17]. Taylor, R. H.: *Alternative Energy Sources for the centralised generation of electricity*. Adam Hilger Ltd., Bristol 1983.
- [18]. Tipler, P.A. und Mosca, G.: *Physik*. 2. Auflage, Spektrum Verlag, München 2004.

8.2 Internetseiten

- [19]. <http://www.gfds.de/index.php?id=11>
[Stand: 24. Januar 2009]
- [20]. <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/ziele-der-energiepolitik,did=9170.html>
[Stand: 24. Januar 2009]
- [21]. <http://www.handelsblatt.com/finanzen/rohstoffe/oel-bleibt-auf-lange-sicht-teuer;2025032>
[Stand: 24. Januar 2009]
- [22]. http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/wellen_w.htm
[Stand: 24. Januar 2009]
- [23]. http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/data/kap5/gezeit_w.htm
[Stand: 24. Januar 2009]
- [24]. http://www.calsky.com/lexikon/de/txt/d/di/dispersion_wasserwellen_.php
[Stand: 25. Januar 2009]
- [25]. <http://encyclopedie-de.snyke.com/articles/wasserwelle.html>
[Stand: 25. Januar 2009]
- [26]. http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte_100/104_2001/104_2001_WEKatalyse.htm
[Stand: 25. Januar 2009]
- [27]. http://www.thew2o.net/events/oceanenergy/images/wave_energy.pdf
[Stand: 25. Januar 2009]
- [28]. <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Vorhersagen/Gezeiten/809.jsp>
[Stand: 26. Januar 2009]
- [29]. <http://www.weltderphysik.de/de/5252.php>
[Stand: 26. Januar 2009]
- [30]. http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte_099/59_1999/59_1999_hansa.htm
[Stand: 26. Januar 2009]
- [31]. http://www.uni-leipzig.de/~grw/welle/wenergie_2_off.html
[Stand: 26. Januar 2009]

- [32]. <http://www.tocado.com/>
[Stand: 17. Januar 2009]
- [33]. <http://www.marineturbines.com/18/projects/>
[Stand: 17. Januar 2009]
- [34]. <http://www.marineturbines.com/21/technology/>
[Stand: 17. Januar 2009]
- [35]. <http://www.energycurrent.com/index.php?id=3&storyid=8705>
[Stand: 06. November 2008]
- [36]. <http://www.oceanpowertechnologies.com/>
[Stand: 06. November 2008]
- [37]. http://www.contitech.de/pages/presse/presse-uebersicht/presse-messen/2008/080418_hm_01/presse_de.html
[Stand: 06. November 2008]
- [38]. <http://brandlmotor.de/pics/OAS-System.gif>
[Stand: 06. November 2008]
- [39]. <http://www.wavec.org/index.php/17/technologies/>
[Stand: 12. Dezember 2008]
- [40]. <http://www.wissenschaft-online.de/sixcms/media.php/373/-thumbnails/zykloide.jpg.108371.jpg>
[Stand: 05. Januar 2009]
- [41]. <http://www.kinesiologie-bewegung.ch/bilder/welle.jpg>
[Titelbild; Stand: 06. November 2008]

8.3 Sonstige Quellen

- [42]. Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW: *Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule in NRW – Physik*. 1. Auflage, Ritterbach-Verlag GmbH, Frechen 1999.
- [43]. Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW: *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen*. 1. Auflage, Ritterbach-Verlag GmbH, Frechen 2008.
- [44]. Broschüre *Ocean Energy Conversion in Europe – Recent advancements and prospects*. Herausgegeben von: Centre for Renewable Energy Sources. Griechenland, 2006.
- [45]. Handout „*OWC-Wellenbrecher*“ der Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Prof. Dr.-Ing. K.-U. Graw. Leipzig 2001.
- [46]. Handout „*Plattenwellenbrecher*“ der Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Prof. Dr.-Ing. K.-U. Graw. Leipzig 2001.
- [47]. Präsentation „*AWS MK II – Deployment, monitoring and evaluation of a prototype advanced wave energy device*“. AWS Ocean Energy Ltd., Luc Hamilton, Schottland 2006.

- [48]. Info-Flyer „*Saubere Energie aus Meereswellen durch den Brandl Generator*“. Brandl Motor, Berlin 2006.
- [49]. ZDF-Dokumentationssendung „Abenteuer Wissen“ vom 07.01.2009, 22:30 – 23.00 Uhr. Titel der Sendung: *Energie aus dem Meer*. ZDF, Mainz 2009.

