
Stand der Technik zur marinen Wasserkraftnutzung

State of the art for the use of marine hydropower

Bachelor-Thesis: Robin Ruff, MatrNr.2891602
September 2016



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich 13
Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik
Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons, Namensnennung 4.0 International Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
(CC-BY 4.0)

Bachelor-Thesis von Robin Ruff

Thema: „Stand der Technik zur marinen Wasserkraftnutzung“

Subject: “State of the art for the use of marine hydropower”

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Studiengang Umweltingenieurwissenschaften

Technische Universität Darmstadt

Fachbereich 13 – Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Institut Wasserbau und Wasserwirtschaft

Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik

Franziska-Braun-Straße 7

64287 Darmstadt

Bearbeitungszeitraum: Mai 2016 – September 2016

Datum der Einreichung: 29. September 2016

Datum der mündlichen Prüfung: Montag, 17. Oktober 2016

Darmstadt, 12. Oktober 2018



Bachelor-Arbeit für Herrn Robin RUFF (Matr.-Nr. 2891602)

Stand der Technik zur marinen Wasserkraftnutzung

State of the art for the use of marine hydropower

Veranlassung und Thema

Während im Landesinneren die Wasserkraftnutzung bereits bestens ausdefiniert und als Energieerzeuger etabliert ist, haben sich in den letzten 20 Jahren enorme Neuentwicklungen zur Nutzung der Energie der Meere hervor getan. Einige dieser Entwicklungen sind längst über den Status einer Pilotanlage hinaus und haben als zuverlässige Energielieferanten einen festen Platz eingenommen (bspw. Gezeitenkraftwerke).

Aufgabenstellung

Im Rahmen seiner Bachelorthesis soll Herr Ruff die aktuell gängigen Prinzipien zur Nutzung der Meeresenergie (Strömung, Wellenbewegung, Gezeiten und ggf. weitere) darstellen. Dazu sollen *keine* Ertragsabschätzungen auf Basis komplexer hydrodynamischer und/oder thermodynamischer Grundlagen erläutert werden – vielmehr soll Herr Ruff die Kraftwerkssysteme und deren Einsatzbereiche zusammenstellen und erläutern.

Diese Zusammenstellung soll dann in einer Tabelle nochmals stark komprimiert werden, woraus der Leser einen raschen Überblick über die Eignung unterschiedlicher Energieerzeugungsanlagen bei gegebenen Randbedingungen erhält.

In einem letzten Schritt soll Herr Ruff eine persönliche Wertung der von ihm recherchierten Systeme durchführen. Dabei soll er begründete Aussagen machen, welche Systeme seines Erachtens nach auch in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen und welche Systeme eher nicht über den Pilotcharakter hinaus kommen werden.

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Grundlagen mariner Wasserkraftwerke	2
3. Wirtschaftlich etablierte Technologien	4
3.1. <i>Gezeitenkraftwerke</i>	4
3.1.1. Entstehung der Gezeiten	4
3.1.2. Funktionsweise	5
3.1.3. Vor- und Nachteile von Tidal Barrage	6
3.1.4. Nutzbares Potential	7
3.1.5. Berechnungsgrundlage	7
3.2. <i>Wellenkraftwerke</i>	8
3.2.1. Grundlagen der Wellenenergienutzung	8
3.2.2. Nutzbares Potential	9
3.2.3. Untertypen von Wellenkraftwerken	11
3.3. <i>Meeresströmungskraftwerke</i>	18
3.3.1. Funktionsweise	18
3.3.2. Vor- und Nachteile von Strömungskraftwerken	19
3.3.3. Nutzbares Potential	20
3.3.4. Berechnungsgrundlage	20
4. Technologien ohne wirtschaftliche Nutzung	22
4.1. <i>Osmosekraftwerke</i>	22
4.1.1. Funktionsweise	22
4.1.2. Vor- und Nachteile von Osmosekraftwerken	23
4.1.3. Nutzbares Potential	23
4.1.4. Berechnungsgrundlage	24
4.2. <i>Meereswärmekraftwerke / Ocean Thermal Energy Converters</i>	25
4.2.1. Funktionsweise	25
4.2.2. Vor- und Nachteile von OTEC	27
4.2.3. Nutzbares Potential	28
4.2.4. Berechnungsgrundlage	28
4.3. <i>Depressionskraftwerke</i>	29
4.3.1. Funktionsweise	29
4.3.2. Vor- und Nachteile von Depressionskraftwerken	30
4.3.3. Nutzbares Potential	31
4.3.4. Berechnungsgrundlage	31
5. Tabellarische Zusammenfassung	31
6. Gegenüberstellung des weltweiten Energiebedarfs und der Kapazitäten mariner Energieproduktion	33

7. Zukunftsausblick	35
7.1. <i>Zukunftsausblick Gezeitenkraftwerke</i>	35
7.2. <i>Zukunftsausblick Meeresströmungskraftwerke</i>	36
7.3. <i>Zukunftsausblick Wellenkraftwerke</i>	36
7.4. <i>Zukunftsausblick Osmosekraftwerke</i>	37
7.5. <i>Zukunftsausblick Meereswärmekraftwerke</i>	38
7.6. <i>Zukunftsausblick Depressionskraftwerke</i>	38
8. Fazit	39
9. Literaturverzeichnis	40
10. Anhang	44
11. Eidesstattliche Erklärung	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Unterteilung der Küstenregionen (AW-Energy Oy, 2012)	3
Abbildung 2 Entstehung der Gezeiten (Ecomare, 2015)	4
Abbildung 3 Funktionsweise Gezeitenkraftwerk (Bibliographisches Institut)	5
Abbildung 4 Skizze einer Wells-Turbine (Takao & Setoguchi, 2012)	11
Abbildung 5 Funktionsweise Pneumatische Kammer (Steckdose.de)	12
Abbildung 6 Konzeptzeichnung Archimedes Wave Swing (Cruz, 2008)	13
Abbildung 7 Konzeptzeichnung Wave Dragon (Heinrichsen, 2013)	14
Abbildung 8 Pelamis Wave Energy Converter (Wind Prospect Group Ltd, 2016)	16
Abbildung 9 Bauweise mit einem Rotor (BINE, 2004)	18
Abbildung 10 Bauweise mit zwei Rotoren (Taylor, 2007)	18
Abbildung 11 Bauweise Unterwasserturbine (Hydroworld, 2011)	19
Abbildung 12 Funktionsweise eines Osmosekraftwerks (Statkraft)	22
Abbildung 13 OTEC, offener Kreislauf (Wikipedia, 2004)	25
Abbildung 14 OTEC, geschlossener Kreislauf (Wikipedia, 2011)	26
Abbildung 15 OTEC, Hybridkreislauf (Wikipedia, 2005)	26
Abbildung 16 Konzeptzeichnung Qattara-Depressionskraftwerk, eigene Darstellung	30
Abbildung 17 Möglicher Anteil mariner Energieträger an weltweiter Energieproduktion mit Bezugsjahr 2013, graphische Darstellung	34
Abbildung 18 OTEC Ressourcenverteilung (Lockheed Martin, 2016)	44
Abbildung 19 Verteilung der globalen Wellenenergieressourcen mit Energiedichte in kW je Meter Küstenlinie (AW-Energy Ltd, 2012)	45
Abbildung 20 Verteilung der quantifizierten globalen Strömungsenergieressourcen (Atlantis Resources , 2014)	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Technische Daten Archimedes Wave Swing	13
Tabelle 2 Projektdaten Wavedragon	15
Tabelle 3 Zusammenfassung der Ergebnisse	32
Tabelle 4 Weltweite Energieproduktion nach Energieträger mit Bezugsjahr 2013	33
Tabelle 5 Möglicher Anteil mariner Energieträger an weltweiter Energieproduktion mit dem Bezugsjahr 2013, tabellarische Darstellung	34

Abkürzungsverzeichnis

OWC	Oscillating Water Column
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
OTEC	Ocean Thermal Energy Converter
Mtoe	Megatonne Öleinheiten
k.A.	Keine Angabe
Vgl.	Vergleich
engl.	englisch

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit	Si-Einheiten
P	Leistung	W	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$
h	Fallhöhe	m	m
Q	Durchfluss	m^3/s	m^3/s
g	Erdbeschleunigung	m/s^2	m/s^2
η	Wirkungsgrad	---	---
m	Masse	kg	kg
E	Energie	TWh	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$
p	Druck	bar	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$
A	Fläche	m^2	m^2
ρ	Dichte	kg/m^3	kg/m^3
v	Geschwindigkeit	m/s	m/s
c	Stoffmengenkonzentration	mol/m^3	mol/m^3
T	Temperatur	K	K
i	Van-'t-Hoff-Faktor	---	---
k	Durchlässigkeitsbeiwert	$\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{bar}\cdot\text{m}^2)$	$\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$
r	Radius	m	m
cp	Leistungsbeiwert nach Betz	---	---
R	Universelle Gaskonstante	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/(\text{s}^2\cdot\text{mol}\cdot\text{K})$
Π	Osmotischer Druck	bar	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$
W	Arbeit	J	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$

1. Einleitung

Eine zuverlässige, nachhaltige Energieerzeugung stellt einen der großen Aufgabenbereiche der Ingenieurwissenschaften im 21. Jahrhundert dar. In Zeiten des Klimawandels, zunehmenden Energiebedarfs, der Energiewende und steigender Energiekosten, rückt das Thema der erneuerbaren Energien immer stärker ins öffentliche Interesse.

Wie auch andere erneuerbare Energieträger, beispielsweise Wind- oder Solarenergie, stößt ein marines Wasserkraftwerk bei der Energieproduktion keine Treibhausgase aus und stellt aufgrund der kontinuierlichen Energie der Ozeane, (z.B. durch Sonneneinstrahlung und Gravitationseinflüsse) eine unerschöpfliche Energiequelle dar. Somit bietet die Nutzung der Meeresenergie eine Möglichkeit für Lösungsansätze der oben genannten Problematik.

Die Nutzung von Meeresenergie zeichnet sich gegenüber anderen erneuerbaren Energien durch eine Reihe von Vorteilen aus:

- Durch die andauernde Verfügbarkeit von Meeresströmungen, Wellen und Gezeiten treten geringere Leistungsschwankungen auf, als beispielsweise bei Wind- oder Solarenergie, die abhängig von der Tages- und Jahreszeit oder dem Wetter sind.
- Da sich marine Kraftwerke teilweise unter der Wasseroberfläche oder auf offener See befinden, stellen sie in vielen Fällen einen geringeren optischen Eingriff in die Landschaft dar, als andere Kraftwerke.
- Gut 70% der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt, wodurch riesige Flächen zur Verfügung stehen. Viele Länder verfügen über Küsten, die zur Energieerzeugung genutzt werden können. Mögliche Standorte sind allerdings durch Kriterien beschränkt, auf die im Folgenden noch eingegangen wird.

Die genannten Gründe sprechen für den Ausbau und die Weiterentwicklung von Technologien zur marinen Energieerzeugung. Bereits heute wird in einigen Ländern Energie aus den Ozeanen gewonnen. Viele Prototypen befinden sich in der Testphase und lassen in den nächsten Jahren eine wirtschaftliche Nutzung erwarten.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Erläuterung und Gegenüberstellung der bereits wirtschaftlich genutzten Anlagenarten und solcher, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden. Zum Abschluss wird eine Einschätzung der Zukunftschancen der einzelnen Anlagentypen und deren Potentiale abgegeben.

In Deutschland werden Meereskraftwerke nach aktuellem Stand, wenn überhaupt, nur eine kleine Rolle spielen¹, da sowohl die Nord-, als auch die Ostsee über zu niedrigen Tidenhub, Wellen und Temperaturgefälle verfügen. Deshalb hat sich im deutschsprachigen Raum ein deutlich kleineres und vor allem ungenaueres Fachvokabular etabliert, als beispielsweise in englischsprachigen Regionen. Als Beispiel hierfür seien Gezeitenkraftwerke genannt, von denen zwei unterschiedliche Typen existieren. Während der erste Typ die potentielle Energie des Tidenhubs ausnutzt, werden beim zweiten Typ Turbinen direkt über Gezeitenströmungen angetrieben. Beide werden jedoch in vielen Quellen schlicht als Gezeitenkraftwerke bezeichnet, ohne das eine Differenzierung vorgenommen wird.

¹ (RWE, 2008)

Im Englischen hingegen wird von „Tidal Barrage“, bzw. „Tidal Current“ gesprochen. Aufgrund der besseren Unterscheidungsmöglichkeit und der Existenz von mehr Abkürzungen, wird in dieser Ausarbeitung häufig auf die englischen Fachbegriffe zurückgegriffen.

2. Grundlagen mariner Wasserkraftwerke

Im Gegensatz zur Wasserkraftnutzung im Landesinneren, die sich in weiten Teilen der Welt schon als zuverlässiger Energieerzeuger etabliert hat und in vielen Ländern einen nicht unerheblichen Teil der Energieversorgung abdeckt, wird die marine Wasserkrafterzeugung bis heute kaum wirtschaftlich genutzt.

Diese Tatsache ist einigen grundlegenden Problemen geschuldet. Zuerst genannt seien hier die hohen Kosten, die aus fehlender Forschung, -Massenproduktion und -Subventionen sowie den schwierigen technischen Bedingungen im marinen Bereich resultieren. Bei einigen Kraftwerkstypen kommt die schwierige Standortwahl hinzu, welche durch Faktoren wie ein ausreichendes energetisches Potential oder eine maximale, bzw. minimale Wassertiefe beschränkt ist. Weiterhin sind bei vielen Technologien die langfristigen Einwirkungen auf das Ökosystem bei einer globalen Nutzung noch nicht erforscht.

Seit den Ölkrisen in den 1970er Jahren, wurde die Forschung im Bereich der marinen Energieerzeugung neben anderen erneuerbaren Energieträgern deutlich forciert. Seitdem wurde eine Reihe von Vorschlägen zur Energiegewinnung aus dem Meer entwickelt und teilweise auch umgesetzt.

Marine Wasserkraftwerke können u.a. durch ihre Standorte in Kategorien eingeteilt werden²:

- Offshore-Kraftwerke, die sich auf offener See befinden
- Near-Shore-Kraftwerke, in küstennahen Flachwasserbereichen
- Shoreline-Kraftwerke, die auf dem Festland, allerdings unmittelbar an der Küste errichtet werden

Auf offener See stehen im Allgemeinen größere Energiemengen zur Verfügung, als in Küstennähe, was vor allem durch höhere Wellen und stärkere Strömungen bedingt ist. Wie man Anhand von [Abbildung 1](#) erkennen kann, sinkt der verwertbare Anteil der verfügbaren Energiemengen vom Offshore- zum Near-Shore-Bereich nur relativ wenig. Im Gegenzug dazu sinken die finanziellen Kosten, sowie der technische Schwierigkeitsgrad der Installation und Wartungsaufwand einer Anlage deutlich, je näher diese an der Küste liegt.³

² (Cruz, 2008)

³ (AW-Energy Oy, 2012)

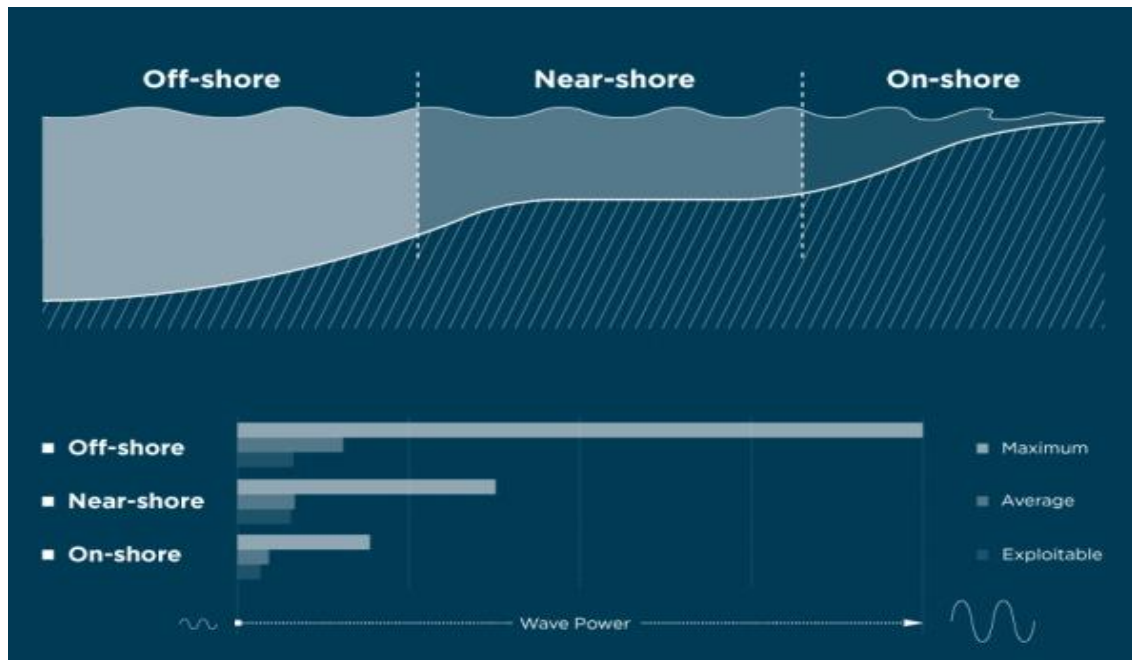


Abbildung 1 Unterteilung der Küstenregionen
(AW-Energy Oy, 2012)

Der Betrieb eines Kraftwerks auf offener See, bzw. in Küstennähe stellt hohe Anforderungen. Die starke Korrosionswirkung des Salzwassers, die einen erhöhten Wartungsaufwand erfordert, senkt die Wirtschaftlichkeit mariner Wasserkraftwerke. Eine weitere Problematik besteht in der aufwändigen Verankerung im Meeresboden sowie extremen Wetterereignissen, da die Anlagen den hohen Belastungen von Stürmen, Wellen und Strömungen standhalten müssen.

