

14. Gezeiten

◦Mond und Erde tanzen verschlungene Pirouetten um die Sonne. Zusammen umkreisen sie die Sonne einmal pro Jahr und zugleich umkreisen sie einander alle 28 Tage. Der Mond dreht sich auch noch einmal in 28 Tagen um sich selbst, so dass er seiner Tanzpartnerin, der Erde, immer dasselbe Gesicht zeigt. Die Primadonna Erde erwidert dieses Kompliment nicht; sie dreht sich einmal am Tag. Der Tanz wird zusammengehalten durch die Gravitation: Jedes Masseteilchen der Erde, des Mondes, der Sonne zieht es zu jedem anderen Masseteilchen in der Erde, dem Mond und der Sonne hin. Die Summe dieser Kräfte ist nahezu exakt das, was erforderlich ist, um diesen Kreiseltanz aufrecht zu erhalten. Doch es gibt ganz kleine Ungleichgewichte zwischen diesen Gravitationskräften und den zur Aufrechterhaltung der Tanzbewegung erforderlichen Kräften. Diese Ungleichgewichte sind der Grund für Gezeiten.

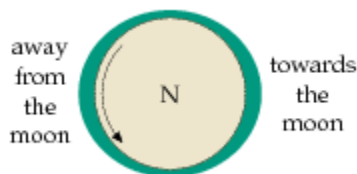


Fig.14.1: Ein Ozean um eine Billardkugel-Erde. Blick auf den Nordpol, der Mond ist rechts 60 cm außerhalb der Seite. Die Erde dreht sich einmal pro Tag innerhalb der Rugbyball-förmigen Hülle aus Wasser. Die Ozeane werden zum Mond hin und vom Mond weg verformt, weil die Gravitationskräfte des Mondes nicht 100%ig mit den erforderlichen Zentripetalkräften übereinstimmen, die zur Aufrechterhaltung der Drehbewegung erforderlich wären, die der Mond und die Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt vollführen. Ein Beobachter am Äquator (der in Pfeilrichtung rotiert) erlebt zwei Hoch- und zwei Niedrigwasser pro täglicher Umdrehung.

Die Ungleichgewichte im Zusammenhang mit der Drehbewegung von Mond und Erde umeinander sind etwa dreimal höher als die aus dem langsameren Tanz der Erde um die Sonne, darum variiert die Höhe der Gezeitenbewegung (der Tidenhub) mit der Mondphase, je nach dem, ob Sonne und Mond gleich- oder gegengerichtet wirken. Bei Vollmond und Neumond (wenn Mond und Sonne in einer Linie miteinander sind) verstärken sich die Ungleichgewichte und der resultierende große Tidenhub wird Springflut genannt. Bei den dazwischenliegenden Halbmonden heben sich die Ungleichgewichte teilweise auf und der Tidenhub ist geringer. Diese geringeren Tiden werden Nipptiden (Nippflut) genannt. Springtiden haben etwa die doppelte Höhe von Nipptiden. Die Springflut ist etwa doppelt so weit über dem mittleren Seelevel wie Nippflut, Springebbe etwa doppelt so tief unter mittlerem Seelevel wie Nippebbe; die Gezeitenströme sind ebenfalls bei Springtide doppelt so hoch wie bei Nipptide.

Warum gibt es zweimal am Tag Flut und zweimal Ebbe? Wäre die Erde perfekt sphärisch, eine glatte Billardkugel umgeben mit Ozean, würde der Gezeiteneffekt der Erde-Mond-Bewegung das Wasser ein wenig zum Mond hin und vom Mond weg deformieren, in eine leichte Rugbyball-Form (Fig.14.1). Ein Bewohner am Äquator dieser Billardkugel-Erde, der sich ja einmal pro Tag in diesem Wasserkokon rundherum bewegt, würde das Wasser zweimal am Tag auf und ab gehen sehen: Hochwasser sähe er einmal unter der „Nase“ des Rugbyballs und ein zweites mal unter dem „Schwanz“. Diese vereinfachte Erklärung ist ein Stück von der Realität entfernt. In der Realität ist die Erde nicht glatt und auch nicht gleichmäßig von Wasser umgeben (wie Sie vielleicht schon bemerkt haben). Die beiden Wasserbäuche können nicht einmal pro Tag um die Erde brausen, weil ihnen die Kontinente im Wege stehen. Deswegen ist das wahre Verhalten der Gezeiten etwas komplizierter. In großen Wasserkörpern wie dem Atlantik formen sich Gezeitenkämme und -tröge, die jedoch nicht um die Erde brausen können und daher das Nächstbeste machen: sie brausen um den Umfang des Ozeans herum. Im Nordatlantik sind zwei Kämme und zwei Tröge, die alle den Atlantik im