10) Anhang

Folgende Materialien sind im Anhang enthalten:

- Arbeitsblatt „Anleitung zum Nachbau einer OWC-Boje“
(3 Seiten)
- Materialliste für den Nachbau einer OWC-Boje
(1 Seite)
- Arbeitsblatt „Anleitung zum Nachbau eines Archimedischen Wellenschwingers“
(2 Seiten)
- Materialliste für den Nachbau eines Archimedischen Wellenschwingers
(1 Seite)
- Arbeitsblatt „Anleitung zum Nachbau einer Brandl-Generator-Boje“
(3 Seiten)
- Materialliste für den Nachbau einer Brandl-Generator-Boje
(1 Seite)
- DVD zur Masterarbeit „Wellenenergie und ihre Nutzung“
(1 Seite inklusive DVD)

Arbeitsblatt

„Anleitung zum Nachbau einer OWC-Boje“

Zeitaufwand: 2 – 3 Std.

Kosten:

ca. € 33,00

Schwierigkeitsgrad: Schwer

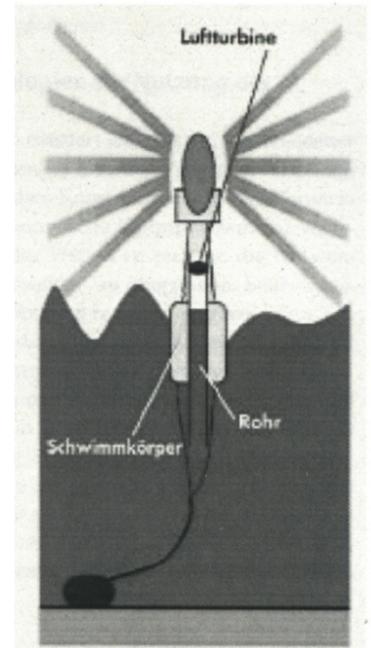
Vorbereitung:

Besorgung der Materialien

Die OWC-Boje besteht im Wesentlichen aus zwei relativ zueinander schwingenden Röhren. In einer Luftkammer wird so Luft komprimiert, welche beim Entweichen durch eine kleine Öffnung eine Turbine antreibt.

Die nebenstehende Abbildung zeigt die Original-Boje

[Quelle: Graw, K.-U.: *Wellenkraftwerke – Energiereservoir Ozean*, S. 85].



Benötigte Materialien:

- Generator mit Rotoraufsatz
- LED (passend zum Generator) mit Halterung
- Anschlusskabel
- Seil (Länge: 10 m, Ø: 1 mm)
- Spax-Holzschrauben (30 x 15)
- Stein (Masse: 5 kg)
- Stangen und Klemmen (zur Befestigung der Turbine)
- Bohrmaschine, Schraubendreher, Messer und Klebstoff
- Kunststoffrohr A (Ø_{außen}: 110 mm, Länge: 1200 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoffrohr B (Ø_{außen}: 125 mm, Länge: 1000 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoffrohr C (Ø_{innen}: 110 mm, Länge: 130 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoff-Reduzierstück von 1250 mm (innen) auf 1000 mm (innen)
- Kunststoff-Deckel (Ø_{Anschluss}: 110 mm)
- Styropor-Platte (Größe: 1 m², Stärke: 50 mm)

Konstruktion der Anlage:

1. In das Rohr A werden nahe des unteren Randes drei Löcher gebohrt, durch die das Seil zur Befestigung der Anlage am Stein gezogen werden kann. Die drei Löcher sollten gleichmäßig über den Rand des Rohres verteilt liegen, damit die Boje später möglichst senkrecht im Wasser hängt und wenig Schräglage bekommt.

Bild 1 zeigt diese Bohrlöcher für das Seil. Das Seil sollte so angebunden werden, dass später ein evtl. Korrigieren der Neigung im Wasser leicht möglich ist.

2. Das Rohr A wird im oberen Bereich von innen mit ein wenig Styropor ausgekleidet, damit es schwimmt.

Zum Zuschneiden der Schwimmkörper das Rohr A senkrecht auf die Styropor-Platte stellen und mit einem Stift um-malen. Anschließend das Styropor mit einem Messer ausschneiden. Zur Befestigung im Rohr dienen die Holz-Schrauben, damit das Styropor nicht heraus schwimmt.

Abbildung 2 zeigt einen ausgeschnittenen Schwimmkörper und dessen Befestigung.