Neben der Unterteilung nach ihrer Lage, können die unterschiedlichen Kraftwerkstypen auch nach der von ihnen umgewandelten Energieform differenziert werden. Die nutzbare Energie der Ozeane liegt in verschiedenen Formen vor. Zum einen können die potentielle und kinetische Energie der Wasserteilchen in Strömungen, Gezeiten oder Wellen genutzt werden. Zum anderen bieten Unterschiede in Temperatur oder Salzgehalt eine Grundlage für die Energieproduktion.⁴

Im Folgenden sollen nun die verschiedenen Vorschläge zur marinen Energieerzeugung erläutert werden.

⁴ (Giesecke, Heimerl, & Mosonyi, 2014)

3. Wirtschaftlich etablierte Technologien

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den bereits etablierten und wirtschaftlich genutzten Anlagenarten.

3.1. Gezeitenkraftwerke

Gezeitenkraftwerke nutzen die potentielle und kinetische Energie des Wassers, welche durch den Tidenhub verursacht wird. Es existieren grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Energiegewinnung aus Gezeitenkraft. Dieses Kapitel behandelt nur die sogenannte Staudambauweise (engl. „Tidal Barrage“ oder „Tidal Range“), die unterschiedliche Wasserspiegellhöhen zwischen Ebbe und Flut zur Energieerzeugung nutzt. Verwendung kann sie in Buchten und Flussmündungen finden, die eine Wasserspiegeldifferenz zwischen Ebbe und Flut von mindestens 5 Metern aufweisen.⁵ Die zweite Möglichkeit besteht darin, die durch die Gezeiten verursachten, temporären Strömungen direkt zum Antrieb von Turbinen zu nutzen. Dieser Typ wird allerdings mit anderen, ähnlich funktionierenden Anlagen in [Kapitel 3.3](#) behandelt.

3.1.1. Entstehung der Gezeiten

Die Gezeiten, auch Ebbe und Flut genannt, bezeichnen das Anheben und Absenken des Meeresspiegels durch die Gravitation von Sonne und Mond. Obwohl die Sonne eine deutlich höhere Masse aufweist, als der Mond und somit auch eine größere Gravitation verursacht, überwiegt aufgrund der wesentlich kleineren Entfernung bei der Erzeugung der Gezeiten die Gravitation des Mondes.

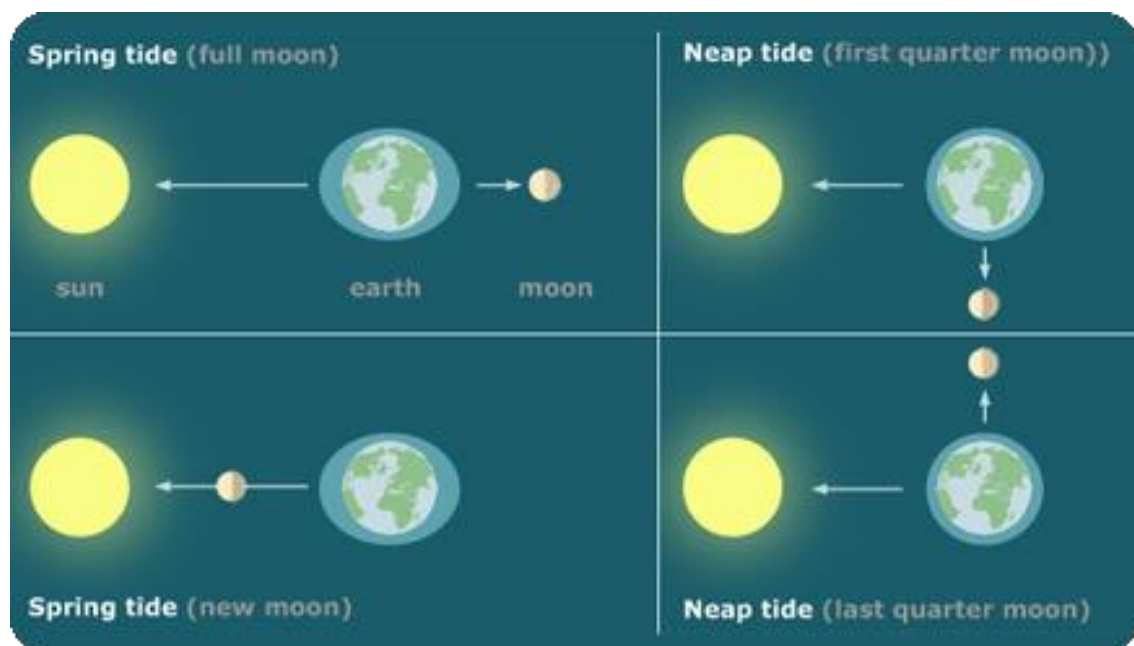


Abbildung 2 Entstehung der Gezeiten (Ecomare, 2015)

⁵ (Watter, 2015)

Ein Ansteigen des Meeresspiegels ist sowohl auf der dem Mond, bzw. der Sonne zugewandten, als auch auf der abgewandten Seite der Erde zu beobachten. Aufgrund der Rotation des Mondes um die Erde, können die gezeitenerzeugenden Kräfte von Sonne und Mond sowohl senkrecht zueinander stehen, als auch in gleicher Linie wirken. Ist letzteres der Fall, so ist die Wasserspiegelschwankung zwischen Ebbe und Flut deutlich stärker und wird als Springtide bezeichnet. Wirken die Kräfte senkrecht aufeinander, wird im Gegenzug von einer Nipptide gesprochen. Da die Zeit für eine Erdumdrehung 24 Stunden beträgt, ist jede Seite des Planeten der Sonne und dem Mond pro Tag je einmal zu- und einmal abgewandt, weshalb die Gezeiten im Schnitt je zweimal auftreten.

Die Dauer und Stärke einer Tidenperiode kann neben den oben genannten periodischen Einflussfaktoren auch durch einige nichtperiodische beeinflusst werden. Hierzu zählen neben der Erdeigenrotation auch die relative Position von Sonne und Mond zueinander, die Meerestiefe, der Verlauf der Küstenlinie und die örtlichen Wetterbedingungen.⁶

Die genaue Wechselwirkung, die aus der Position von Sonne und Mond resultiert, kann [Abbildung 2](#) entnommen werden.

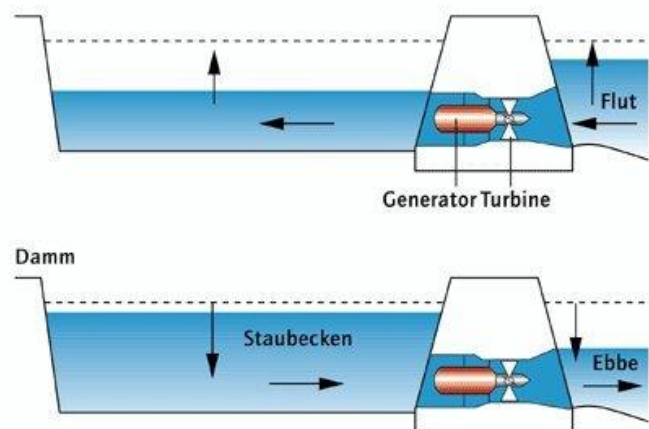
3.1.2. Funktionsweise

Die gewählte Bucht wird durch einen Deich zum Meer abgetrennt, in den an mehreren Stellen Turbinen eingelassen werden, welche durch das ein- und ausströmende Wasser angetrieben werden.

Bei Flut strömt das Meerwasser durch die Turbinen in das Bassin, wobei kinetische Energie in elektrische umgewandelt wird. Bei Ebbe kann die potentielle Energie, die aus dem Höhenunterschied der Wasserspiegel inner- und außerhalb des

eingedeichten Bereichs resultiert ebenfalls in elektrische Energie umgewandelt werden. Die Leistungsabgabe des Kraftwerks ist somit allerdings nicht kontinuierlich und sinkt beim Gezeitenwechsel auf null ab. Um eine bessere Durchgängigkeit der Stromversorgung zu garantieren, besteht die Möglichkeit, das Gezeitenkraftwerk zusätzlich als Pumpspeicherkraftwerk

Auffüllen des Beckens bei Flut und Ausströmen des Wassers bei Ebbe, in beiden Fällen wird die Turbine angetrieben.



Funktionsweise eines Gezeitenkraftwerkes

Abbildung 3 Funktionsweise Gezeitenkraftwerk (Bibliographisches Institut)

⁶ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

zu nutzen⁷. Hierfür wird zu einem Zeitpunkt mit möglichst niedriger Wasserspiegeldifferenz mithilfe der Turbinen Wasser in den eingefassten Bereich gepumpt, welches zu einem späteren Zeitpunkt wieder zur Energiegewinnung genutzt werden kann.

Aufgrund der niedrigen Fallhöhe und des großen Durchflusses, werden bei Gezeitenkraftwerken fast ausschließlich Kaplanturbinen verwendet⁸. Dies wird zusätzlich dadurch begünstigt, dass die Leitschaukeln einer Kaplanturbine verstellbar sind und somit dem kontinuierlich wechselnden Zustand von Zu- und Abfluss angepasst werden können. Der schematische Aufbau eines Gezeitenkraftwerks kann [Abbildung 3](#) entnommen werden.

3.1.3. Vor- und Nachteile von Tidal Barrage

Vorteile:

- Durch die Lage an der Küste, sind Gezeitenkraftwerke deutlich weniger anfällig für extreme Wetterereignisse, als auf offener See gelegen Kraftwerke.
- Die Energietransportwege ins örtliche Stromnetz sind kürzer als bei Offshore-Kraftwerken, wodurch ein geringerer Energieverlust vorliegt.

Gezeitenkraftwerke haben sich bereits seit mehreren Jahrzehnten als zuverlässiger Energielieferant bewährt.⁹ Hierdurch stehen deutlich mehr empirische Daten zur Verfügung, als bei anderen marinen Energieträgern.

Nachteile:

- Die Unterbrechung der ökologischen Durchgängigkeit sowie die Verzögerung des Ebbe-Flut-Zyklus bedeuten eine hohe Umweltbelastung für den eingefassten Bereich.
- Durch den Bau von Dämmen in Flussmündungen und Buchten kann der Schiffsverkehr beeinträchtigt werden.
- Aufgrund der notwendigen Mindesthöhe des Tidenhubs und der geeigneten Form der Bucht, existiert nur eine geringe Anzahl möglicher Standorte.
- Die Energieproduktion ist nicht gleichmäßig. Beim Wechsel zwischen Ebbe und Flut kommt sie vollständig zum Erliegen.
- Produktionsspitzen und Bedarfsspitzen stimmen oft zeitlich nicht überein.
- Der Kontakt zwischen Salzwasser und Turbinen führt zu einer starken Korrosionswirkung.

⁷ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

⁸ ebd.

⁹ ebd.

3.1.4. Nutzbares Potential

Es existieren wenige zuverlässige Angaben zum weltweiten Potential von Gezeitenkraftwerken, was zusätzlich dadurch erschwert wird, dass viele Quellen nicht zwischen Strömungsenergie und potentieller Energie der Gezeiten unterscheiden. Das insgesamt in den Gezeiten enthaltene Potential wird weltweit auf etwa 3 Terrawatt geschätzt.¹⁰ Der hiervon auf Tidal Barrage entfallende, nachhaltig nutzbare Anteil wird mit einem Wert zwischen 120 und 400 GW angegeben¹¹.

Die installierte Leistung betrug im Jahr 2012 nur etwa 512 MW, von denen die beiden größten Anlagen La Rance in Frankreich und Sihwa-Ho in Südkorea mit 240 MW, bzw. 254 MW den allergrößten Teil ausmachen¹². Daraus wird ersichtlich, dass noch gewaltige ungenutzte Potentiale verbleiben. Andere Staaten, mit guten Bedingungen für Gezeitenkraftwerke sind u.a. Russland, China und Kanada¹³. Inwieweit diese Potentiale in Zukunft allerdings auch erschlossen werden, ist aufgrund der oben genannten Probleme fraglich.

Eine genaue Einordnung der genannten Zahlen zu den weltweiten Potentialen mariner Energieträger sowie ein Vergleich zum globalen Energiebedarf, werden in [Kapitel 6](#) gegeben.

3.1.5. Berechnungsgrundlage

Die maximale Energieproduktion eines Gezeitenkraftwerks je Gezeitenperiode kann nach der unten stehenden Formel errechnet werden:

$$W_{max} = g * \rho * \eta * A * h_{max}^2$$

Formel 1¹⁴

- W_{max} = maximale Energieproduktion je Gezeitenperiode [J]
- g = Erdbeschleunigung [m/s²]
- ρ = Dichte des Wassers [kg/m³]
- η = Wirkungsgrad der Gesamtanlage [-]
- A = Grundrissfläche des Bassins [m²]
- h_{max} = maximale Wasserspiegeldifferenz [m]

Der Gesamtwirkungsgrad eines Gezeitenkraftwerks liegt zwischen 0,7 und 0,75.¹⁵

¹⁰ (Curley, 2012)

¹¹ ebd.

¹² (IRENA, 2014)

¹³ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

¹⁴ (Blatter, 2015)

¹⁵ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

3.2. Wellenkraftwerke

Dieses Kapitel befasst sich mit der Energiegewinnung aus Wellen im Ozean. Im Gegensatz zu den anderen in dieser Ausarbeitung behandelten Kraftwerkstypen, existiert bei Wellenkraftwerken eine Vielzahl von Anlagentypen, die sich in Aufbau und Funktionsweise grundlegend unterscheiden. Hier sollen nun exemplarisch einige dieser Nutzungsmöglichkeiten vorgestellt und erläutert werden.

Um trotz der großen Anzahl vorhandener Vorschläge für mögliche Bauweisen eine möglichst breite Übersicht zu bieten, wurden die Beispiele anhand der in der Fachliteratur gängigen Umwandlungsmechanismen der Wellenenergie gewählt. Diese sind¹⁶:

- Luftturbinen (Pneumatische Kammer)
- direkter Antrieb (Archimedes Wave Swing)
- Hydraulik (Pelamis Wave Energy Converter)
- Überströmung (Wave Dragon)

Zusätzlich wurde darauf geachtet, je mindestens ein Beispiel einer Offshore-, Nearshore- und Shoreline-Anlage zu geben.