Gegenuhrzeigersinn einmal täglich umkreisen. An der Küste sehen wir diese Kämme und Täler nicht direkt, vom Kern des Atlantiks sind wir ein Stück zurückgesetzt, getrennt durch ein paar hundert Meilen Planschbecken genannt Kontinentalschelf. Immer wenn im Kern des Atlantiks einer der Kämme vorbeibraust, schickt er auch einen Kamm in unser Planschbecken. Genauso sendet jeder atlantische Trog einen kleinen Trog ins Planschbecken. Zwischen aufeinanderfolgenden Kämmen und Trögen liegen jeweils sechs Stunden, genauer gesagt $6\frac{1}{4}$ Stunden, da die Zeit zwischen zwei Mondaufgängen 25 und nicht 24 Stunden beträgt.



Fig.14.2: Woodbridge Gezeitenbecken und Gezeiten-Mühle. Foto mit freundlicher Genehmigung von Ted Evans.

Die Geschwindigkeit, mit der diese Kämme und Tröge sich fortbewegen, hängt von der Tiefe des Planschbeckens ab. Je seichter das Wasser wird, um so langsamer bewegen sich die Kämme und Tröge vorwärts und um so höher werden sie auch. Draußen im Ozean beträgt der Tidenhub gerade mal einen halben Meter. Treffen die Gezeiten auf europäische Gefilde, ist der Tidenhub oft bis zu 4 Meter. Auf der Nordhalbkugel sorgt die Corioliskraft (eine Kraft im Zusammenhang mit der Erdrotation, die nur auf bewegte Objekte wirkt) dafür, dass die Kämme und Tröge nach rechts abdriften. Beispielsweise sind die Tiden, die in den Ärmelkanal vom Atlantik her einströmen, an der Küste Frankreichs höher als an der englischen. Genauso nehmen Tiden, die von Norden in die Nordsee einströmen, zuerst den Weg entlang der britischen Küste, um dann bei den Niederlanden links abzubiegen und die deutsche Nordseeküste entlang nach Dänemark zu wandern.

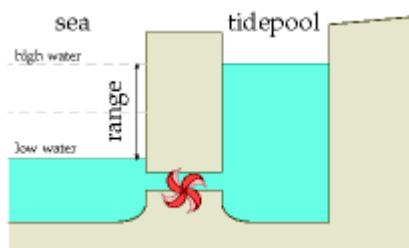


Fig.14.3: Ein künstliches Gezeitenbecken. Es füllt sich bei Flut, gezeitigt ist Ebbe. Das Wasser wird nun durch den Generator hindurch gelassen, um die potenzielle Energie des Wassers in Elektrizität zu verwandeln.

Gezeitenenergie wird manchmal auch lunare Energie genannt, da es hauptsächlich dem Mond zu verdanken ist, dass das Wasser so herumströmt. Das meiste der Gezeitenenergie kommt aber in Wirklichkeit aus der Rotationsenergie der sich drehenden Erde. Die Erde wird ganz langsam langsamer.

Wie können wir nun die Gezeitenenergie nutzen und wie viel Leistung können wir herausholen?