3. Danach wird das Rohr A so mit den Seilen am Stein befestigt, dass es später senkrecht im Wasser schwimmt und etwa 10 bis 20 cm aus dem Wasser ragt (vgl. Bild 3).
4. Für den oberen Teil der Anlage benötigt man zunächst das Rohr B mit dem größten Durchmesser. Dieses soll anschließend durch die Wellen über dem senkrechten Rohr A schwingen und für die Luftbewegung sorgen.

Auf das große Rohr B wird zunächst das Reduzierstück für die nächst kleinere Stufe gesteckt. Dieses ist nur notwendig, da es in diesem Fall keine Abdeckkappe für das große Rohr gibt. Zum luftdichten Verschließen kann entweder der enthaltene Dichtungsring oder der Kleber verwendet werden.

Auf das reduzierte Ende wird nun das kurze Rohrstück C gesetzt und ebenfalls abgedichtet. Abbildung 4 zeigt diese Konstruktion.

5. Bevor der Deckel auf das schmalere Rohr-Ende (Rohr C) gesetzt werden kann, muss dieser zunächst bearbeitet werden. Mit einer Bohrmaschine wird so ein Loch in den Deckel gebohrt, dass der Generator mit den Stangen und Klemmen daran befestigt werden kann. Dann werden zwei bis drei kleinere Löcher in den Deckel gebohrt, sodass die hierdurch strömende Luft direkt auf die Rotorblätter am Generator treffen kann.

Die gesamte Konstruktion des Deckels ist im Bild 5 im Detail dargestellt. Auch die LED kann bereits mit den Kabeln an den Generator angeschlossen und muss ggf. festgeklebt werden.

6. Nachdem der Deckel auf der Rohrkonstruktion (Rohr B + Reduktion) montiert wurde, können nun Schwimmkörper angebracht werden. Diese haben die Form von Ringen, werden aus dem Styropor zugeschnitten und um das Rohr B gesetzt. Der Durchmesser der Styropor-Kreise sollte etwa 0,2 m betragen und das Loch im Inneren dem Durchmesser des großen Rohres B von 0,125 m entsprechen.

Abbildung 6 zeigt die Montage der Schwimmkörper. Die Anzahl der Ringe hängt davon ab, wie viel Auftrieb die Konstruktion benötigt, um an der Wasseroberfläche zu schwimmen und sich mit den Wellen zu bewegen.

Die gesamte äußere Konstruktion besteht nun aus dem großen Rohr B, dem Reduzierstück, dem kleineren Rohr C und dem Deckel mit dem montierten Generator. Bild 7 zeigt den oberen Teil dieser äußeren Konstruktion.

7. Abschließend können nun beide Teile (Rohr A mit Rohr B + Reduktion + Deckel) zusammengefügt und im Wasser montiert werden. Das Rohr A wird mit dem Seil und dem Stein senkrecht in das Wasser gehängt, sodass es etwa 0,1 m bis 0,2 m aus dem Wasser ragt.

Darüber wird nun die zweite Rohrkonstruktion (Rohr B + Reduktion + Deckel, vgl. Abbildung 7) gesetzt. Diese lässt sich gegenüber dem inneren Teil bewegen und die Anlage ist betriebsbereit.

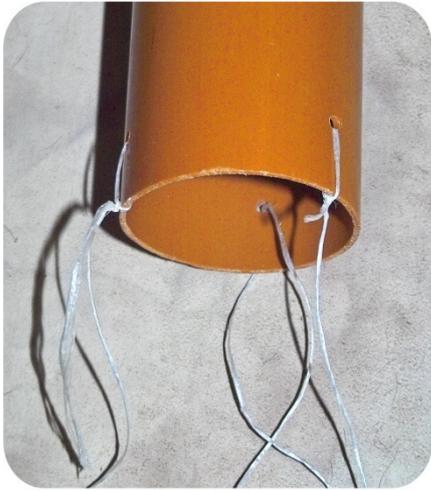


Abb. 1



Abb. 2

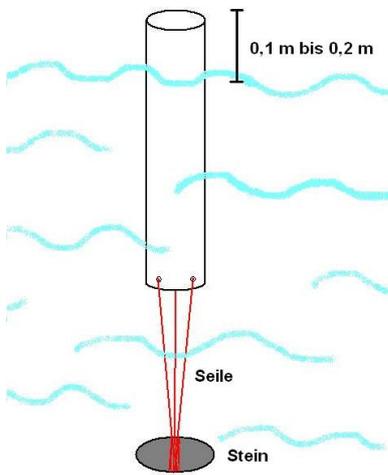


Abb. 3



Abb. 4



Abb. 5



Abb. 6



Abb. 7

Materialliste für den Nachbau einer OWC-Boje

Nachfolgend sind alle für den Nachbau einer OWC-Boje benötigten Materialien mit ihrem jeweiligen Beschaffungsort und den verbundenen Kosten im Detail aufgelistet:

Material	Beschaffungsort	Kosten
Kleiner Generator (z.B. Fahrraddynamo) mit Rotoraufsatz	Physiksammlung	€ 0,00
Kunststoffrohr Ø _{außen} : 110 mm Länge: 1500 mm Stärke: 5 mm	Baumarkt	€ 5,49
Kunststoffrohr Ø _{außen} : 125 mm Länge: 1000 mm Stärke: 5 mm	Baumarkt	€ 6,49
Kunststoffrohr (HT-Überschiebemuffe) Ø _{innen} : 110 mm Länge: 130 mm Stärke: 5 mm	Baumarkt	€ 2,99
Kunststoff-Reduzierstück (HG-Gussrohranschluss) von 1250 mm (innen) auf 1000 mm (innen)	Baumarkt	€ 6,29
Kunststoff-Deckel (HT-Muffenstopfen) Ø _{Anschluss} : 110 mm	Baumarkt	€ 1,29
Styropor-Platte Größe: 1 m ² ; Stärke: 50 mm	Baumarkt	€ 3,19
Klebstoff (z.B. Pattex-Alleskleber)	Baumarkt	€ 2,99
Seil Länge: 10 m, Ø: 1 mm	Baumarkt	€ 2,19
Spax-Holzschrauben 3 x 16 mm	Baumarkt	€ 1,89
Stein Masse: 5 kg	Natur	€ 0,00
LED (passend zum Generator) mit Halterung	Physiksammlung	€ 0,00
Volt- und Amperemeter	Physiksammlung	€ 0,00
Anschlusskabel	Physiksammlung	€ 0,00
Stangen und Klemmen (zur Befestigung der Turbine)	Physiksammlung	€ 0,00
Bohrmaschine	Haushalt	€ 0,00
Schraubendreher	Haushalt	€ 0,00
Messer	Haushalt	€ 0,00

Summe der Kosten : **€ 32,81** (Stand: 01/2009)

Arbeitsblatt

„Anleitung zum Nachbau eines Archimedischen Wellenschwingers“

Zeitaufwand: 10 – 20 Min.

Kosten:

ca. € 2,50

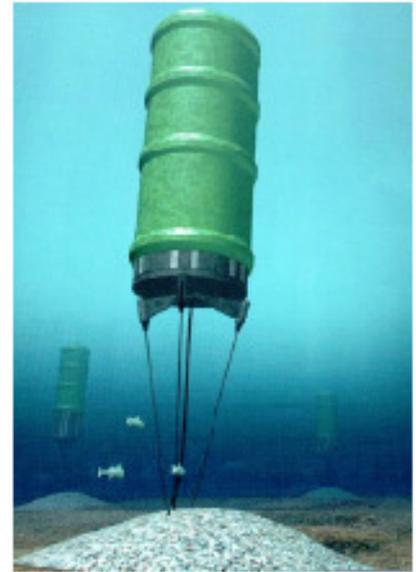
Schwierigkeitsgrad: Leicht

Vorbereitung:

Besorgung der Materialien

Der Archimedische Wellenschwinger besteht im Wesentlichen aus zwei relativ zueinander schwingenden Hohlkörpern. Der äußere Körper schwingt aufgrund von Druckschwankungen durch vorbeilaufende Wellen auf dem starren, inneren Körper. Linearmotoren erzeugen aus dieser Bewegung Elektrizität. Die nebenstehende Abbildung zeigt den Wellenschwinger in seiner eigentlichen Form.

Da die Beschaffung von Linearmotoren für den Physikunterricht recht aufwendig und kostspielig ist, soll in diesem Arbeitsprojekt lediglich das archimedische Prinzip und die Funktionsweise des Archimedischen Wellenschwingers nachgebaut werden. Das Modell ist aber in seiner Arbeitsweise sehr ähnlich zu seinem Vorbild.



Der Archimedische Wellenschwinger in einer Computersimulation.