Die Gliederung dieses Kapitels unterscheidet sich daher insofern von den Kapiteln [3.1](#), [3.3](#), [4.1](#), [4.2](#) und [4.3](#), indem die Funktionsweise sowie die Vor- und Nachteile nicht allgemein, sondern anhand der einzelnen Untertypen von Wellenkraftwerken behandelt werden. Eine Berechnungsgrundlage wird aufgrund der hohen Anzahl unterschiedlicher Kraftwerke in diesem Kapitel nicht gegeben.

3.2.1. Grundlagen der Wellenenergienutzung

Wellen entstehen hauptsächlich durch Reibung zwischen Luft und Wasser, welche durch den Wind verursacht wird. Die Größe der entstehenden Wellen wird durch die folgenden 3 Größen beeinflusst.¹⁷

- Windgeschwindigkeit
- Winddauer
- Streichlänge des Windes über die Wasseroberfläche

Abgesehen von Wind, können Wellen außerdem durch die Gezeiten oder durch Seebeben verursacht werden. Beides hat aber für dieses Kapitel keine Relevanz.

Die Energie vom Wellen im Ozean liegt zu gleichen Teilen in potentieller Energie, durch das Heben und Senken der Wassersäule und in kinetischer Energie durch die Oszillationsbewegung der Wasserteilchen vor¹⁸.

¹⁶ (Cruz, 2008)

¹⁷ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

¹⁸ (Multon, 2012)

In Wellenkraftwerken können diese Energieformen mit unterschiedlichen Ansätzen in elektrische Energie umgewandelt werden.¹⁹

Nutzungsmöglichkeiten der kinetischen Energie:

- vertikale Auf- und Abbewegung der Wasserteilchen
- horizontale Bewegung der Wasserteilchen entlang der Bewegungsrichtung der Wellen

Nutzungsmöglichkeiten der potentiellen Energie:

- Veränderung des Profils der Wasseroberfläche
- Druckschwankungen

3.2.2. Nutzbares Potential

Angaben zum globalen Potential von Wellenenergie unterscheiden sich noch deutlich stärker, als diejenigen zur Gezeitenkraft. Im Jahr 2009 wurde die maximal mögliche Leistung von der „International Energy Agency“ mit einem Wert zwischen 8.000 und 80.000 TWh/a angegeben²⁰, wobei Letzteres mehr als der Hälfte des weltweiten Energiebedarfs im Jahr 2013 entspricht.²¹ Bereits hier wird deutlich, wie ungenau die Angaben sind, da der Maximal- und der Minimalwert sich um den Faktor Zehn unterscheiden. Vom World Energy Council wurde das gesamte Potential der Wellenenergie auf ca. 2 TW geschätzt²², was einer jährlichen Ausbeute von knapp 17.600 TWh/a entspricht und sich somit innerhalb der beiden erstgenannten Werte befindet. Beide machen jedoch keine Angabe dazu, wie groß der tatsächlich erschließbare Anteil dieser Ressourcen ist.

Von anderen Quellen wird der tatsächliche technisch und nachhaltig nutzbare Anteil dieser Energie weit kleiner angegeben. Er wird für das Bezugsjahr 2025 auf etwa 2.000 TWh geschätzt,²³ was einer Leistung von 0,2 TW entspricht. Aufgrund dieser stark voneinander abweichenden Angaben ist die Ermittlung eines zuverlässigen Wertes schwierig. Für die letzte Angabe sprechen allerdings die Tatsachen, dass es sich hierbei um die neueren Werte handelt und um die einzige der genannten Studien, die Angaben dazu macht, ob es sich um totales Potential oder technisches-, bzw. nachhaltiges Potential handelt.

¹⁹ (Tannhauer, 2009)

²⁰ (World Energy Council, 2010)

²¹ (International Energy Agency, 2015)

²² (Sandvik AB, 2016)

²³ (Giesecke, Heimerl, & Mosonyi, 2014)

Ein so großer Unterschied zwischen absolutem- und nutzbarem Potential könnte u.a. aus folgenden Ursachen resultieren:

- Eine zu große Dichte an Wellenkraftwerken könnte die Strömungsbedingungen langfristig stark verändern.
- Trotz der im Vergleich zu anderen Energieträgern relativ niedrigen Umweltbelastung, stellen Wellenkraftwerke in großer Zahl einen ernst zu nehmenden Eingriff in das marine Ökosystem dar. Hierzu zählen die Verankerung im Meeresboden, Lärmemissionen oder das Austreten toxischer Stoffe bei einigen Anlagentypen.
- Durch die weltweit ungleiche Verteilung der Wellenenergie, können einige Länder eine deutlich größere Energiemenge erwirtschaften, als andere. Da mit steigender Produktion insbesondere die beiden oben genannten Problematiken verstärkt werden und ein verlustloser Energietransport momentan nicht möglich ist, wird sich in vielen Ländern eine vollständige Nutzung der Ressourcen nicht rentieren.

Zu den Regionen mit besonders großem Potential zählen unter anderem Großbritannien, Australien, Argentinien, Chile, Japan und die USA. Eine genaue Verteilung der weltweiten Ressourcen in Kilowatt je Meter Küstenlinie, kann der [Abbildung 19](#) im Anhang entnommen werden.

3.2.3. Untertypen von Wellenkraftwerken

Im Gegensatz zu den anderen in dieser Arbeit behandelten marinen Energieträgern hat sich bei der Wellenenergie die bestmögliche Technologie noch nicht herauskristallisiert. Weltweit existieren mehrere hundert Patente und Vorschläge zu möglichen Wellenkraftwerken²⁴, von denen allerdings nur ein Bruchteil die Testphase erreicht hat. In diesem Kapitel sollen nun exemplarisch vier dieser Technologien vorgestellt werden.

Pneumatische Kammer / Oscillating Water Columns

Hierbei handelt es sich um eine nach unten geöffnete, an der Küste errichtete Kammer mit einer an der Oberseite eingelassenen Turbine, in der eine Luft- und eine Wassersäule aufgrund der Wellenbewegung oszillieren. Bei einem Anstieg der Wassersäule, wird Luft komprimiert und durch die an einen Generator gekoppelte Turbine geleitet. Sinkt die Wassersäule wieder ab, entsteht ein Unterdruck und es wird Luft von außen angesaugt, wodurch wiederum die Turbine angetrieben wird. Die Schnittzeichnung einer pneumatischen Kammer ist in [Abbildung 5](#) dargestellt.

Für diese Anlagen werden fast ausschließlich Wells-Turbinen verwendet, eine spezielle Form der Niederdruckluftturbine, die in [Abbildung 4](#) skizziert ist. Diese besitzt zwar nur einen Wirkungsgrad zwischen 0,4 und 0,7, rotiert jedoch unabhängig von der Durchströmungsrichtung in die gleiche Richtung²⁵. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Turbine direkt über die schwingende Wassersäule anzutreiben. Nach momentanem Stand ist der indirekte Antrieb allerdings deutlich attraktiver, da hierbei geringere Korrosionswirkungen auftreten.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, das Prinzip der oszillierenden Wassersäule in offshore-Kraftwerken zu nutzen. Die Funktionsweise bleibt hierbei die gleiche, mit dem Unterschied, dass es sich um eine schwimmende, im Meeresboden verankerte Konstruktion handelt. Diese sogenannten OWC-Bojen, nach der englischen Bezeichnung „Oscillating Water Columns“, bieten im Vergleich zur pneumatischen Kammer sowohl Vor-, als auch Nachteile. Durch die größere Entfernung zur Küste stehen höhere Wellen und somit eine größere Energiemenge zur Verfügung. Auch optische oder akustische Umweltbeeinträchtigungen für den Menschen werden auf diese Art reduziert. Im Umkehrschluss steigen allerdings durch die höhere Entfernung auch die Energieverluste, der Installationsaufwand und die Wetteranfälligkeit.

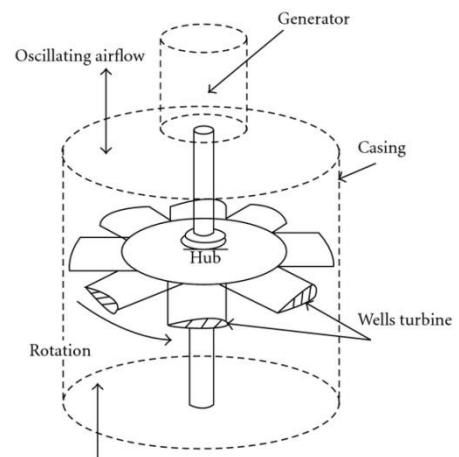


Abbildung 4 Skizze einer Wells-Turbine (Takao & Setoguchi, 2012)

²⁴ (Gailfuss, 2001)

²⁵ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

Funktionsweise eines Wellenkraftwerks

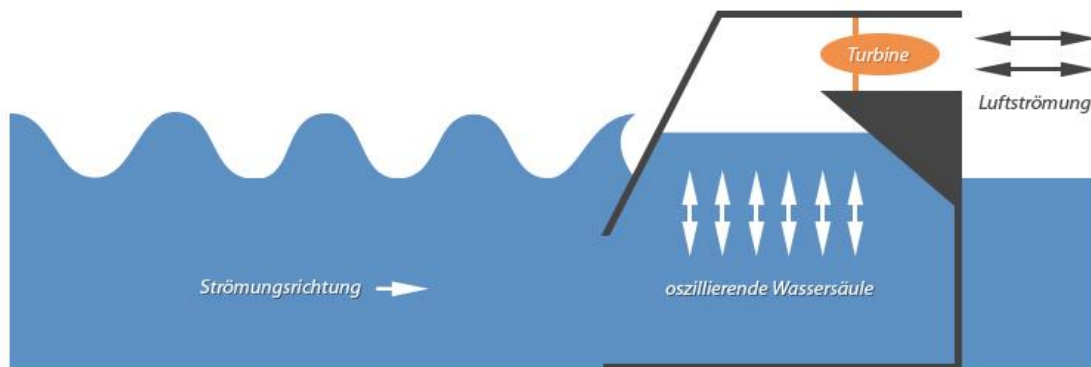


Abbildung 5 Funktionsweise Pneumatische Kammer (Steckdose.de)

Die erste Anlage dieses Typs wurde 2001 auf der schottischen Insel Islay in Betrieb genommen. Aufgrund von Planungsfehlern konnte aber nur ein Bruchteil der angestrebten Leistung erreicht werden. Seit 2011 wird ein Wellenkraftwerk auf Basis der pneumatischen Kammer in der spanischen Stadt Mutriku kommerziell mit einer Leistung von ca. 300 kW betrieben.²⁶

Vorteile:

- Die Turbinen kommen nicht mit Salzwasser in Kontakt.
- OWC können in bestehende Gebäude an der Küstenlinie integriert werden.
- Durch die Energieproduktion an Land sind keine Unterseekabel notwendig, wodurch Kosten eingespart werden können. Ebenfalls bleibt durch die daraus resultierenden kurzen Wege ins örtliche Stromnetz der Energieverlust relativ gering.
- Die Anfälligkeit gegen extreme Wetterereignisse ist deutlich geringer, als bei Offshore-Anlagen.
- Da sich keine beweglichen Bauteile wie Turbinen im Wasser befinden, stellen OWC keine direkte Gefahr für Meeresbewohner dar.
- Die Energieproduktion ist rund um die Uhr möglich.

Nachteile:

- OWC verursachen hohe Lärmemissionen und stellen als Shoreline-Anlage einen deutlichen optischen Umwelteingriff dar.
- Durch die Heterogenität der Wellen kommt eine ungleichmäßige Stromproduktion zustande. Diese Ungleichmäßigkeiten können durch die Kopplung mehrerer Einheiten abgeschwächt werden.
- Die Anlagen haben aufgrund der unterschiedlichen Durchströmungsrichtungen einen niedrigen Wirkungsgrad.
- Für die Installation von Shoreline-Anlagen, wie der pneumatischen Kammer, stehen deutlich kleiner Flächen zur Verfügung, als für Offshore- und Nearshore-Anlagen.

²⁶ (Lynn, 2014)

Archimedes Wave Swing

Im Gegensatz zu den anderen hier behandelten Wellenkraftwerken, arbeitet die Archimedes Wave Swing vollständig unter Wasser.

Diese Anlage besteht aus zwei ineinandergreifenden Zylindern, wobei der untere am Meeresgrund fixiert und somit statisch ist. Der obere Zylinder ist frei beweglich und an einen Lineargenerator gekoppelt, eine spezielle Form von Generator zur Umwandlung von geradlinig gerichteter Bewegungsenergie. Die gesamte Konstruktion ist mit Luft gefüllt und durch eine Dichtung vor der Flutung mit Meerwasser geschützt.²⁷

Wird die Konstruktion von einem Wellenkamm überlaufen, so erhöht sich der Druck, welcher auf den oberen Zylinder wirkt, wodurch dieser herabgedrückt und die Luft im Inneren komprimiert wird (Vgl. [Abbildung 6](#)). Das Gleiche geschieht in entgegengesetzter Richtung beim Überlaufen eines Wellentals. Für eine maximale Energieerzeugung ist es sinnvoll, die Schwingfrequenz des Systems an die der herrschenden Wellenbedingungen anzupassen.²⁸ Die technischen Daten des Kraftwerks können Tabelle 1 entnommen werden. Anhand dieser wird deutlich, dass der frei bewegliche Zylinder mit einer Masse von 400 t und einer Geschwindigkeit von bis zu 2,2 m/s extreme Kräfte auf die Anlage überträgt. Um diese kompensieren zu können, ist eine hydraulische Bremsvorrichtung notwendig.

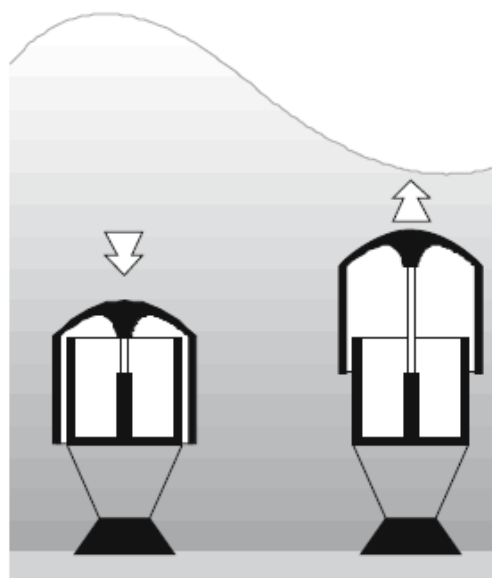


Abbildung 6 Konzeptzeichnung Archimedes Wave Swing (Cruz, 2008)

Tabelle 1 Technische Daten Archimedes Wave Swing²⁹

Länge	Höhe	Durchmesser	Masse
48 m	21 m	9,5 m	1.720 t
Amplitude	Maximalgeschwindigkeit	Maximale Belastung	Spitzenleistung
7 m	2,2 m/s	1 MN	2 MW

²⁷ (Cruz, 2008)

²⁸ ebd.

²⁹ ebd.

Vorteile:

- Durch die Lage unter Wasser, ist die Anfälligkeit gegen Stürme und große Wellen relativ gering.
- Die direkte Umweltbelastung ist relativ niedrig. Auch eine optische Belastung entsteht nicht.
- Durch den Einsatz von ferngesteuerten Wartungseinheiten (Remotely Operated Vehicle) können Wartungs- und Reparaturmaßnahmen auch unter der Wasseroberfläche problemlos durchgeführt werden.
- Die empfindlichen Bauteile sind im Inneren der Anlage gelagert, wodurch der Kontakt mit Salzwasser vermieden wird.
- Die Energieproduktion ist rund um die Uhr möglich.
- Die Energieproduktion ist unabhängig von der Richtung der anlaufenden Wellen.
- Als Standort kann jede Küste mit ausreichend hohen Wellen gewählt werden.

Nachteile:

- Eine Verankerung im Meeresboden ist notwendig, wodurch erhöhter Aufwand und Kosten entstehen.
- Die möglichen Auswirkungen der Lärmemissionen auf das marine Ökosystem wurden noch nicht ausreichend untersucht.