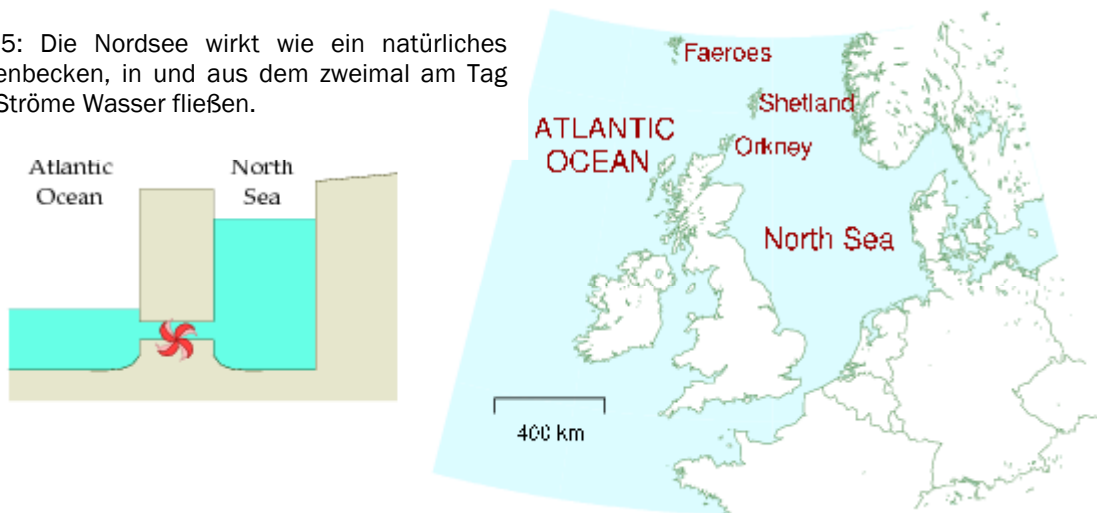
Tidenhub	Leistungsdichte
2 m	1 W/m ²
4 m	3 W/m ²
6 m	7 W/m ²
8 m	13 W/m ²

Tabelle 14.4: Leistungsdichte (Leistung pro Flächeneinheit) eines Gezeitenbeckens, bei Nutzung von steigender und fallender Tide.

Grobe Leistungsabschätzung der Gezeitenkraft

Unter einem Gezeitenkraftwerk stellt man sich ein Becken nahe am Meer vor, mit einem Wasserrad, das sich dreht, wenn das Becken sich füllt oder leert (Fig.14.2 und 14.3). Anhang G zeigt, wie man die verfügbare Leistung an so einem Gezeitenbecken (Tide Pool) abschätzen kann. Bei einer angenommenen Höhe von 4 m, typisch für viele europäische Küsten, liegt die maximal erzielbare Leistung eines künstlichen Beckens, das sich bei Flut schnell füllt und bei Ebbe auch schnell wieder leert, und dessen Turbine in beiden Flussrichtungen Energie erzeugt, bei 3 W/m². Das ist dieselbe Leistungsdichte wie bei Offshore-Windanlagen. Wir wissen bereits, dass Windfarmen Landesgröße haben müssen, wenn sie zur Energieversorgung nennenswert beitragen wollen. Analog muss also auch die Fläche eines Gezeitenbeckens, wenn es nennenswerte Beiträge liefern sollen, eine ähnliche Größe wie Deutschland aufweisen.

Fig.14.5: Die Nordsee wirkt wie ein natürliches Gezeitenbecken, in und aus dem zweimal am Tag große Ströme Wasser fließen.



Glücklicherweise sind wir bereits mit einem derartigen natürlichen Gezeitenbecken ausgestattet: der Nordsee (Fig.14.5). Wenn wir nur Generatoren an passende Stellen setzen, können wir nennenswerte Leistung extrahieren. Die Generatoren könnten wie Unterwasser-Windmühlen konstruiert sein. Weil die Dichte von Wasser etwa 1000mal höher ist als die von Luft, ist auch die Leistung eines Wasserstroms 1000mal höher als die von Wind gleicher Geschwindigkeit. Wir kommen gleich auf Gezeitenfarmen zurück, doch lassen Sie uns zuerst diskutieren, wie viel Gezeitenenergie die Nordsee täglich erreicht.