[Quelle: http://www.uni-leipzig.de/~grw/welle/wenergie_2_off.html]

Benötigte Materialien:

- Ein Ferrero-Überraschungs-Ei
- Sechs bis zehn kleine Bohnen
- Schlüssel-Schraube (8 x 100 mm)
- M8 Mutter
- Messer

Konstruktion der Anlage:

1. Zunächst muss das Überraschungs-Ei ausgepackt und die Schokolade vom eigentlichen Ei getrennt werden. Das enthaltene Spielzeug, sowie die Schokolade können anderweitig verwendet werden. Das gelbe Ei wird in seine beiden Einzelteile zerlegt.
2. Mit dem Messer wird bei der größeren Ei-Hälfte das Innere des Ei-Fußes aufgeschnitten, sodass ein Loch von ca. 1 cm entsteht. Hierbei ist insbesondere die Verletzungsgefahr mit dem Messer zu beachten, da ein Abrutschen möglich ist. Abbildung 1 zeigt das entstandene Loch.
3. Nun wird die Schraube durch das Loch gesteckt. Hierbei sollte sich der Schraubenkopf außerhalb der Ei-Hälfte befinden. Die Mutter wird ein kleines Stück auf das Gewinde der Schraube gedreht und befindet sich im Inneren der Ei-Hälfte. Die Ei-Hälfte kann nun über die Schraube bewegt werden, aber nicht entweichen. Bild 2 verdeutlicht diese Konstruktion.

4. Zum Anpassen des Masse-Volumen-Verhältnisses werden nun etwa sechs Bohnen in die so eben eingebaute Ei-Hälfte gelegt. Diese dienen dazu, dass das Ei unter Wasser schwebt und so mit den Wellen schwingen kann. Die genaue Anzahl der Bohnen richtet sich nach deren Größe und ist durch Ausprobieren zu ermitteln.
5. Nun wird das Ei mit der zweiten Hälfte verschlossen. Wichtig hierbei ist, dass dieses nicht über, sondern unter Wasser geschieht und jede Möglichkeit von Lufteinschlüssen vermieden wird. Dieses ist ebenfalls dafür notwendig, dass das Masse-Volumen-Verhältnis des Eies ausgeglichen ist und dieses unter Wasser schweben kann.

Im Inneren des Eies befinden sich nun die Bohnen, Wasser und die Mutter, welche auf der Schraube sitzt und verhindert, dass das Ei von der Schraube rutscht.

6. Die gesamte Konstruktion wird nun mit dem Schraubenkopf auf den Boden eines mit ausreichend Wasser gefüllten Gefäßes gestellt. Das Ei befindet sich am oberen Ende der Schraube.

Das gesamte Modell außerhalb des Wassers ist noch einmal in Abbildung 3 dargestellt.

Nun können in dem Gefäß mit der Hand Wellen erzeugt und so das Modell in Betrieb genommen werden.

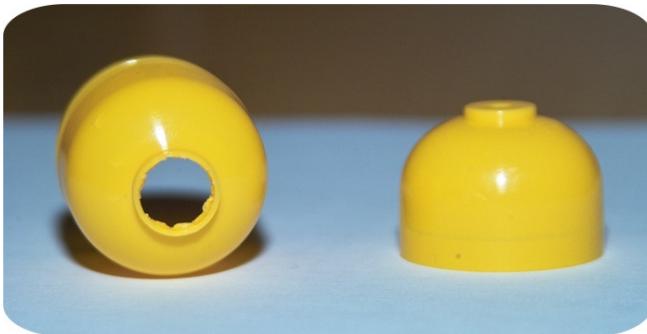


Abb. 1



Abb. 2



Abb. 3

Materialliste für den Nachbau eines Archimedischen Wellenschwingers

Nachfolgend sind alle für den Nachbau eines Archimedischen Wellenschwingers benötigten Materialien mit ihrem jeweiligen Beschaffungsort und den verbundenen Kosten im Detail aufgelistet:

Material	Beschaffungsort	Kosten
Ferrero-Überraschungs-Ei	Lebensmittelmarkt	€ 0,69
1 Tüte kleine Bohnen (ca. 6 Bohnen pro Wellenschwinger)	Lebensmittelmarkt	€ 0,89
Schlüssel-Schraube 8 x 100 mm	Baumarkt	€ 0,71
M8 Mutter	Baumarkt	€ 0,19
Messer	Haushalt	€ 0,00

Summe der Kosten : **€ 2,48** (Stand: 01/2009)

Arbeitsblatt

„Anleitung zum Nachbau einer Brandl-Generator-Boje“

Zeitaufwand: 30 – 45 Min.