Wave Dragon

Der aus einer Kooperation von mehreren europäischen Staaten entwickelte Wave Dragon bezeichnet eine Form von Offshore-Wellenkraftwerken, welche die potentielle Energie der ihn überspülenden Wellen zur Energieerzeugung nutzt. Durch die trichterförmig angeordneten Wellenreflektoren werden anlaufende Wellen zunächst gebündelt und dadurch aufgestaut, um anschließend die Konstruktion zu überspülen. Ein Teil des Wassers bleibt in einem über dem Meeresspiegel gelegenen Reservoir auf der Oberseite der Anlage zurück und wird anschließend über mehrere Niederruckturbinen abgelei-

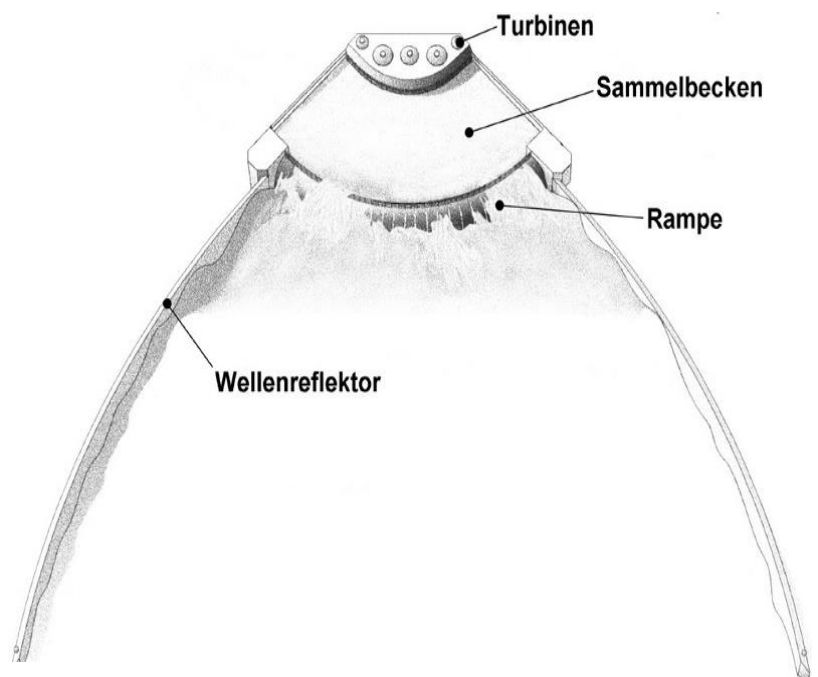


Abbildung 7 Konzeptzeichnung Wave Dragon (Heinrichsen, 2013)

tet. Mithilfe eines Systems von Druckluftkammern kann die Eintauchtiefe und somit die Höhe der zu überströmenden Rampe variiert werden.

Aufgrund der niedrigen Fallhöhe, bietet sich der Einsatz von Kaplan turbinen zur Energieerzeugung an.³⁰

Bisher existiert von diesem Anlagentyp lediglich ein Prototyp, welcher mehrere Jahre zunächst im dänischen Fjord Nissum Bredning und anschließend vor der dänischen Küste im Einsatz war³¹. Relevante Daten des Prototyps sowie der zukünftig geplanten Anlagen können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 2 Projektdaten Wavedragon³²

	Prototyp	Geplante Anlage
Länge/ Breite/ Höhe	27x57x3,6 m	170x300x19 m
Gewicht	237 t	33.000t
Höhe über Meeresspiegel	0,6 – 1,5 m	3-7 m
Füllmenge des Reservoirs	55 m ³	8.000 m ³
Turbinenzahl	7	16-20
Jährliche geschätzte Energieproduktion	0.04 GWh	20 GWh
Wassertiefe	6 m	25 m

Die großen Ausmaße des Wave Dragons sind zum einen notwendig, um eine möglichst breite Wellenfront nutzen zu können und zum anderen, um eine stabile Lage im Wasser zu gewährleisten. Außerdem ermöglichen sie es theoretisch, die Anlage auch als Standort für Offshore-Windkraftanlagen zu nutzen.³³

Vorteile:

- Der Wave Dragon stellt nur eine geringe direkte Umweltbelastung dar. Die Gefahr für Meeresbewohner ist relativ gering, da sich keine beweglichen Bauteile im Wasser befinden oder Gefahrenstoffe austreten können.
- Die Konstruktion kann vollständig an Land erfolgen. Anschließend kann der Wave Dragon zum gewählten Einsatzort geschleppt werden.
- Die Sicherung der Anlage erfolgt nur durch einen Anker.
- Der Einsatz kann je nach gegebenen Wellenbedingungen in unterschiedlichen Größen erfolgen.

³⁰ (Cruz, 2008)

³¹ (Sievers, 2003)

³² (Soerensen, 2006)

³³ (Tannhauer, 2009)

- Durch die großen Ausmaße der Anlage sind Wartungsarbeiten direkt an Bord möglich. Zusätzlich kann sie dadurch als Plattform für Offshore-Windkraftwerke genutzt werden.
- Als Standort kann jede Küste mit ausreichend hohen Wellen gewählt werden.
- Die Energieproduktion ist rund um die Uhr möglich.

Nachteile:

- Die Notwendigkeit von Unterseekabeln bei Offshore-Kraftwerken verursacht erhöhte Kosten und Aufwand bei der Installation. Um diese möglichst gering zu halten, ist eine Kopplung mehrerer Anlagen sinnvoll, da so nur ein Kabel verlegt werden muss.
- Durch die Lage auf offener See sind die Anlagen sehr anfällig gegen Stürme und hohe Wellen.
- Die Energieproduktion ist abhängig von der Richtung der anlaufenden Wellen.
- Schifffahrtsrouten können beeinträchtigt werden.

Pelamis Wave Energy Converter

Beim Pelamis Wave Energy Converter, auch als Seeschlange bezeichnet, handelt es sich um eine frei schwimmende Konstruktion, bestehend aus mehreren zylindrischen Segmenten, die über Gelenke miteinander verbunden sind. Mithilfe einer Vertäuung am Meeresboden, kann sich die gesamte Anlage stets senkrecht zu anlaufenden Wellen ausrichten. Beim Durchlaufen einer Welle, werden die Segmente nacheinander angehoben und wieder abgesenkt. Die daraus resultierende Auf- und Abbewegung der einzelnen Segmente zueinander kann durch in den Gelenken gelagerte Hydraulikzylinder an Motoren weitergegeben werden. Diese betreiben wiederum einen Generator, in dem die hydraulische Energie in elektrische umgewandelt wird. Der Energieabtransport erfolgt über Unterseekabel zunächst zu einem Knotenpunkt, an den noch weitere Anlagen angeschlossen werden können und anschließend weiter zum Festland. Eine schematische Zeichnung eines solchen Kraftwerks ist in [Abbildung 8](#) dargestellt.

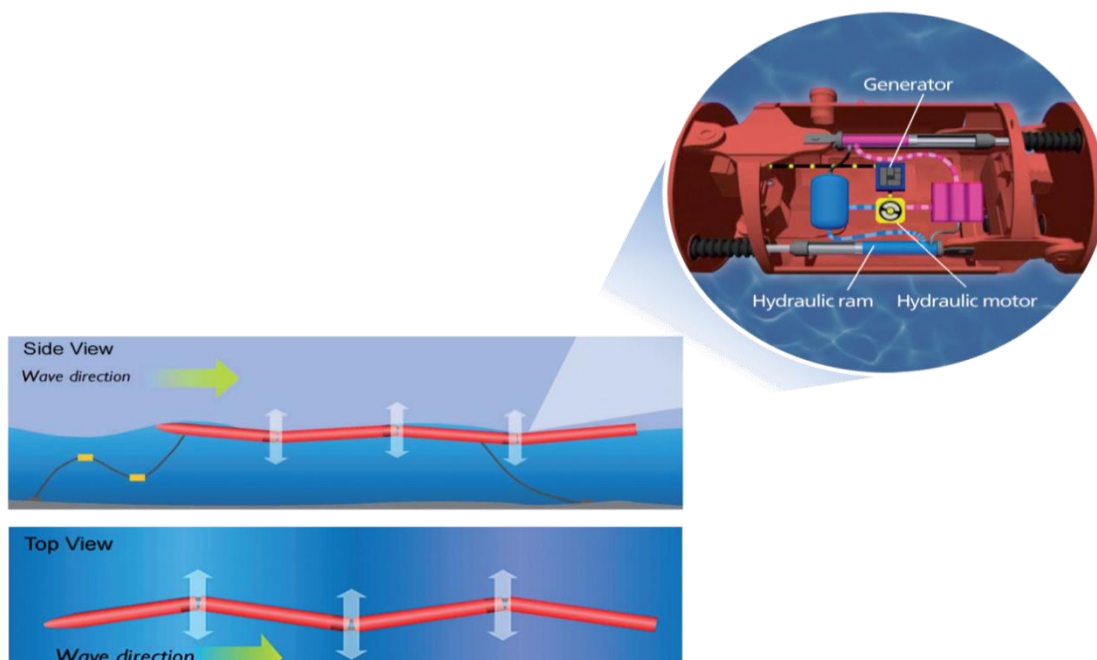


Abbildung 8 Pelamis Wave Energy Converter (Wind Prospect Group Ltd, 2016)

Mehrere Prototypen mit einem Durchmesser von 3,5 m, einer Länge von 150 m und einer Masse von 1.350 t waren mehrere Jahre in der Testphase.³⁴ Durch den Bankrott des Herstellers im Jahre 2014 wurde eine weitere Nutzung des Pelamis Wave Energy Converters bis heute verhindert, die Übernahme durch einen schottischen Energieversorger und die mehreren Tausend Stunden an Testdaten liefern allerdings eine gute Grundlage für die zukünftige Weiterentwicklung der Technologie und der Wellenenergienutzung im Allgemeinen.³⁵

Vorteile:

- Es kommen keine empfindlichen Bauteile mit Salzwasser in Kontakt, wodurch Korrosion vermieden wird.
- Das Kraftwerk kann an Land gebaut und anschließend zum Einsatzort geschleppt werden.
- Sowohl die direkte, als auch die optische und akustische Umweltbelastung sind gering.
- Der Einsatz kann in unterschiedlichen Größen erfolgen, je nach gegebenen Wellenbedingungen.
- Eine Installation mehrerer Einheiten in unmittelbarer Nähe ist möglich. Hierdurch kann die Anzahl der notwendigen Unterseekabel gering gehalten werden.
- Als Standort kann jede Küste mit ausreichend hohen Wellen gewählt werden.
- Durch die Sicherung mit einem Anker kann sich die Anlage selbständig senkrecht zu den anlaufenden Wellen ausrichten.³⁶
- Die Energieproduktion ist rund um die Uhr möglich.

Nachteile:

- Die Notwendigkeit von Unterseekabeln bei Offshore-Kraftwerken verursacht erhöhte Kosten und Aufwand bei der Installation. Um diese möglichst gering zu halten, ist eine Kopplung mehrerer Anlagen sinnvoll, da so nur ein Kabel verlegt werden muss.
- Durch die Lage auf offener See sind die Anlagen sehr anfällig gegen Stürme und hohe Wellen. Hierzu existieren bereits Lösungsansätze, die vorsehen, die komplette Konstruktion unter zu großen Wellen hindurchtauchen zu lassen.³⁷
- Schifffahrtsrouten können beeinträchtigt werden.

³⁴ (Cruz, 2008)

³⁵ (reNEWS Ltd, 2016)

³⁶ (Yemm, Pizer, Retzler, & Henderson, 2011)

³⁷ (Lynn, 2014)

3.3. Meeresströmungskraftwerke

Ein Meeresströmungskraftwerk nutzt die verschiedenen Formen natürlich auftretender Meeresströmungen zur Energieerzeugung. Hierfür existieren mehrere Bauarten, von denen einige in den [Abbildung 9, 10](#) und [11](#) dargestellt sind. Genutzt werden können kontinuierliche Meeresströmungen, aber auch temporäre Strömungen, wie sie zum Beispiel durch den Gezeitenwechsel verursacht werden. Studien haben ergeben, dass eine Wassertiefe zwischen 20 und 35 m eine optimale Energieausbeute liefert. Die optimale Strömungsgeschwindigkeit liegt bei etwa 2,5 m/s.³⁸

3.3.1. Funktionsweise

Meeresströmungskraftwerke funktionieren nach einem ähnlichen Prinzip wie Windkraftanlagen. Ein Rotor wird hierbei durch die Massenbewegung des Wassers, welche von Meeresströmungen verursacht wird in Bewegung gebracht. Üblicherweise werden die Rotoren an Stahlpfeilern montiert, die im Meeresboden verankert sind. Es existieren allerdings auch Vorschläge zur direkten Montage von Turbinen am Meeresboden. Die Pfeilerbauweise bietet jedoch einige Vorteile. Hierzu zählt unter anderem, dass die montierten Turbinen mithilfe einer Hydraulikvorrichtung für Wartungs- und Montagearbeiten über die Wasseroberfläche gehoben werden können. Die entstehenden Kosten und Aufwand werden hierdurch erheblich reduziert. Ebenfalls erlaubt die Montage am Pfeiler die Ausrichtung, bzw. Nachkorrektur der Laufräder, zur besseren Anpassung an die herrschenden Strömungsbedingungen. Hierdurch bietet sich außerdem ähnlich wie bei Windrädern die Möglichkeit zur Leistungsbegrenzung bei zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten.³⁹

Weiterhin wird die Möglichkeit diskutiert, die Pfeiler als Fundament für Offshore – Windkraftanlagen zu verwenden. Solche Hybridanlagen würden einige Vorteile bieten, wie zum Beispiel eine niedrigere Anzahl an notwendigen Netzanschlüssen und einen geringeren Platzverbrauch. Insbesondere bei unterschiedlichen Anströmungsrichtungen von Wind und Wasser könnten aber auch extreme Belastungen auftreten, die eine höhere Stabilität und bessere Verankerung der Anlage erfordern würden.⁴⁰

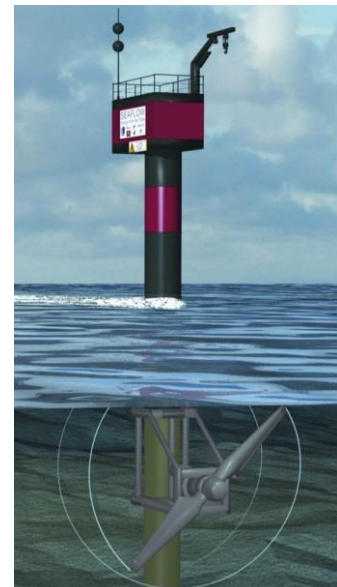


Abbildung 9 Bauweise mit einem Rotor (BINE, 2004)

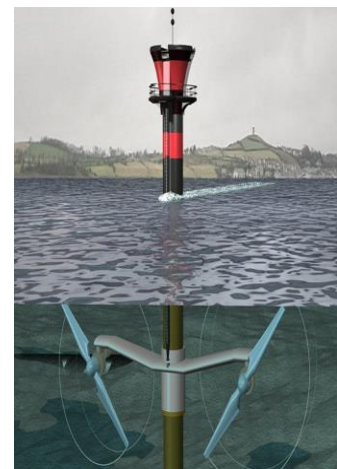


Abbildung 10 Bauweise mit zwei Rotoren (Taylor, 2007)

³⁸ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

³⁹ (Bard, 2003)

⁴⁰ (Caraiman, Nichita, Minzu, Dakyo, & Jo, 2011)

Ein Prototyp ist seit 2003 vor der Küste Großbritanniens im Einsatz. An einem ca. 50 m hohen Pfeiler ist ein Rotor mit einem Durchmesser von 11 m und einer Nennleistung von 300 kW angebracht. Um die durch den Tidenhub verursachten Strömungen optimal nutzen zu können, sind die Rotorblätter der Anlage um 180° verstellbar. Ausgehend von diesem Projekt wurde 2008 bei Strangford in Nordirland die erste kommerzielle Anlage in Betrieb genommen.⁴¹ Diese nutzt eine Bauweise mit 2 Rotoren mit einem Durchmesser von je 16 m und einer Nennleistung von je 600 kW. Durch die hohe Energiedichte des Wassers benötigt ein Meeresströmungskraftwerk einen deutlich geringeren Rotordurchmesser für die gleiche Leistung, als ein Windkraftwerk. Hierdurch wird die Kosteneffizienz deutlich gesteigert und die Möglichkeit geschaffen, mehrere Anlagen in unmittelbarer Nähe zueinander zu betreiben.