Ankommende Gezeitenkraft

Ebbe und Flut in der Nordsee sind echte Gezeitenwellen – nicht wie die Tsunamis, die auch oft Flutwellen genannt werden, aber nichts mit Gezeiten zu tun haben. Folgen wir einer Flutwelle aus dem Atlantik. Der Zeitpunkt des höchsten Wasserstandes kommt immer später, je weiter wir nach Osten den Ärmelkanal entlanggehen von Frankreich über Holland nach Deutschland. Der Kamm der Flutwelle läuft den Kanal mit etwa

70 km/h hoch (Der Wellenkamm läuft schneller als das Wasser selbst, wie auch normale Wellen auf See schneller laufen als das Wasser strömt.) Gleichzeitig läuft eine Flutwelle im Uhrzeigersinn um Schottland herum und die Nordsee herunter mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Die beiden Fluten treffen im Themse-Mündungstrichter aufeinander. Zufälligerweise trifft die schottische Welle 12 Stunden später als die zugehörige Welle aus Richtung Dover ein. Deswegen trifft sie nahezu synchron mit der nächstfolgenden Flutwelle aus Dover zusammen und London erhält die normalen zwei Fluten täglich.



Fig.14.6: Die mittlere ankommende Leistung der lunaren Gezeitenwellen senkrecht zu diesen beiden Linien wurde vermessen: 250 GW. Verteilt auf 60 Millionen Menschen sind das 100 kWh pro Tag pro Person.

Die Leistung, die wir aus den Gezeiten gewinnen können, kann nie höher sein als die Gesamtleistung dieser Flutwellen aus dem Atlantik. Die Gesamtleistung, die die beiden in Fig.14.6 eingezeichneten Linien überquert, wurde gemessen; im Mittel beträgt sie 75 kWh/d pro Person. Wenn wir uns vorstellen, dass 50% dieser Energie die Nordsee erreicht und wir 10% dieser Nordsee-Energie abgreifen, und das mit einem 50%-effizienten Prozess (für Konversion und Übertragung), ergäbe das eine mittlere Leistung von 2 kWh pro Tag pro Person.

Das ist eine gefühlsmäßige erste Schätzung, ohne spezielle technische Details ausgearbeitet zu haben. Lassen Sie uns nun die mögliche Leistung dreier spezieller Lösungen untersuchen: Gezeitenfarmen, Sperrwerke und Offshore-Tidenlagunen.

Geschwindigkeit		Leistungsdichte
(m/s)	(Knoten)	(W/m ²)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabelle 14.7: Leistungsdichte von Gezeitenfarmen (in Watt pro qm Meeresgrund) als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit (1 Knoten = 1 nautische Meile pro Stunde = 0,514 m/s)

Gezeitenfarmen

Eine Möglichkeit, die Energie aus dem Gezeitenstrom zu extrahieren, ist der Bau einer Gezeitenfarm, ähnlich einer Windfarm. Die erste Unterwasser-Windmühle, die ans

Netz ging, war eine „300kW“-Turbine, installiert 2003 nahe der nördlich gelegenen Stadt Hammerfest in Norwegen. Ausführliche Ergebnisse wurden dazu nicht veröffentlicht und niemand hat bisher eine Gezeitenfarm mit mehr als einer Turbine installiert, daher müssen wir uns auf die Physik und die Kunst des Abschätzens verlassen, um vorauszusagen, wie viel Leistung solche Gezeitenfarmen produzieren könnten. Unter der Annahme, die Regeln zum Aufbau einer Gezeitenfarm wären ähnlich denen einer Windfarm, und die Turbinen seien in ihrer Effizienz vergleichbar mit den besten Windmühlen, erhält man gemäß Tabelle 14.7 die Leistung einer Gezeitenfarm bei einigen Gezeitenstromstärken.