Kosten:

ca. € 12,00

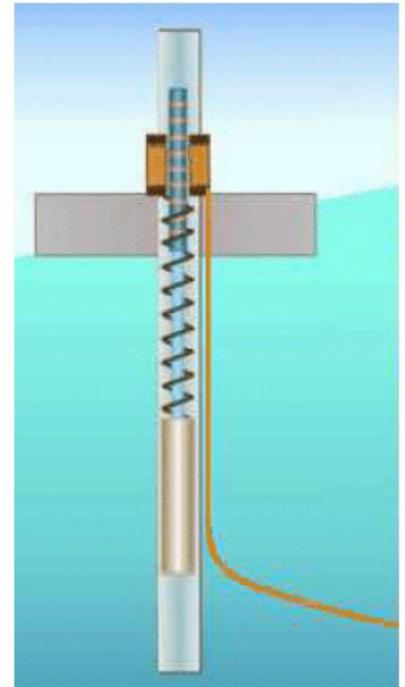
Schwierigkeitsgrad: Mittel

Vorbereitung:

Besorgung der Materialien

Die Brandl-Generator-Boje ist ein auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion arbeitendes Wellenkraftwerk. Durch einen an einer Feder schwingenden Magneten wird in einer Spule eine Spannung induziert, welche eine LED betreibt.

Die nebenstehende Abbildung zeigt die ursprüngliche Skizze der Brandl-Generator-Boje [Quelle: Info-Flyer „Saubere Energie aus Meereswellen durch den Brandl Generator“, S. 2].



Benötigte Materialien:

- Styropor-Platte (Größe: 1 m², Stärke: 50 mm)
- Gewindestange (M8, Länge: 200 mm)
- 4 Muttern M8
- 2 Gummidichtungen (M8 für Gewindestange)
- Kleine Spule (12000 Windungen)
- Stabmagnet (Länge: 50 mm, Ø: 10 mm)
- Massestück (mit Aufhängung), Masse: 0,2 kg
- Feder (Länge: 100 mm, Federkonstante: 17,5 N/m)
- Kunststoffrohr A (Ø_{innen}: 110 mm, Länge: 600 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoffrohr B (Ø_{innen}: 41 mm, Länge: 200 mm, Stärke: 5 mm)
- Kunststoff-Deckel (Ø_{Anschluss}: 110 mm)
- LED-Lampe (mit Fassung / Klemmen)
- Anschlusskabel
- Krepp-Klebeband
- Bohrmaschine (inkl. Holzbohrer) und Messer

Konstruktion der Anlage:

1. Zunächst muss mit dem Messer aus der Styropor-Platte ein kreisrunder Schwimmkörper geschnitten werden, welcher die gesamte Anlage an der Wasseroberfläche hält. Dieser sollte einen Durchmesser von ca. 20 cm haben und in der Mitte mit einem Loch von 12 cm Durchmesser versehen werden, durch welches das Rohr A gesteckt wird.
2. Der Schwimmkörper wird im oberen Drittel des Rohres A angebracht und dient dazu, den Schwerpunkt der Boje nach unten zu verlagern, sodass diese in der vorgesehenen Weise senkrecht im Wasser hängt und nicht umkippt.

Abbildung 1 zeigt den zugeschnittenen Schwimmkörper am Rohr A. Dieser muss evtl. mit Klebeband fixiert werden, wenn das innere Loch nicht passgenau zugeschnitten wurde, weil sonst bei Wellen ein Verrutschen möglich ist.

3. Das Rohr A wird am unteren Ende mit dem Deckel wasserdicht verschlossen.
4. In das Rohr A müssen zwei sich gegenüberliegende Löcher gebohrt werden. Diese haben zum unteren Deckel einen Abstand von ca. 0,35 m und dienen später mit der Gewindestange zum Aufhängen der Feder. Das Bild 2 zeigt diese Konstruktion.
5. An die Spule werden zwei Kabel angeschlossen, die später mit der LED verbunden werden. Das kleinere Rohr B wird auf die Öffnung durch das Spulenninnere gestellt und dort fixiert. Es dient als Führung für den schwingenden Magneten. Verdeutlicht ist dies in der Abbildung 3.
6. Die Spule wird so innen auf den verschlossenen Boden des großen Rohres A gestellt, dass von oben durch das Führungsrohr B der Magnet durch die Spule schwingen kann. Die Kabel werden dabei im Inneren des großen Rohres A nach oben geführt. Die LED wird später auf der Boje befestigt.
7. Das Massestück wird an einer Seite der Feder und diese später mit dem anderen Ende an der Gewindestange befestigt. Der Stabmagnet wird mit einem Ende von unten an das Massestück gehängt. Den genauen Aufbau zeigt Bild 4.