Abbildung 11 Bauweise Unterwasserturbine (Hydroworld, 2011)

3.3.2. Vor- und Nachteile von Strömungskraftwerken

Vorteile:

- Die gute Gleichmäßigkeit und Vorhersagbarkeit von Meeresströmungen gewährleistet eine gute Einschätzung der Produktivität.
- Aufgrund der hohen Energiedichte von Wasser kann bereits bei niedriger Fließgeschwindigkeit Energie produziert werden.⁴²
- Anlagen dieser Art stellen einen geringen optischen Umwelteingriff dar.
- Durch die Lagerung im Nearshore-Bereich sind nur kurze Transportwege ins örtliche Stromnetz notwendig.

Nachteile:

- Eine Verankerung im Boden ist notwendig, wodurch erhöhte Kosten und Aufwand entstehen und die Standortwahl begrenzt wird.
- Da noch keine Massenanfertigung möglich ist, sind die Kosten für neue Anlagen noch sehr hoch.
- Die Turbinen kommen direkt mit Salzwasser in Kontakt. Dadurch entsteht eine starke Korrosionswirkung.

⁴¹ (Giesecke, Heimerl, & Mosonyi, 2014)

⁴² (Giesecke & Mosonyi, 2009)

- Die Turbinen stellen trotz der langsamen Rotation eine Gefahr für Meeresbewohner dar und verursachen Lärmemissionen.
- Die Auswirkungen auf örtliche sowie globale Strömungsverhältnisse, die durch einen großflächigen Einsatz von Strömungskraftwerken verursacht würden, sind noch nicht geklärt.
- Bei Anlagen, welche Gezeitenströmungen nutzen, ist die Energieproduktion ungleichmäßig.

3.3.3. Nutzbares Potential

Ähnlich wie bei den anderen bisher behandelten Energieträgern, schwanken auch die Angaben zum nutzbaren Potential mariner Strömungen deutlich. Während einige, in der Branche aktive, Unternehmen von 90 bis 120 GW Leistung und somit etwa 800 TWh/a möglicher Produktion ausgehen^{43,44}, schätzen andere Stellen das mögliche Potential auf bis zu 1.000 GW⁴⁵. Da zum letztgenannten Wert allerdings keine Angaben vorliegen, ob es sich um absolutes-, technisches oder nachhaltiges Potential handelt, werden die anderen Angaben als realistischer betrachtet.

Der Anteil der bisher quantifizierten Meeresströmungen beträgt gut 25 GW. Dieses Potential ist allerdings sehr ungleichmäßig verteilt. Mit geschätzten 10 GW an umsetzbarer Leistung gehört Großbritannien weltweit zu den Ländern mit den besten Voraussetzungen. Andere Staaten mit guten Bedingungen für die Energiegewinnung aus Meeresströmungen sind u.a. Kanada, China, Japan, Russland und Australien. Die bisher weltweit quantifizierten Potentiale können der [Abbildung 20](#) im Anhang entnommen werden.

3.3.4. Berechnungsgrundlage

Der Rotor eines Meeresströmungskraftwerks wird ausschließlich über die kinetische Energie des Wassers angetrieben. Die Leistung berechnet sich nach der Formel:

$$P_W = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 = \frac{1}{2} * \rho * \pi * r^2 * v^3$$

Formel 2

- ρ = Dichte des Wassers [kg/m³]
- P_W = Im Wasser enthaltene, Leistung [W]
- A = Vom Rotor überstrichene Fläche [m²]
- v = Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
- r = Radius des Rotors [m]

Da die im Wasser enthaltene kinetische Energie nicht vollständig auf den Rotor übertragen werden kann, da es sonst zum Stillstand kommen würde, ist hier noch ein Beiwert notwendig,

⁴³ (Atlantis Resources)

⁴⁴ (Siemens AG, 2012)

⁴⁵ (IRENA, 2014)

der das Verhältnis zwischen vorhandener und abgegebener Energie angibt. Hier findet der Leistungsbeiwert nach Betz⁴⁶ Verwendung, der besagt, dass dieser Anteil niemals einen höheren Wert als $\frac{16}{27}$ annehmen kann. Bei momentan im Einsatz befindlichen Anlagen liegt dieser Wert allerdings eher zwischen 40 und 50%.⁴⁷

Somit lässt sich die Leistung einer Meeresströmungsturbine nach unten stehender Formel berechnen.

$$P = P_w * c_p * \eta$$

Formel 3

- P = Leistung der Turbine [W]
- c_p = Leistungsbeiwert nach Betz [-]
- η = Wirkungsgrad der Turbine [-]

Der Leistungsbeiwert ist u.a. abhängig von der sogenannten Schnelllaufzahl, welche das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit an der Blattspitze und der Strömungsgeschwindigkeit angibt. Bei hohen Schnelllaufzahlen, wie sie von Wind- und Wasserkraftanlagen erreicht werden, bietet ein zweiblättriger Rotor theoretisch den höchsten Leistungsbeiwert. Trotz dessen finden Zweiblattrotoren bei Windkraftanlagen quasi keine Verwendung, da sie eine deutlich höhere mechanische Belastung verursachen, als Rotoren mit drei Blättern.⁴⁸ Aufgrund der deutlich niedrigeren Strömungsgeschwindigkeit von Wasser im Vergleich zu Wind, treten diese Probleme bei Meeresströmungskraftwerken allerdings nicht auf, weshalb hier hauptsächlich Rotoren mit zwei Blättern Verwendung finden, was zusätzlich für geringere Materialkosten sorgt.

⁴⁶ (Kaltschmitt & Streicher, 2009)

⁴⁷ ebd.

⁴⁸ ebd.

4. Technologien ohne wirtschaftliche Nutzung

Dieses Kapitel behandelt Meereskraftwerke, für die noch keine kommerzielle Nutzung umgesetzt werden konnte.

4.1. Osmosekraftwerke

Neben der Umwandlung von kinetischer und potentieller Energie des Wassers in elektrische Energie, können auch Unterschiede in Temperatur oder Salzgehalt zur Energieerzeugung genutzt werden. Kraftwerke dieser Art können unter dem Begriff „Gradientenkraftwerke“ zusammengefasst werden, werden allerdings in dieser Arbeit in zwei separaten Abschnitten behandelt.

4.1.1. Funktionsweise

Als Osmose wird der Konzentrationsausgleich zweier ungleich konzentrierter Lösungen über eine semipermeable Membran bezeichnet. Diese Membran ist dabei zwar durchlässig für das Lösungsmittel, nicht jedoch für den darin gelösten Stoff. Dieses Prinzip kann zur Erzeugung elektrischer Energie überall dort eingesetzt werden, wo Wasserströme unterschiedlicher Salinität aufeinandertreffen. Dies ist zum Beispiel bei Flussmündungen in das Meer gegeben, wo Süßwasser auf Meerwasser mit einem durchschnittlichen Salzgehalt von etwa 3,5 % trifft. Eine weitere mögliche, wenn auch ökologisch fragwürdige Nutzungsmöglichkeit bietet sich bei der Einleitung salzhaltiger Abwässer in Flüsse.⁴⁹

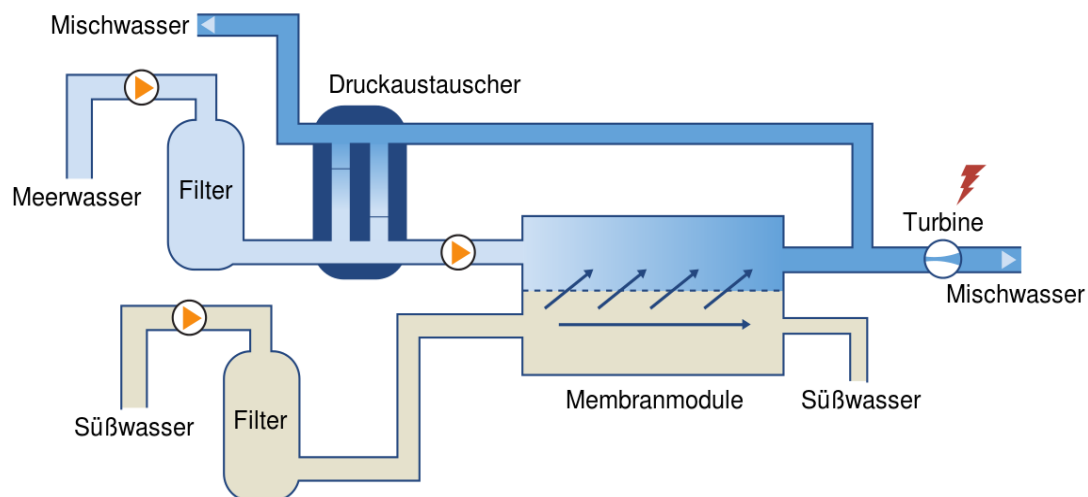


Abbildung 12 Funktionsweise eines Osmosekraftwerks (Statkraft)

Stehen Süß- und Salzwasser über eine wasserdurchlässige, jedoch salzdurchlässige Membran in Kontakt, so kann eine Minderung des Salzgradienten nur über einen Volumenstrom von der Süß- zur Salzwasserseite erfolgen. Hierdurch entsteht auf der Salzwasserseite ein

⁴⁹ (Stenzel P., 2012)

Überdruck, welcher als „Osmotischer Druck“ bezeichnet wird und zur Energieerzeugung über eine Turbine und einen Generator wieder abgebaut werden kann. Nach der Entspannung des Mischwassers über die Turbine, kann ein Teil der Energie über einen Druckaustauscher genutzt werden, um eine größere Menge an frischem Meerwasser in die Mischkammer zu pumpen. Der gesamte Prozess ist in [Abbildung 12](#) schematisch dargestellt. Eine wirtschaftliche Nutzung von Osmosekraftwerken wird momentan noch durch die zu hohen Kosten und die zu niedrige Effizienz geeigneter Membranen verhindert.⁵⁰

4.1.2. Vor- und Nachteile von Osmosekraftwerken

Vorteile:

- Durch die Lage an der Küste, sind Osmosekraftwerke deutlich weniger anfällig für extreme Wetterereignisse, als auf offener See gelegen Kraftwerke.
- Die Energietransportwege ins örtliche Stromnetz sind kürzer als bei Offshore-Kraftwerken, wodurch ein geringerer Energieverlust vorliegt.
- Die Energieerzeugung ist unabhängig von Einflüssen wie Jahreszeit, Tageszeit oder Wetter und somit rund um die Uhr möglich.

Nachteile:

- Durch den Kontakt zwischen Pumpen und Turbinen mit Salzwasser treten hohe Korrosionswirkungen auf.
- Osmosekraftwerke haben einen hohen Platzbedarf, was zusätzlich eine starke optische Beeinträchtigung bedeutet.
- Die Auswirkungen auf einige Meeresbewohner, welche an bestimmte Salzgehalte im Wasser angepasst sind, ist noch fraglich.
- Schifffahrtsrouten können beeinträchtigt werden.

4.1.3. Nutzbares Potential

Theoretisch ist jede Flussmündung mit ausreichender Größe zur Errichtung eines Osmosekraftwerks geeignet. Realistisch betrachtet kann jedoch nur ein Bruchteil des Flusswassers genutzt werden, um eine übermäßige Umweltbelastung zu vermeiden und Schiffverkehr auch weiterhin zu ermöglichen. Deshalb existieren zur osmotischen Energieerzeugung hauptsächlich Angaben zum ökologischen Potential. Diese bewegen sich in einem Bereich zwischen 520 TWh/a⁵¹ und 1.100 TWh/a⁵², wobei die zweite Schätzung davon ausgeht, dass etwa 10 %, des ins Meer einströmenden Flusswassers in Osmosekraftwerken genutzt würde.

⁵⁰ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

⁵¹ (Stenzel & Wagner, 2011)

⁵² (Helfer & Lernckert, 2015)

4.1.4. Berechnungsgrundlage

Die Leistungsfähigkeit eines Osmosekraftwerks kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$P = \frac{1}{2} * \Pi * Q * \eta$$

Formel 4⁵³

- Π = Osmotischer Druck [bar]
- η = Wirkungsgrad der Gesamtanlage [-]
- Q = Volumenstrom zwischen Süßwasser und Salzwasser [m³/s]

Der Osmotische Druck berechnet sich für eine salzhaltige Lösung nach der Formel:

$$\Pi = c * i * R * T$$

Formel 5⁵⁴

- c = Stoffmengenkonzentration [mol/m³]
- i = Van-'t-Hoff-Faktor [-]
- R = Universelle Gaskonstante [J/(mol*K)]
- T = Absolute Temperatur [K]

Der Van-'t-Hoff-Faktor stellt ein Maß für die Löslichkeit eines Stoffes dar und gibt Auskunft darüber, wie viele Teilchen sich nach der Dissoziation in der Lösung befinden. Es handelt sich bei ihm um einen Stoffwert, der aus Tabellen entnommen werden kann.

Für die Berechnung des Volumenstroms gilt die Beziehung:

$$Q = k * (\Pi - \Delta p) * A$$

Formel 6⁵⁵

- k = Durchlässigkeitsbeiwert der Membran [m³/(s*bar*m²)]
- Δp = Druckdifferenz zwischen Süßwasser und Salzwasser [bar]
- A = Membranfläche [m²]

⁵³ (Blatter, 2015)

⁵⁴ (Makosso, Ruiz-Tesche, Smith, & Gutkowski, 2009)

⁵⁵ ebd.

4.2. Meereswärmekraftwerke / Ocean Thermal Energy Converters

Die zweite Form von Gradientenkraftwerken nutzt die unterschiedlichen Temperaturen zwischen den oberflächennahen (ca. 0 – 50 m) und den tieferen Schichten (etwa 800 – 1.000 m) der Wassersäule⁵⁶. Um eine effektive Nutzung des Wärmegradienten zu ermöglichen, sollte ein Temperaturunterschied von mindestens 20° C gegeben sein⁵⁷, wodurch die möglichen Standorte für solche Anlagen, genau wie durch die Mindestwassertiefe, stark eingeschränkt werden.