Bei den üblichen Gezeitenströmen von 2-3 Knoten gibt es viele Plätze rund um England, wo Gezeitenfarmen 6 W/m^2 und mehr erzeugen können. Das kann man nun vergleichen mit Windfarmen ($2-3 \text{ W/m}^2$) und PV-Freiflächenanlagen ($5-10 \text{ W/m}^2$).

Gezeitenkraft muss man nicht verachten! Was trüge sie bei, würde man alle ökonomischen Hindernisse zu ihrer Ausbeutung ausblenden, wenn wir alle vielversprechenden Stellen um England ausstatten würden? Anhang G stellt für England eine Liste der Flussgeschwindigkeiten zusammen und schätzt den Beitrag auf 9 kWh/d pro Engländer ab. ♦Deutsche Gewässer bieten deutlich weniger Auswahl an geeigneten Standorten für Gezeitenfarmen, doch treten auch an der deutschen Nordseeküste Gezeitenströme von bis zu 2 m/s (etwa 4 Knoten) auf, siehe [6blh8wo]. Wir skalieren für Deutschland auf 20% des England-Wertes und setzen maximal 2 kWh/d pro Person an, behalten aber im Hinterkopf, dass das eine *sehr* optimistische Schätzung ist.

Stauwerke

◦Gezeitenkraft-Stauwerke sind eine bewährte Technologie. Das berühmte Stauwerk La Rance in Frankreich, wo der mittlere Tidenhub 8 m beträgt, produziert seit 1966 eine mittlere Leistung von 60 MW .

♦Welches Gezeitenpotential könnte Deutschland nutzen? Der größte mittlere Tidenhub der deutschen Nordseeküste wird bei Wilhelmshaven mit $3,70 \text{ m}$ erreicht, was nach Tabelle 14.4 etwa 3 W/m^2 ermöglicht. Würde man den Jadebusen mit seinen knapp 200 km^2 Seefläche als Stauwerk absperren, wären das maximal 600 MW oder $0,18 \text{ kWh/d/p}$. Würde man zudem das Eidersperrwerk zum Gezeitenkraftwerk ausbauen, wäre ein maximaler Beitrag von weiteren $0,02 \text{ kWh/d/p}$ möglich.



Fig. 14.7a: Der Jadebusen bei Wilhelmshaven. Bei $3,70 \text{ m}$ Tidenhub könnte er über ein Sperrwerk mit seinen 200 km^2 Seefläche bis zu 600 MW Gezeitenleistung liefern. (Karte: Wikipedia, Urheber Alexander Karnstedt, Creative Common Lizenz).

Stauwerke für England

◦Auch im Mündungstrichter des Severn ist der Tidenhub ungewöhnlich hoch. Bei Cardiff an der britischen Atlantikküste beträgt der Hub 11,3 m bei Springflut, 5,8 m bei Nippflut. Würde man von Weston-super-Mare nach Cardiff ein Sperrwerk über den Mündungstrichter ziehen, ergäbe das ein 500 km² Gezeitenbecken (Fig.14.8). Man beachte, um wie viel größer dieses Becken ist als La Rance. Welche Leistung könnte man hier gewinnen, würde man das Wasser zu den geeigneten Zeiten ein- und ausströmen lassen und Generatoren bei Ebbe und bei Flut beschicken? Nach den theoretischen Werten aus Tabelle 14.4. wären bei einem Hub von 11,3 m (bei 30 W/m²) maximal 14,5 GW oder 5,8 kWh/d pro Person, bei 5,8 m Hub (8 W/m²) immerhin noch 3,9 GW oder 1,6 kWh/d/p möglich. Diesen Zahlen liegt die Annahme zu Grunde, dass das Wasser bei Flut in einem einzigen Schwall eingelassen wird und bei Ebbe wiederum in einem einzigen Schwall ausströmt. In der Praxis ziehen sich Füll- und Entleerungsvorgang über mehrere Stunden hin, was den Leistungsertrag ein wenig mindert. Die aktuellen Pläne für das Stauwerk sehen nur in einer Richtung Stromgewinnung vor, was den Ertrag um 50% reduziert. Die Berichte der Ingenieure über das geplante Severn-Stauwerk nennen einen Ertrag von 0,8 kWh/d pro Person nur aus der Ebbe-Strömungsrichtung. Das Stauwerk würde zudem Hochwasserschutz bieten, der mit 120 Millionen € jährlich bewertet wird.