Anschließend wird diese Konstruktion so in das kleinere Rohr B gehängt, dass der Magnet über das Massestück und die Feder frei im Inneren der Spule schwingen kann. Die Gewindestange dient dabei ähnlich wie die Stativstange in Bild 4 als Aufhängung der Feder und wird mit den Muttern an den vorgebohrten Stellen fixiert.

Die Gummidichtung verhindert das Eindringen von Wasser in das Rohr A und wird vor die Muttern über die Gewindestange gelegt, sodass das Bohrloch abgedichtet wird (vgl. Abbildung 2).

Wichtig bei der Installation der Gewindestange ist, dass sich die Federaufhängung direkt in der Mitte über dem Führungsrohr befindet, damit das Massestück mit möglichst wenig Energieverlust durch Reibung schwingen kann. Es bietet sich an, die Feder an der passenden Stelle mit dem Krepp-Klebeband an der Gewindestange zu fixieren.

8. Zuletzt wird die LED an den Klemmen befestigt und mit den Kabeln, welche oben aus der Boje gelegt werden, an die Spule angeschlossen. Die LED kann mit der Halterung und dem Klebeband oben auf der Boje fixiert werden, wie es in Abbildung 5 verdeutlicht ist.

Zu beachten ist hierbei, dass die Kabel im Inneren der Boje nicht in die Nähe der Feder gelangen und sich in dieser verfangen können. Das Massestück würde dann nicht frei schwingen und der Magnet das Innere der Spule ggf. nicht treffen.

Die gesamte Boje ist nun konstruiert und kann in Betrieb genommen werden.

Das Bild 6 zeigt die Boje in ihrer abschließenden Form außerhalb des Wassers.