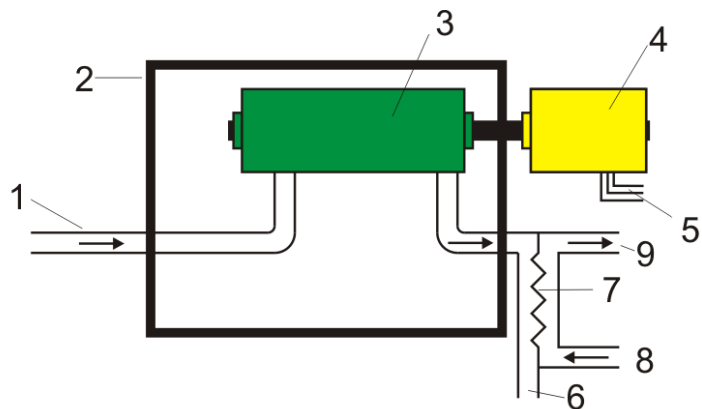
4.2.1. Funktionsweise

Momentan existieren drei primäre Funktionsprinzipien:

- der offene Kreislauf (Vgl. [Abbildung 13](#))
- der geschlossene Kreislauf (Vgl. [Abbildung 14](#))
- der Hybridkreislauf (Vgl. [Abbildung 15](#))

Offener Kreislauf

Im offenen Kreislauf wird das oberflächennahe, warme Meerwasser als Arbeitsmedium verwendet. Durch Erzeugen eines Vakuums wird die Siedetemperatur des Wassers soweit gesenkt, dass es verdampft. Dadurch wird eine Turbine angetrieben, die wiederum an einen Generator gekoppelt ist. Anschließend wird der Dampf mithilfe des kalten Wassers aus den tieferen Meeresschichten wieder kondensiert. Da das Wasser durch die Verdampfung vollständig entsalzt wurde, besteht die Möglichkeit, es anschließend als Trinkwasser abzuführen, vorausgesetzt, dass bei der Kondensation der direkte Kontakt mit dem als Kühlmedium arbeitenden Salzwasser vermieden wurde.⁵⁸



- | | |
|----------------------------|----------------|
| 1 Oberflächenwasser ~ 25°C | 6 Abwasser |
| 2 Vakuumkammer | 7 Kondensator |
| 3 Turbine | 8 Tiefenwasser |
| 4 Generator | 9 Abwasser |
| 5 Leitung zum Stromnetz | |

Abbildung 13 OTEC, offener Kreislauf (Wikipedia, 2004)

⁵⁶ (Vega, 1999)

⁵⁷ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

⁵⁸ (Multon, 2012)

Geschlossener Kreislauf

Beim geschlossenen Arbeitskreislauf wird anstatt von Meerwasser Ammoniak als Arbeitsmedium verwendet. Da dieses eine sehr niedrige Siedetemperatur besitzt, muss bei dieser Variante kein Vakuum erzeugt werden. Das Ammoniak wird direkt über einen Wärmeüberträger durch das warme Meerwasser aus den oberen Schichten verdampft und nach dem Durchlaufen der Turbine durch kaltes Wasser wieder kondensiert. Anschließend kann es erneut dem Wärmeüberträger zugeführt werden.⁵⁹

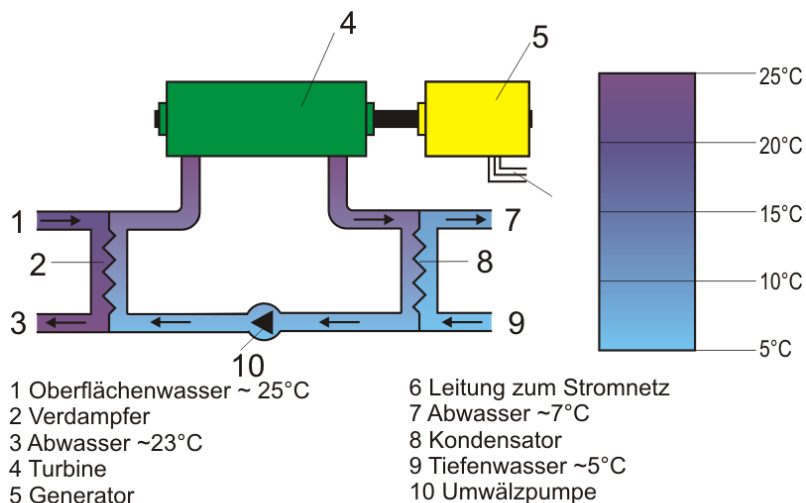


Abbildung 14 OTEC, geschlossener Kreislauf (Wikipedia, 2011)

Hybridkreislauf

Neben den beiden oben genannten Möglichkeiten, besteht außerdem die Möglichkeit der kombinierten Nutzung von offenem und geschlossenem Kreislauf. Die Reihenfolge der beiden Prozesse ist in beiden Kombinationen möglich. So kann zunächst das warme Meerwasser genutzt werden, um das Ammoniak zu verdampfen um anschließend in der Vakuumkammer selbst verdampft zu werden, oder das Salzwasser wird zuerst verdampft und anschließend das Ammoniak mithilfe des entstandenen Wasserdampfs. In beiden Fällen kann der kondensierte Dampf im letzten Schritt als Trinkwasser abgeführt werden.⁶⁰

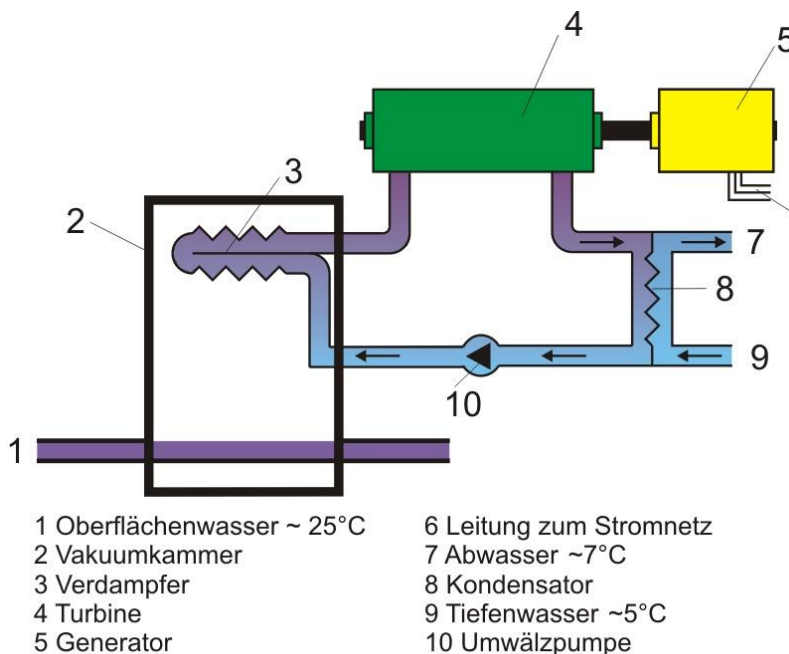


Abbildung 15 OTEC, Hybridkreislauf (Wikipedia, 2005)

⁵⁹ (Giesecke, Heimerl, & Mosonyi, 2014)

⁶⁰ ebd.

4.2.2. Vor- und Nachteile von OTEC

Vorteile:

- Die Energieerzeugung ist unabhängig von Einflüssen wie Jahreszeit, Tageszeit oder Wetter und somit rund um die Uhr möglich.
- OTEC stellt die mit Abstand größte nutzbare Energiequelle der Ozeane dar. Das weltweite Potential bewegt sich in einer Größenordnung mit der heutigen Energieproduktion aus Gas oder Kohle. (Vgl. [Kapitel 6](#))
- Die Energiegewinnung kann bei Nutzung des offenen-, bzw. des hybriden Kreislaufs gleichzeitig zur Süßwassererzeugung genutzt werden.
- Angepumptes, nährstoffreiches Tiefenwasser könnte positive Einwirkung auf das Ökosystem haben und kann in der Fischzucht verwendet werden.
- Die Extraktion von Mineralien aus Tiefenwasser wird bereits seit mehreren Jahrzehnten diskutiert. Bislang wurde sie hauptsächlich aufgrund der sehr hohen Kosten zum Anpumpen des mineralreichen Tiefenwassers verhindert. Da dieser Prozess bei einem Meereswärmekraftwerk ohnehin abläuft, besteht die Möglichkeit, Mineralien wie Magnesium oder Uran, welche im Meerwasser enthalten sind zu extrahieren.⁶¹

Nachteile:

- Der Wirkungsgrad von OTEC ist sehr niedrig. Thermodynamisch umsetzbar sind ca. 6 %, momentan realistisch jedoch eher 3 %⁶²
- Die Notwendigkeit von Unterseekabeln bei Offshore-Kraftwerken verursacht erhöhte Kosten und Aufwand bei der Installation.
- Durch die Lage auf offener See sind die Anlagen sehr anfällig gegen Stürme und hohe Wellen.
- Das Ausmaß der Umweltbelastung durch das kontinuierliche Anpumpen von großen Wassermengen aus tieferen Schichten ist noch fraglich.
- Die möglichen Auswirkungen auf den Wärmehaushalt der Ozeane durch einen globalen Einsatz von OTEC sind bisher noch unklar.
- Ammoniak als Arbeitsmedium kann bei Beschädigungen freigesetzt werden und Umweltschäden verursachen.
- Durch die Notwendigkeit einer ausreichenden Wassertiefe und Temperaturdifferenz sowie einer möglichst geringen Entfernung zur Küste, sind die weltweiten Ressourcen ungleichmäßig verteilt.

⁶¹ (Charlier, 1993)

⁶² (Giesecke & Mosonyi, 2009)

4.2.3. Nutzbares Potential

Die Angaben zum nutzbaren Potential von OTEC schwanken zwischen 3⁶³ und 10 TW⁶⁴, was einer jährlichen Energieproduktion zwischen 26.300 und 87.600 TWh entspräche. Diese Werte sind u.a. beschränkt durch die Vermeidung einer nachhaltigen Veränderung des Wärmehaushaltes der Weltmeere, die eingeschränkte Standortwahl und den niedrigen Wirkungsgrad solcher Anlagen. Trotz dessen stellt OTEC damit sehr wahrscheinlich die größte potentielle Energiequelle der Ozeane. Die Ressourcen verteilen sich auf etwa 80 Staaten in den tropischen und subtropischen Klimazonen.⁶⁵

Wie Abbildung 18 im Anhang zu entnehmen ist, konzentrieren sich die potentiellen Gebiete für marine Wärmekraftnutzung zwischen dem 30ten Breitengrad nördlicher Breite und dem 30ten Breitengrad südlicher Breite. Die höchste Temperaturdifferenz von 24°C zwischen höheren und tieferen Wasserschichten findet sich demnach vor der nördlichen Küste Papua-Neuguineas.

4.2.4. Berechnungsgrundlage

Betrachtet man zunächst die Energiemenge, die in einem idealen System vom warmen Tiefenwasser abgegeben werden könnte, so berechnet sich diese nach der Formel:

$$P_w = \rho * c * Q * \Delta T$$

Formel 7⁶⁶

- P_w = Maximale Leistungsabgabe des warmen Wassers [W]
- ρ = Dichte des Wassers [kg/m³]
- c = Spezifische Wärmekapazität des Wassers [J/(kg*K)]
- Q = Durchfluss [m³/s]
- ΔT = Temperaturdifferenz zwischen warmem und kaltem Wasser [K]

Die tatsächlich abgegebene Energiemenge kann mithilfe des sogenannten Carnot-Wirkungsgrades berechnet werden. Dieser stellt ein Maß für die größtmögliche Effizienz bei der Umwandlung von Wärmeenergie zu kinetischer Energie dar und berechnet sich nach folgender Formel:

$$\eta_{carnot} = \frac{\Delta T}{T_h}$$

Formel 8

- η_{carnot} = Carnot-Wirkungsgrad
- T_h = Temperatur des warmen Wassers

⁶³ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

⁶⁴ (Hordeski, 2011)

⁶⁵ (Lockheed Martin, 2016)

⁶⁶ (Twidell & Weir, 2006)

Selbst bei den idealen erreichbaren Bedingungen läge dieser Wert nur bei etwa 7%, tatsächlich realistisch sind jedoch eher 2-3%.⁶⁷

Die maximal erzeugbare Leistung eines Meereswärmekraftwerkes lässt sich somit nach der Formel

$$P = \frac{\rho * c * Q * (\Delta T)^2}{T_h}$$

Formel 9

berechnen.⁶⁸

4.3. Depressionskraftwerke

Die letzte in dieser Ausarbeitung betrachtete Art von Meereskraftwerken stellt eine Sonderform dar, die keiner der drei genannten Kategorien: Offshore-, Nearshore oder Shoreline-Kraftwerk zugeordnet werden kann.

4.3.1. Funktionsweise

Bei einem Depressionskraftwerk wird Meerwasser in eine nahe gelegene, für eine Flutung ausgebauten Senke geleitet. Die Höhendifferenz zwischen Senke und Meer, auch als Depression bezeichnet, kann hierbei zur Erzeugung von elektrischer Energie genutzt werden. Durch kontinuierliche Verdunstung der so gesammelten Wassermengen, kann ein dauerhafter Zustrom über die Turbinen ins Wasserbassin aufrechterhalten werden. Verwendung finden könnten diese Kraftwerke in Gebieten mit ganzjährig hoher Sonneneinstrahlung und damit verbunden einer hohen Evaporationsrate. Um eine maximale Verdunstung und somit einen möglichst hohen Zustrom in das Verdunstungsbecken zu gewährleisten, muss die Wasseroberfläche maximiert werden. Daraus folgt, dass sich die maximale Energieausbeute bei einem Gleichgewicht zwischen Zustrom und Verdunstung realisieren lässt.⁶⁹

Es besteht weiterhin die Möglichkeit, ein Depressionskraftwerk mit einem Pumpspeicherkraftwerk zu kombinieren und so Engpässe in der Energieproduktion auszugleichen.

Bis heute gibt es noch keine wirtschaftliche Nutzung eines Depressionskraftwerks. Lediglich Projektstudien für einige mögliche Standorte wurden durchgeführt. Das prominenteste Beispiel befindet sich in der Qattara-Senke im Nordwesten Ägyptens. Die Entfernung zum Mittelmeer beträgt etwa 80 Kilometer, der Tiefste Punkt liegt 133 Meter unter dem Meeresspiegel. Eine mögliche Umsetzung des Projekts ist in [Abbildung 16](#) dargestellt.

⁶⁷ (Twidell & Weir, 2006)

⁶⁸ ebd.

⁶⁹ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

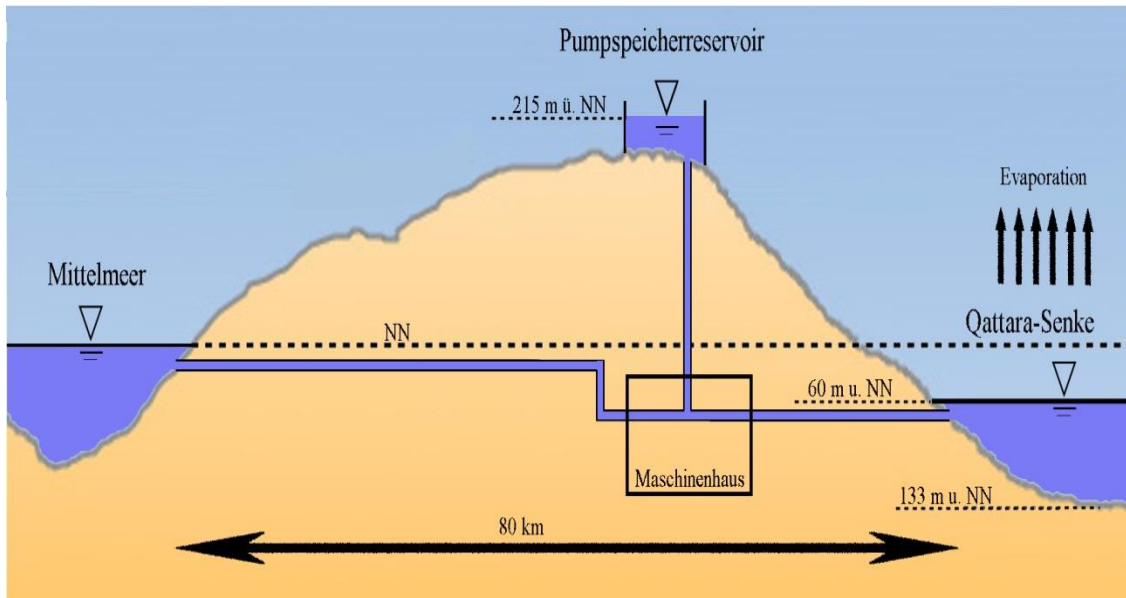


Abbildung 16 Konzeptzeichnung Qattara-Depressionskraftwerk, eigene Darstellung

4.3.2. Vor- und Nachteile von Depressionskraftwerken

Vorteile:

- Durch die hohen Evaporationsraten und den Anstieg des örtlichen Grundwasserspiegels können in umliegenden Gebieten drastische Erhöhungen des Niederschlags auftreten. Hierdurch wird die wirtschaftliche Nutzbarkeit deutlich erhöht.
- Sowohl eine kontinuierliche Stromerzeugung, als auch der Einsatz zu Spitzenbedarfszeiten sind durch eine Kombination mit einem Pumpspeicherkraftwerk möglich.⁷⁰

Nachteile:

- Die Flutung eines riesigen Gebiets führt zum Verlust von Lebensraum der heimischen Tier- und Pflanzenarten sowie Menschen.
- Die klimatischen Auswirkungen sind bisher unzureichend geklärt.
- Der Bau eines Kanals zwischen Meer und Wasserbassin ist mit hohen Kosten verbunden.
- Das Zurückbleiben des Salzes im Basin durch den Evaporationsvorgang kann zur Versalzung des Bodens führen.
- Die Turbine kommt mit Salzwasser in Kontakt, wodurch eine starke Korrosionswirkung entsteht.

⁷⁰ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

4.3.3. Nutzbares Potential

Zu dieser Technologie konnten keine Potentialabschätzungen gefunden werden. Da allerdings weltweit nur einige mögliche Standorte existieren, wird die umsetzbare Energiemenge relativ gering sein. Studien für das bekannteste Beispiel in der Qattara-Senke gehen von einer möglichen Energieerzeugung von etwa. 3,1 TWh/a aus⁷¹, was nur gut 0,3 % des ägyptischen Energiebedarfs decken könnte.⁷²

4.3.4. Berechnungsgrundlage

Zur Berechnung der Leistung eines Depressionskraftwerks kann die Leistungsformel einer Turbine verwendet werden.