Fig.14.8: Das geplante Severn Stauwerk (unten links) und Strangford Lough in Nordirland (oben links) im Maßstabsvergleich mit dem Stauwerk bei La Rance (unten rechts). Die Karte zeigt zwei mögliche Stellen für das Severn-Stauwerk. Die Variante bei Weston-super-Mare würde im Mittel 2 GW (0,8 kWh/d/p) liefern, die äußere Variante doppelt so viel.

Eine große Gezeitenkraft-Ressource liegt in Nordirland: Strangford Lough hat eine Fläche von 150 km², der Tidenhub dort liegt bei etwa 4,5 m (Springflut) bzw. 1,5 m (Nippflut) – leider nicht so hoch wie bei La Rance oder am Severn. Die Gezeitenleistung beträgt grob 150 MW, aufgeteilt auf die 1,7 Millionen Menschen in Nordirland sind das 2 kWh/d/p. Bei Strangford Lough ging der erste Gezeitenstrom-Generator Englands ans Netz.

Tidenlagunen für England (UK)

Zwei Hauptkandidaten für Tidenlagunen in England sind The Wash an der Ostküste und die Gewässer vor Blackpool an der Westküste (Fig.14.9). Kleinere Anlagen könnten in Nord-Wales, Lincolnshire, Südwest-Wales und Ost-Sussex entstehen.

Die mittlere Leistung pro Flächeneinheit, die Tidenlagunen in britischen Gewässern erreichen können, liegt bei 4,5 W/m², somit könnten Tidenlagunen auf einer Fläche von 800 km² (wie in Fig.14.9 eingezeichnet) eine Leistung von 1,5 kWh/d pro Person erzeugen.



Fig.14.9: Zwei Tidenlagunen mit einer Fläche von 400 km², eine vor Blackpool, die andere in The Wash. Die Severn-Mündung ist zum Vergleich ebenfalls hervorgehoben.

Tidenlagunen

◦Tidenlagunen erzeugt man durch Mauern im Meer; sie werden dann wie künstliche Gezeitenbecken benutzt. Gute Randbedingungen für Tidenlagunen sind: Das Wasser ist seicht und der Tidenhub ist hoch. Die Ökonomie der Größenverhältnisse gilt: Große Tidenlagunen können billigere Elektrizität machen als kleine.

Werden zwei Lagunen an derselben Stelle errichtet, gibt es einen netten Trick, mit dem man die Leistung erhöhen kann und der es ermöglicht, Leistung „auf Bestellung“ jederzeit abzugeben, unabhängig vom Wasserstand. Eine Lagune kann als „Flutlagune“, die andere als „Ebbe Lagune“ benutzt werden. Bei Ebbe kann ein Teil der Leistung, die beim Ausströmen aus der Flutlagune gewonnen wird, dazu benutzt werden, die Ebbe Lagune weiter auszupumpen und deren Level so unter den Ebbelevel abzusenken. Die dazu verwendete Energie wird später mit Zinsen zurückgewonnen, wenn Stromerzeugung durch Füllen der Ebbe Lagune gewonnen wird. In gleicher Weise kann bei Flut zusätzliches Wasser in die Flutlagune gepumpt werden. In welcher Gezeitenphase man sich auch befindet, immer kann eine der beiden Lagunen Leistung abgeben. Ein solches Tidenlagunenpaar kann darüber hinaus als Pumpspeicheranlage dienen, die überschüssige Energie aus dem Stromnetz speichern kann.