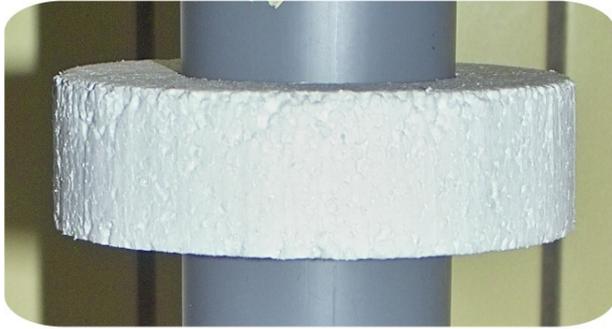


Abb. 1



Abb. 2

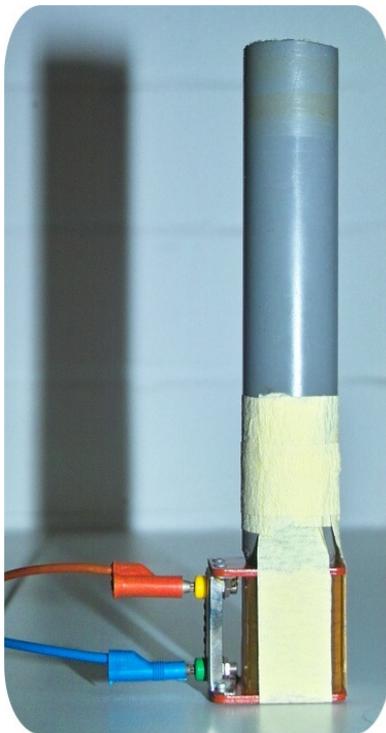


Abb. 3



Abb. 4

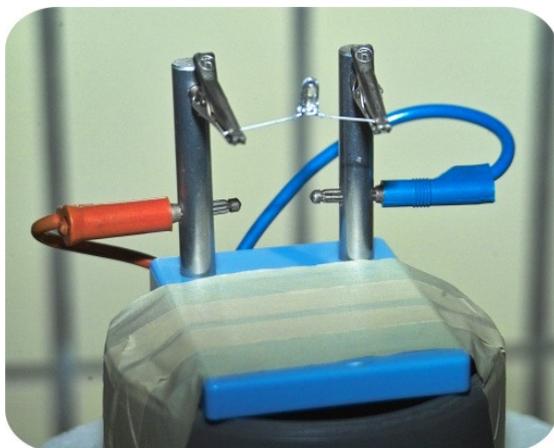


Abb. 5

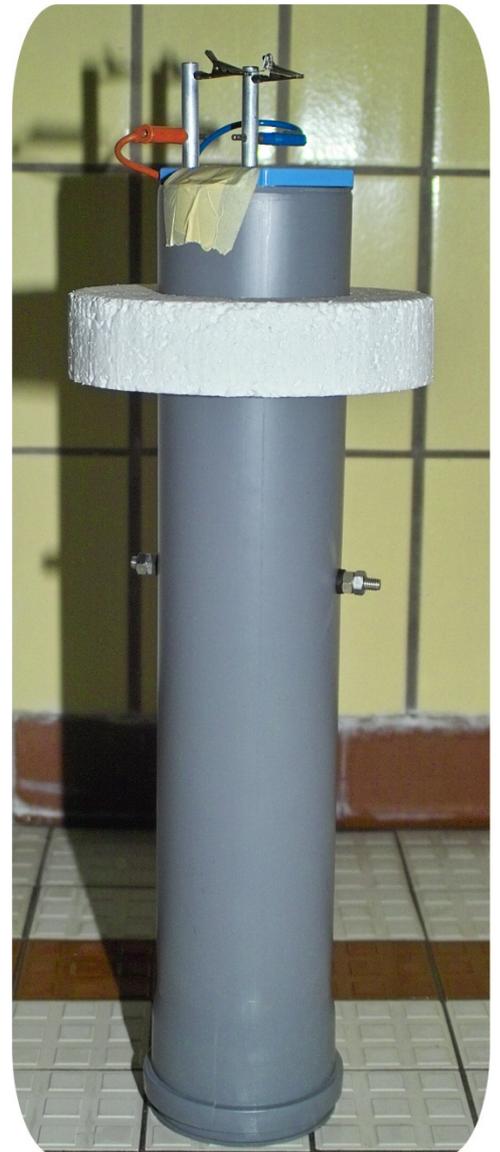


Abb. 6

Materialliste für den Nachbau einer Brandl-Generator-Boje

Nachfolgend sind alle für den Nachbau einer Brandl-Generator-Boje benötigten Materialien mit ihrem jeweiligen Beschaffungsort und den verbundenen Kosten im Detail aufgelistet:

Material	Beschaffungsort	Kosten
Kunststoffrohr Ø _{innen} : 110 mm Länge: 500 mm Stärke: 5 mm	Baumarkt	€ 2,19
Kunststoffrohr Ø _{innen} : 40 mm Länge: 250 mm Stärke: 5 mm	Baumarkt	€ 0,89
Kunststoff-Deckel (HT-Muffenstopfen) Ø _{Anschluss} : 110 mm	Baumarkt	€ 1,29
Styropor-Platte Größe: 1 m ² Stärke: 50 mm	Baumarkt	€ 3,19
Krepp-Klebeband	Baumarkt	€ 1,29
Gewindestange M8, Stahl, verzinkt Länge: 200 mm	Baumarkt	€ 1,49 (1m)
4 Muttern M8	Baumarkt	€ 0,76
2 Gummidichtungen M8 für Gewindestange	Baumarkt	€ 0,49
Kleine Spule 12000 Windungen	Physiksammlung	€ 0,00
Stabmagnet Länge: 50 mm Ø: 10 mm	Physiksammlung	€ 0,00
Massestück (mit Aufhängung) Masse: 0,2 kg	Physiksammlung	€ 0,00
Feder Länge: 100 mm Federkonstante: 17,5 N/m	Physiksammlung	€ 0,00
LED-Lampe mit Fassung / Klemmen	Physiksammlung	€ 0,00
Anschlusskabel	Physiksammlung	€ 0,00
Bohrmaschine inkl. Holzbohrer	Haushalt	€ 0,00
Messer	Haushalt	€ 0,00

Summe der Kosten : **€ 11,59** (Stand: 01/2009)

DVD

zur Masterarbeit „Wellenenergie und ihre Nutzung“

Inhalt der DVD:

- ZDF-Dokumentationssendung „Abenteuer Wissen“ vom 07.01.2009.
Titel der Sendung: „Energie aus dem Meer“.
(Dauer: 28:27 Min.)
- Video vom Betrieb des Nachbaus der OWC-Boje im Hallenbad Oerlinghausen-Helpup vom 22.12.2008.
(Dauer: 01:00 Min.)
- Video vom Betrieb des Nachbaus der Brandl-Generator-Boje im Hallenbad Oerlinghausen-Helpup vom 22.12.2008.
(Dauer: 00:38 Min.)
- Video vom Betrieb des Nachbaus des Archimedischen Wellenschwingers vom 16.01.2009.
(Dauer: 01:09 Min.)

Gesamtlänge: 31:14 Min.