Die Fallhöhe ist hierbei die Höhendifferenz zwischen Meeresspiegel und Wasserspiegel des Bassins. Studien haben ergeben, dass für eine maximale Leistung diese Differenz konstant gehalten werden sollte.⁷³ Wie bereits in [Kapitel 4.3.1](#) festgestellt, sollte der Zustrom der Verdunstung entsprechen, um eine maximale Energieausbeute zu erreichen. Der Zustrom Q kann somit über die ortsüblichen Verdunstungsraten, multipliziert mit der Wasseroberfläche im Bassin errechnet werden.

$$P = h * Q * g * \rho * \eta$$

Formel 10

- P = Leistung der Turbine [W]
- h = Fallhöhe [m]
- Q = Durchfluss [m³/s]
- g = Erdbeschleunigung [m/s²]
- η = Wirkungsgrad der Gesamtanlage [-]

5. Tabellarische Zusammenfassung

In der nachfolgenden Tabelle sollen die oben erläuterten Kraftwerkstypen noch einmal stark komprimiert gegenübergestellt werden. Besonderer Fokus wird hierbei auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Nutzungsarten mariner Energieträger bei gegebenen Randbedingungen gelegt.

⁷¹ ebd.

⁷² (International Energy Agency, 2015)

⁷³ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

Tabelle 3 Zusammenfassung der Ergebnisse

	Gezeitenkraftwerk	Wellenkraftwerk	Strömungskraftwerke	Meereswärmekraftwerk	Osmosekraftwerk	Depressionkraftwerk
Notwendige Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Mind. 5 m Wasserpegeldifferenz • Bucht mit möglichst schmaler Form 	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichst große Wellenhöhe • Ausreichende Wassertiefe 	<ul style="list-style-type: none"> • Strömungsgeschwindigkeit bei 2-2,5 m/s • Wassertiefe zwischen 20-35 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturdifferenz von mindestens 20 °C • Wassertiefe von mindestens 1.000 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichst hoher Salzgradient • Ausreichende Frischwasserzufuhr 	<ul style="list-style-type: none"> • Großer Höhenunterschied zum Meer • Große Wasseroberfläche
Grundlage der Energiegewinnung	Wasserspiegeldifferenz zwischen Ebbe und Flut	Kinetische und potentiell Energie der Wellen	Kinetische Energie aus Massenbewegungen	Temperaturgefälle zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser	Salzgefälle zwischen Süß- und Salzwasser	Höhenunterschied zwischen Meer und Senke
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Gut vorhersagbare Energieproduktion • Bereits jahrzehntlang erprobt 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige Umweltbelastung • Durchgängige Energieversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz als Grundlastkraftwerk möglich • Gut vorhersagbare Produktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Riesiges globales Potential • Trinkwassergewinnung als Nebeneffekt 	<ul style="list-style-type: none"> • Energieproduktion an Land möglich • Geringe Transportwege und Verluste 	<ul style="list-style-type: none"> • Spitzenlast- und Grundlastbetrieb • Niederschlagserrhöhung möglich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Störung der ökologischen Durchgängigkeit • Wenige potentielle Standorte 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Konsens über optimale Nutzung • Hohe Kosten zur Energieproduktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Globale Umweltauswirkungen ungeklärt • Hohe Korrosionswirkung 	<ul style="list-style-type: none"> • Noch nicht kosteneffizient • Hohe Anfälligkeit für Extremereignisse 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Flächenverbrauch • Starker optischer Umwelteingriff 	<ul style="list-style-type: none"> • Verlust von Lebensraum • Klimaauswirkungen noch ungeklärt
Potential	120 – 400 GW	~200 GW	90 - 120 GW	3.000 - 10.000 GW	60 - 200 GW	k.A.
Weiterführende Literatur	<ul style="list-style-type: none"> - (Giesecke & Mosonyi, 2009) - (Multon, 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> - (Cruz, 2008) - (Lynn, 2014) 	<ul style="list-style-type: none"> - (Lynn, 2014) 	<ul style="list-style-type: none"> - (Multon, 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> - (Stenzel P. , 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> - (Giesecke & Mosonyi, 2009)

6. Gegenüberstellung des weltweiten Energiebedarfs und der Kapazitäten mariner Energieproduktion

In diesem Kapitel sollen die ermittelten nutzbaren Energiepotentiale aus marinen Energieträgern noch einmal zusammengefasst und dem weltweiten Energieverbrauch gegenübergestellt werden, um eine bessere Einordnung der genannten Zahlen zu ermöglichen. Alle in diesem Kapitel erstmalig verwendeten Werte sind der „Key World Energy Statistics 2015“ mit Bezugsjahr 2013 entnommen.⁷⁴

Die restlichen Werte sind aus den Kapiteln zum globalen Potential der einzelnen Energieformen übernommen. Hierbei wurde jeweils der als am realistischsten angenommene Wert verwendet, bzw. bei ungenauen Angaben ein Mittelwert gebildet.

Mtoe steht hierbei für „Million tonnes of oil equivalent“, bzw. „Megatonne Öleinheiten“ und entspricht der Energiemenge, welche beim Verbrennen einer Millionen Tonnen Erdöl freigesetzt wird. Der Umrechnungsfaktor von Mtoe zu Twh beträgt $\frac{1}{0,086}$.⁷⁵

Weltweite Energieproduktion 2013:

Tabelle 4 Weltweite Energieproduktion nach Energieträger mit Bezugsjahr 2013

Energieträger	Produktion [Mtoe]	Produktion [TWh]	Anteil an globaler Produktion
Gesamt	13.541	157.453	100 %
Öl	4.211	48.968	31,1 %
Kohle	3.913	45.504	28,9 %
Gas	2.898	33.695	21,4 %
Biokraftstoffe	1.381	16.060	10,2 %
Kernkraft	650	7.558	4,8 %
Wasserkraft	325	3.779	2,4 %
Andere	162	1.889	1,2 %

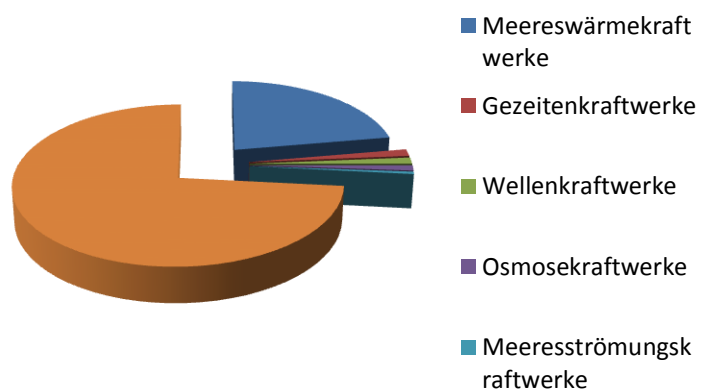
⁷⁴ (International Energy Agency, 2015)

⁷⁵ ebd.

Tabelle 5 Möglicher Anteil mariner Energieträger an weltweiter Energieproduktion mit dem Bezugsjahr 2013, tabellarische Darstellung

Energieträger	Mögliche Produktion [Mtoe]	Mögliche Produktion [TWh]	Möglicher Anteil am Weltenergiebedarf
Gezeitenenergie	196	2.278	1,4 %
Wellenenergie	172	2.000	1,3 %
Meeresströmungsenergie	69	800	0,5 %
Osmosekraftwerke	146	1.100	0,7 %
Meereswärmekraftwerke	3.013	35.040	22,3 %

An dieser Stelle muss zunächst noch einmal verdeutlicht werden, dass es sich bei diesen Werten um Schätzungen handelt, die zwar momentan als am realistischsten betrachtet werden, aber teilweise von anderen Angaben deutlich abweichen und sich auch zukünftig als nicht korrekt erweisen könnten. Die tatsächlichen Werte können somit auch deutlich höher oder niedriger, als die hier angenommenen ausfallen.



Nach dieser Rechnung könnte theoretisch knapp über ein Viertel des gesamten Welte-

Abbildung 17 Möglicher Anteil mariner Energieträger an weltweiter Energieproduktion mit Bezugsjahr 2013, graphische Darstellung

nergiebedarfs durch Energie aus dem Meer gedeckt werden, wovon OTEC den allergrößten Teil beiträgt. Zwar wirken die restlichen Werte im weltweiten Vergleich zunächst relativ gering, jedoch muss berücksichtigt werden, dass nicht alle Staaten aufgrund ihrer geographischen Lage einen direkten Zugang zu den marinen Energieträgern besitzen. Für einige Staaten, wie zum Beispiel Großbritannien, Indien, die USA oder Kanada bietet sich durch die unmittelbare Verfügbarkeit eine Chance, einen nicht unerheblichen Teil ihres Energiebedarfs über eine nachhaltige und umweltverträgliche Energiequelle zu decken.

7. Zukunftsausblick

Welche der behandelten Technologien zukünftig einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung leisten wird, ist bisher noch fraglich. Zum Abschluss der Arbeit soll in diesem Kapitel eine Beurteilung der Zukunftschancen der vorgestellten Kraftwerkstypen erfolgen. Welche Form der marinen Wasserkraftnutzung gute Aussichten hat, weiterentwickelt und ausgebaut zu werden, soll anhand folgender Fragestellungen beurteilt werden.

- Überwiegen momentan die Vor- oder Nachteile?
- Inwieweit sind die momentanen Probleme der Technologie lösbar?
- Wie groß ist das globale Potential?
- Wie groß sind die Eingriffe in die Umwelt?
- Wie hoch sind die notwendigen Investitionen?

7.1. Zukunftsausblick Gezeitenkraftwerke

Die geringe Anzahl an möglichen Standorten stellt bei dieser Technologie ein nicht lösbares Problem dar. Auch die starken Eingriffe in die Umwelt werden schon lange kontrovers diskutiert. Hinzu kommt, dass die Gezeitenenergie teilweise auch von Strömungskraftwerken genutzt werden kann und somit einige der Probleme von Tidal Barrage umgangen werden könnten. In den 50 Jahren, die seit der Errichtung des ersten Kraftwerks in La Rance vergangen sind, wurden nur eine kleine Menge neuer Anlagen errichtet⁷⁶. Von Vorteil ist hierbei jedoch, dass die existierenden Anlagen sehr zuverlässig arbeiteten und aufgrund der langjährigen Erfahrung das notwendige Fachwissen bereits existiert, was die Gezeitenenergie deutlich von anderen marinen Energieträgern abhebt.

Zwar liegen die Kosten je Kilowattstunde relativ niedrig, die direkten Kosten zur Errichtung des Kraftwerks sind allerdings sehr hoch, weshalb sich Gezeitenkraftwerke mit vielen anderen Energieträgern nicht wirtschaftlich messen können.⁷⁷

Die zukünftige Entwicklung der Gezeitenkraftnutzung könnte sich je nach Region stark voneinander unterscheiden. In Zentraleuropa beispielsweise wurden mehrere geplante Projekte aufgrund der hohen Umweltbelastung wieder verworfen oder in anderer Form umgesetzt.⁷⁸ Da es sich hierbei um ein grundlegendes Problem handelt, das technisch nicht lösbar ist und sich zusätzlich mit Meeresströmungskraftwerken eine gute Alternative bietet, ist ein Ausbau von Tidal Barrage eher unwahrscheinlich.

In einigen Regionen, in denen Umweltschutz und Nachhaltigkeit noch nicht in dem Maße im öffentlichen Interesse stehen, wurden jedoch auch in den vergangenen Jahren einige neue Anlagen errichtet. Zusätzlich sind auch für die nächsten Jahre noch zahlreiche andere Projekte geplant. Als Beispiel sei hier China genannt, das plant, bis 2020 seine Energieproduktion aus Gezeitenkraft von knapp 4 MW auf über 100 MW auszubauen.⁷⁹

⁷⁶ (Multon, 2012)

⁷⁷ ebd.

⁷⁸ (Giesecke, Heimerl, & Mosonyi, 2014)

⁷⁹ (Zhang, Lin, & Liu, 2014)

7.2. Zukunftsausblick Meeresströmungskraftwerke

Ein großer Vorteil von Meeresströmungskraftwerken liegt in der guten Vorhersagbarkeit der Energieabgabe. Abhängigkeiten von Wetter, Jahres- oder Tageszeit sind ein häufig genanntes Problem vieler erneuerbarer Energieträger. Ein Betrieb im Verbund mit herkömmlichen Kraftwerken ist daher unerlässlich. Strömungskraftwerke können jedoch im Gegensatz zu den meisten anderen erneuerbaren Energien als Grundlastkraftwerke verwendet werden. Hiervon ausgenommen sind allerdings Gezeitenströmungen, da diese ebenfalls keine gleichmäßige Energiequelle darstellen. Weiterhin spricht für eine positive Weiterentwicklung, dass das Konzept zur Nutzung der Strömungsenergie mehr oder weniger einheitlich ist. Meeresströmungskraftwerke befinden sich bereits in einer späteren Entwicklungsphase, als beispielsweise Wellenkraftwerke, bei denen bis heute kein Konsens zur optimalen Nutzung besteht.

Klärungsbedarf besteht allerdings noch bezüglich der Umwelteinwirkungen bei einer großflächigen Nutzung der Technologie. Einzelne Anlagen in der Testphase hatten zwar relativ geringe Auswirkungen auf das marine Ökosystem, die Einflüsse einer weltweiten Nutzung, insbesondere auf die globalen Strömungsverhältnisse müssen allerdings noch abschließend geklärt werden.

Wie bei allen in der Vergangenheit neu etablierten Energieträgern, sind auch bei Meeresströmungskraftwerken die Kosten für Konstruktion und Energieerzeugung noch verhältnismäßig hoch. Zukünftig ist hier jedoch durch verbesserte Technik, Massenproduktion und Subventionen ein deutlicher Preisrückgang zu erwarten.

Insgesamt erscheinen die genannten Problemstellungen durchaus lösbar und vor allem nicht untypisch für diese Phase der Entwicklung. Die Chancen für einen zukünftigen Ausbau der Meeresströmungsenergie erscheinen daher sehr gut.

7.3. Zukunftsausblick Wellenkraftwerke

Betrachtet man die Entwicklung von Wellenkraftwerken im Gegensatz zur Entwicklung anderer Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien, so fällt auf, dass Wellenenergienutzung deutlich hinter vielen anderen zurückbleibt. Im Zuge der Ölkrisen in den 1970er Jahren, rückten erneuerbare Energieträger stärker ins öffentliche Interesse. Bei Wellenenergie herrscht jedoch im Gegensatz zu vielen anderen bis heute kein Konsens über die optimale Nutzungsmöglichkeit. Der Markt wird hauptsächlich von vielen kleinen Unternehmen beherrscht, von denen jedes einen anderen Ansatz verfolgt. Investitionen von großen, globalen Unternehmen, welche notwendig wären, um eine schnelle Weiterentwicklung der Technologie zu gewährleisten, stellen eine Ausnahme dar⁸⁰, da sie auf einem Markt, auf dem so viele Ansätze konkurrieren, mit einem großen Risiko verbunden sind.

Auch in Fragen des Potentials herrscht deutliche Uneinigkeit, was bereits in [Kapitel 3.2.2](#) ausführlich erläutert wurde. Zwar könnte auch für den Fall, dass die eher vorsichtigen Prognosen zutreffen Wellenkraft einen beachtlichen Anteil zur Energieversorgung beitragen, hierfür ist allerdings zunächst die Einigung auf ein- oder zumindest wenige einheitliche Konzepte notwendig.

⁸⁰ (ABC Environment, 2015)

Ein weiterer wichtiger Aspekt liegt in der öffentlichen Wahrnehmung. So können sich die meisten Menschen zwar unter einer Windkraftanlage sofort etwas vorstellen unter einem Wellenkraftwerk jedoch deutlich weniger. Die öffentliche Akzeptanz stellt einen wichtigen Teil in der Entwicklung einer Technologie dar. Im Falle der Wellenkraft könnte sie u.a. durch Argumente wie die im Vergleich zu anderen marinen Energieträgern sehr niedrige Umweltbelastung gefördert werden.