♦Für Großbritannien wurde die mittlere Leistung pro Flächeneinheit, die Tidenlagunen erreichen können, mit $4,5 \text{ W/m}^2$ abgeschätzt (siehe Kasten). In deutschen Gewässern ist der Tidenhub geringer, hier können maximal 2 W/m^2 erreicht werden. Nehmen wir wiederum 800 km^2 Beckengröße an, sind das $0,5 \text{ kWh/d/p}$. Positioniert man die Becken in der Nähe von Offshore-Windfarmen – vielleicht könnten ja sogar die Beckenmauern gleichzeitig als Fundamente der Windmühlen dienen – kann man den in Anhang K beschriebenen Pump-Trick auch unter Zuhilfenahme des Windstroms anwenden und die Energieausbeute so vielleicht um ca. 50% auf $0,8 \text{ kWh/d/p}$ erhöhen.

Vorzüge der Gezeiten

Alles in Allem könnten Sperrwerke, Tidenlagunen und Gezeitenfarmen für Deutschland zusammen maximal $3 \text{ kWh/d pro Person}$ liefern, (Fig.14.10).

◦Gezeitenkraft wurde weder in Deutschland noch in England jemals in industriellem Umfang genutzt, darum ist es schwer einzuschätzen, welche ökonomischen und technischen Herausforderungen zu meistern sein werden, wenn wir Gezeitenturbinen errichten und betreiben – Korrosion, Sedimentablagerungen, Verstopfung durch Treibgut? Doch es gibt sieben Gründe für die gezeitengetriebene Wasserkraft:

1. Gezeitenleistung ist völlig vorhersagbar; im Gegensatz zu Sonne und Wind sind Gezeiten eine erneuerbare Energieressource, auf die man sich verlassen kann; Gezeitenkraftwerke laufen Tag und Nacht das ganze Jahr hindurch; in Tidenlagunen kann Energie gespeichert und bei Bedarf wieder eingespeist werden.
2. ♦Küstennahe Sperrwerke können Aufgaben des Hochwasserschutzes mit der Energiegewinnung hervorragend verbinden. ◦
3. Gezeitenkraft ist für Millionen von Jahren verfügbar.
4. Sie benötigt keine kostenintensive Ausstattung, wie etwa Photovoltaik.
5. Weil die Leistungsdichte des typischen Tidenstroms größer ist als die typische Leistungsdichte von Wind, ist eine typische 1MW-Gezeitenturbine kleiner als

eine typische 1MW-Windturbine; deshalb könnten Gezeitenturbinen vielleicht auch billiger werden als Windräder.

6. Das Leben unter den Wellen ist friedlich; es gibt keine verheerenden Tiden-„Stürme“ unter Wasser; im Gegensatz zu Windturbinen, die einigen technischen Aufwand erfordern, um auch selten auftretenden Orkanen standzuhalten, benötigen Unterwasserturbinen keinen großen Sicherheitsfaktor in ihrem Design.
7. Menschen leben hauptsächlich an Land und können nicht unters Meer sehen, also sollten Einwände gegen die optische und ästhetische Wirkung von Gezeitenturbinen wohl weniger scharf ausfallen als bei den Windturbinen.

Sagen und Mythen

Gezeitenkraft, sicherlich sauber und grün, sollte nicht erneuerbar genannt werden. Energie aus den Gezeiten zu ziehen bremst die Erdrotation. Also kann man Gezeiten definitiv nicht auf lange Sicht nutzen.

Falsch. Schon die natürlichen Gezeiten bremsen die Erdrotation. Der natürliche Energieverlust beträgt etwa 3 TW (Shepherd, 2003), das entspricht 72.000 GWh/d, also 10 kWh/d/p weltweit. Wegen der Gezeitenreibung wird der Tag jedes Jahrhundert um 2,3 Millisekunden länger, das sind 0,000 002 6 % Energieverlust pro Jahrhundert, was einer Halbwertszeit von über einer Milliarde Jahren entspricht. Viele Gezeitenkraftanlagen extrahieren Strömungsenergie, die ohnehin durch Reibung verloren ginge. Doch selbst wenn wir die dem Erde-Mond-System durch Gezeiten entzogene Leistung verdoppeln würden, sollte die Energie für mindestens eine Milliarde Jahre reichen.

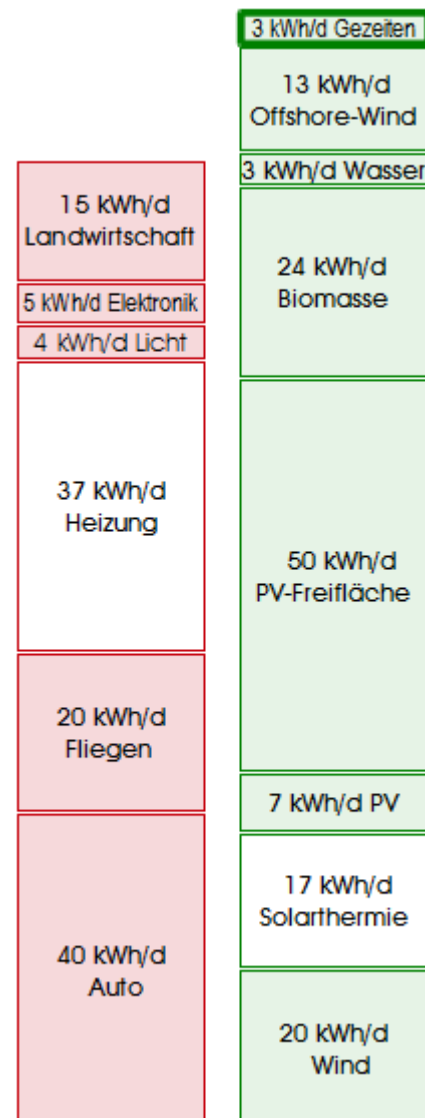


Fig.14.10: Gezeiten

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

93 die maximal erzielbare Leistung eines künstlichen Beckens: Die Leistung eines Gezeitenbeckens wird in Anhang G abgeschätzt.

93 Glücklicherweise sind wir bereits mit einem derartigen natürlichen Gezeitenbecken ausgestattet: der Nordsee. Ich will nicht den Eindruck vermitteln, als fülle und entleere sich die Nordsee genauso wie ein Gezeitenbecken an der Küste. Die Wasserströme in der Nordsee sind viel komplexer, weil die Laufzeiten der Gezeitenwellen in der Nordsee vergleichbar mit den Tidenperioden sind *(vgl. Fig.14.11)°. Dennoch gilt: Es gibt beachtliche Tidenströme in die und aus der Nordsee, und auch innerhalb des Nordseegebietes.



94 Die Gesamtleistung wurde gemessen; im Mittel beträgt sie 100 kWh/d pro Person. Quelle: Cartwright et al. (1980). Für Leser, die grob vereinfachte Modelle mögen, zeigt Anhang G, wie man diese Leistung grundsätzlich abschätzen kann.

*Fig.14.11: Gezeitenwellen in der Nordsee. Die mit 1,2,3 bezeichneten Punkte bilden sog. Amphidromien, an denen sich Gezeitenwellen aus verschiedenen Richtungen so überlagern, dass sich der Tidenhub gerade zu null addiert. (Karte Wikipedia, aus dem "Atlas der Elemente des Tidenhubs und der Gezeitenströme", Rostock 1963)°

95 Das berühmte Stauwerk La Rance in Frankreich: Es erzeugte 16 TWh über 30 Jahre. Das ist eine mittlere Leistung von 60 MW. (Seine Spitzenleistung ist 240 MW.) Der Tidenhub beträgt bis zu 13,5 m; die genutzte Fläche ist 22 km², der Damm 750 m lang. Mittlere Leistungsdichte: 2,7 W/m². Quelle: [6xrm5q].

96 Die Berichte der Ingenieure über das geplante Severn-Stauwerk: Planungswert ist 17 TWh pro Jahr. (Taylor, 2002b). Das (2 GW) entspricht im Mittel etwa 5% des gesamten britischen Stromverbrauchs.

97 Die mittlere Leistung der Tidenlagunen in britischen Gewässern liegt bei 4,5 W/m² Quelle: MacKay (2007a).