Inzwischen befindet sich die Wellenergienutzung auf einem guten Weg, wie z.B. der für 2017 geplante Verkaufsstart der Archimedes Waveswing⁸¹ oder das weltweit größte Wellenkraftwerk in Australien, das momentan von Lockheed Martin errichtet wird, zeigen.⁸² Um diesen Trend beizubehalten, ist es aber notwendig, die Kosten für Energieerzeugung aus Wellen deutlich zu senken, was u.a. über weitere Investitionen in die Forschung möglich ist. Für den Fall, dass dies erreicht wird, könnten Wellenkraftwerke zukünftig einen zuverlässigen, effizienten und vor allem umweltverträglichen Energieversorger darstellen.

7.4. Zukunftsausblick Osmosekraftwerke

Ein Osmosekraftwerk ist heute zwar technisch umsetzbar, jedoch nicht wirtschaftlich. Aufgrund der hohen Kosten, könnte ein solches Kraftwerk am Markt nicht gegen die bereits etablierten Technologien bestehen. Unter günstigen Standortbedingungen wurden die Stromgestehungskosten einer Beispielanlage 2011 mit 0,28€/KWh berechnet⁸³ und liegen somit etwa doppelt bis dreifach so hoch, wie andere Energieträger. Maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit beitragen könnte eine Verbesserung der Energieeffizienz der verwendeten Membranen. Ebenso könnten bei einer kommerziellen Nutzung durch die Massenproduktion einiger Bauteile die Herstellungskosten für Osmosekraftwerke noch einmal deutlich reduziert werden.

Obwohl Energiegewinnung durch Osmose oft als vollkommen umweltverträglich angepriesen wird, existieren noch Bedenken hinsichtlich der Auswirkungen von Änderungen in der Salzkonzentration. Einige Organismen sind von einer bestimmten Salzkonzentration im Meerwasser abhängig. Die Vermischung von Salz- und Süßwasser im Einflussgebiet eines Osmosekraftwerks und die damit einhergehende Veränderung des Salzgehaltes könnten somit einen starken Eingriff in Teile des Ökosystems darstellen. Diese Einflüsse müssen vor einer wirtschaftlichen Nutzung noch untersucht und ggf. Lösungsvorschläge entwickelt werden.

Sollte der positive Trend der letzten Jahre bei der Effizienz der entwickelten Membranen beibehalten werden, könnte in einigen Jahren die Nutzung von Osmosekraftwerken auch ökonomisch umsetzbar sein. Zusammen mit dem großen globalen Potential und der Möglichkeit für eine gleichmäßige, ununterbrochene und saubere Energieerzeugung, bildet dies eine gute Grundlage für einen Ausbau und Weiterentwicklung der Osmoseenergie.

⁸¹ (AWS Ocean Energy, 2014)

⁸² (Lockheed Martin, 2016)

⁸³ (Stenzel & Wagner, 2011)

7.5. Zukunftsausblick Meereswärmekraftwerke

Die Meereswärmenutzung sieht sich einer Reihe von Herausforderungen gegenüber, die für eine Marktreife der Technologie noch bewältigt werden müssen. Testanlagen konnten bisher nur geringe Produktionsraten vorweisen, da ein großer Teil der gewonnenen Energie zum Antrieb der Pumpen für die Tiefenwasserförderung verwendet werden musste. Momentan liegen die erreichbaren Wirkungsgrade nur etwa bei der Hälfte des theoretisch möglichen.⁸⁴ Um eine Nutzung von Meereswärme trotz der hohen Kapitalkosten rentabel zu gestalten, sind hier noch technische Verbesserungen notwendig.

Neben einer effizienten Energieproduktion, muss ein Meereswärmekraftwerk weiterhin für mehrere Jahrzehnte den hohen Belastungen, welche auf offener See durch Stürme und Flutwellen auftreten, standhalten können.

Ähnlich wie Meeresströmungskraftwerke und Osmosekraftwerke, könnten auch Meereswärmekraftwerke als Grundlastkraftwerke verwendet werden. Im Unterschied zu den beiden erstgenannten, bewegt sich das Potential von Meereswärme aber in der Größenordnung eines Fünftels des momentanen Weltenergiebedarfs (Vgl. [Kapitel 6](#)). Da sich diese weltweiten Ressourcen aber nur auf etwa 80 Staaten verteilen, die einen direkten Zugang dazu besitzen, könnte der Anteil an der Energieproduktion in diesen Ländern umso größer sein.

Ähnlich wie bei den anderen behandelten Energieträgern, sind auch die ökologischen Auswirkungen einer globalen Nutzung der Meereswärme, wie zum Beispiel solche auf den weltweiten Wärmehaushalt der Ozeane, nicht ausreichend geklärt.

Die Zukunftschancen von OTEC stehen trotz der oben genannten Probleme sehr gut, da es aufgrund der kontinuierlich möglichen Energieversorgung und des gewaltigen Potentials einen deutlichen Vorteil gegenüber vielen anderen erneuerbaren Energien besitzt. Einige andere regenerative Energieträger, wie Meeresströmungskraftwerke können zwar auch als Grundlastkraftwerke verwendet werden, befinden sich beim Potential aber in einer vollkommen anderen Größenordnung als OTEC.

7.6. Zukunftsausblick Depressionskraftwerke

Insbesondere aufgrund der Tatsache, dass weltweit nur eine Handvoll möglicher Standorte zur Nutzung dieser Technologie existieren, werden Depressionskraftwerke falls überhaupt nur einen verschwindend geringen Anteil an der weltweiten Energieproduktion haben. Hinzu kommt, dass Pläne zum Bau eines solchen Kraftwerks bereits seit dem frühen 20. Jahrhundert existieren⁸⁵ und bis heute nicht umgesetzt wurden.

Auch die sehr hohen Kosten eines solchen Kraftwerks, verbunden mit dem extremen Aufwand zur Errichtung des notwendigen Kanals, machen eine Umsetzung unwahrscheinlich. Die Kosten für das Projekt Qattara-Senke wurden auf etwa 3 Milliarden Dollar geschätzt, bei einer Bauzeit von 10 Jahren.⁸⁶

⁸⁴ (Giesecke & Mosonyi, 2009)

⁸⁵ (Ball, 1927)

⁸⁶ (Ragheb, 2014)

Für diesen Kraftwerkstyp spricht allerdings, dass die notwendige Technologie bereits in sehr ähnlicher Weise seit Jahrzehnten in Laufwasserkraftwerken erfolgreich genutzt wird, wodurch im Gegensatz zu anderen marinen Energieträgern die Zahl an technischen Problemen und Forschungsbedarf eher gering ist.

Insgesamt überwiegen allerdings deutlich die Nachteile, weshalb eine starke wirtschaftliche Nutzung in der Zukunft als unwahrscheinlich betrachtet wird.

8. Fazit

Es hat sich gezeigt, dass Meereskraftwerke zukünftig eine gute Möglichkeit bieten könnten, zur Versorgung durch erneuerbare Energien beizutragen. Einige der am häufigsten genannten Kritikpunkte an regenerativen Energieträgern, treffen auf marine Wasserkraftwerke nicht zu. Hierzu zählt u.a. die bereits genannte Möglichkeit, als Grundlastkraftwerke genutzt zu werden, was einen deutlichen Vorteil gegenüber Wind- oder Solarenergie darstellt. Auch könnte die öffentliche Akzeptanz aufgrund der geringen visuellen Umweltverschmutzung deutlich höher ausfallen, als bei anderen Kraftwerkstypen.

Viele der genannten Probleme, wie zum Beispiel die hohen Kosten oder die verhältnismäßig geringe Menge an empirischen Daten sind durchaus typisch für diese Phase der Entwicklung bei neuen Energieträgern und lassen zukünftig noch Verbesserungen erwarten.

Um diese Potentiale zum Ausbau einer CO_2 -neutralen Energieversorgung auch nutzen zu können, ist es notwendig, die weitere Entwicklung der marinen Wasserkraftnutzung gezielt zu fördern. Hierzu zählen neben Subventionen und weiterer Forschung auch neue Impulse, um marine Energieträger mehr ins öffentliche Bewusstsein zu rücken.

9. Literaturverzeichnis

- ABC Environment. (10. Februar 2015). *abc.net*. Abgerufen am 1. September 2016 von <http://www.abc.net.au/environment/articles/2015/02/09/4160110.htm>
- Atlantis Resources . (Oktober 2014). Quantified global resources of 25GW. Edinburgh, Schottland.
- Atlantis Resources. (kein Datum). *Atlantis Resources*. Abgerufen am 12. Juli 2016 von <http://atlantisresourcesltd.com/marine-power/global-resources.html>
- Avery, W. H., & Wu, C. (1994). *Renewable Energy From the Ocean: A Guide to OTEC*. Oxford; New York: Oxford University Press.
- AW-Energy Ltd. (2012). Global wave energy resources for WaveRoller. Vantaa, Vantaa, Finnland.
- AW-Energy Oy. (2012). *aw-energy*. Abgerufen am 27. July 2016 von <http://aw-energy.com/wave-energy-resources/near-shore-vs-off-shore>
- AWS Ocean Energy. (2014). *awsocan.com*. Abgerufen am 25. August 2016 von <http://awsocan.com/technology/archimedes-waveswing-submerged-wave-power-buoy/>
- Ball, J. (1927). *Problems of the Libyan Desert*. geographicalj.
- Bard, J. (2003). *Wasserkraft ohne Fallhöhe - Strom aus Meeresströmungen*. Kassel: Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.
- Bibliographisches Institut. (kein Datum). Funktionsweise eines Gezeitenkraftwerks. Berlin, Berlin, Deutschland.
- BINE. (April 2004). *Energieforschung für die Praxis*. Abgerufen am 22. July 2016 von http://images.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.bine.info%2Ffileadmin%2Fcontent%2FPublikationen%2FProjekt-Infos%2F2004%2FProjekt-Info_04-2004%2Fbi_0404_06.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.bine.info%2Fpublikationen%2Fpublikation%2Fseaflo-w-strom-aus-me
- Blatter, M. (2015). *Atlas der Erneuerbaren Energien*. Bremgarten: Books on Demand.
- Caraiman, G., Nichita, C., Minzu, V., Dakyio, B., & Jo, C. (2011). *Concept study of offshore wind and tidal hybrid conversion based on real time simulation*. Las Palmas de Gran Canaria: European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality.
- Charlier, R. H. (1993). *Ocean Energies: Environmental, Economic and Technological Aspects of Alternative Power* . Elsevier Science.
- Cruz, J. (2008). *Ocean Wave eNergy; Current Status and Future Perspectives*. Bristol: Springer Verlag.
- Curley, R. (2012). *Renewable and alternative energy*. New York: Britannica Educational Publishing.

-
- Ecomare. (2015). *ecomare*. Abgerufen am 22. Juli 2016 von <http://images.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.ecomare.nl%2Ftypo3temp%2FGB%2F09588d27fe.png&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.ecomare.nl%2Fen%2Fencyclopedia%2Fnatural-environment%2Fwater%2Fwater-currents%2Ftides-and-water-levels%2F&h=247&w=435&tbid=U1qM>
- Gailfuss, M. (November 2001). *BHKW-Infozentrum*. Abgerufen am 12. Juli 2016 von <https://www.bhkw-infozentrum.de/innovative-energien/wellenkraft-energiequelle-der-zukunft.html>
- Giesecke, J., & Mosonyi, E. (2009). *Wasserkraftanlagen*. Stuttgart: Springer.
- Giesecke, J., Heimerl, S., & Mosonyi, E. (2014). *Wasserkraftanlagen*. Stuttgart: Springer Vieweg.
- Heinrichsen, D. (10. März 2013). *M.A.* Abgerufen am 20. July 2016 von idw-online: <https://idw-online.de/de/news60413>
- Helfer, F., & Lernckert, C. J. (Oktober 2015). The Power of Slinty Gradients: An Australian Example. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, S. 1-16.
- Hordeski, M. F. (2011). *Megatrends for Energy Efficiency and Renewable Energy*. Lilburn: The Fairmont Press.
- Hydroworld. (01. November 2011). *Hydroworld.com*. Abgerufen am 22. July 2016 von http://images.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.hydroworld.com%2Fcontent%2Fdam%2Fetc%2Fmedialib%2Fnew-lib%2Fhrw%2Fprint-articles%2Fvol-19%2Fissue-5%2F40419.res%2F_jcr_content%2Frenditions%2Fpennwell.web.400.340.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.hydrow
- International Energy Agency. (2015). *Key World Energy Statistics 2015*. Paris.
- International Energy Agency. (2015). *Key World Energy Statistics 2015*. International Energy Agency .
- IRENA. (2014). *Tidal Energy Technology Brief*. Abu Dhabi.
- Kaltschmitt, M., & Streicher, W. (2009). *Regenerative Energien in Österreich*. Hamburg & Graz: Vieweg + Teubner.
- Lockheed Martin. (2016). OTEC Thermal Resources. Bethesda, Maryland, USA.
- Lynn, P. A. (2014). *Electricity from Wave and Tide*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Makosso, S., Ruiz-Tesche, A., Smith, M., & Gutkowski, D. (2009). Flensburg, Schleswig-Holstein, Deutschland.
- Multon, B. (2012). *Marine Renewable Energy Handbook*. London: ISTE Ltd; John Wiley & Sons.
- o.V. (2012). *AW-Energy*. Abgerufen am 12. July 2016 von <http://aw-energy.com/about-waveroller/waveroller-concept>

- Ragheb, M. (21. August 2014). Pumped storage Qattara Depression solar-hydroelectric power generation.
- Redaktion Energy-Mag. (28. November 2013). *Energy-mag.com*. Abgerufen am 20. July 2016 von http://images.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.energy-mag.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2013%2F11%2FWaveroller%252BAW%252Benergy.jpeg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.energy-mag.com%2Fwellenkraftwerk-auf-franzoesisch%2F&h=326&w=580&tbid=VyN-Br62QF_WzM%3
- reNEWS Ltd. (15. März 2016). *reNEWS*. Abgerufen am 23. July 2016 von <http://renews.biz/101935/end-is-nigh-for-pelamis-device/>
- RWE. (2008). *RWE.de*. Abgerufen am 23. August 2016 von <http://www.rwe.de/web/cms/de/46204/magazin/2008/ausgabe-1/energien-aus-wasser-wind-biomasse/die-vielfalt-der-wellenkraftwerke/>
- Sandvik AB. (16. März 2016). *Sandvik.com*. Abgerufen am 22. July 2016 von <http://smt.sandvik.com/de/news-media/nachrichten-und-medien/2016/03/harnessing-the-power-of-the-ocean-products-for-clean-energy-project/>
- Siemens AG. (17. Februar 2012). Siemens strengthens its position in ocean power – Acquisition of Marine Current Turbines. Erlangen, Bayern, Deutschland.
- Sievers, F. (12. Juni 2003). *Handelsblatt*. Abgerufen am 12. July 2016 von <http://www.handelsblatt.com/archiv/prototyp-des-neuartigen-wellenkraftwerks-wave-dragon-wird-ans-daenische-netz-angeschlossen-kraftwerk-nutzt-die-energie-des-meeres/2252050.html>
- Soerensen, H. C. (Oktober 2006). PhD.
- Statkraft. (kein Datum). Funktionsweise eines Osmosekraftwerks. Oslo, Norwegen.
- Steckdose.de. (kein Datum). *Steckdose.de*. Abgerufen am 20. Juli 2016 von <http://www.steckdose.de/strom/wellenkraftwerk/>
- Stenzel, P. (2012). *Potentiale der Osmose zur Erzeugung und Speicherung von Elektrizität*. Berlin: Lit Verlag Dr. W. Hopf.
- Stenzel, P., & Wagner, H. (2011). *Osmose-Kraftwerke in Deutschland und weltweit*. Dresden: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen.
- Stenzel, P., & Wagner, H.-J. (2011). *Osmose-Kraftwerke in Deutschland und weltweit*. Dresden, Sachsen, Deutschland: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen.
- Stenzel, P., & Wagner, H.-J. (2011). *Osmose-Kraftwerke in Deutschland und weltweit - Einsatzpotentiale und Wirtschaftlichkeit-*. Dresden: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen.
- Takao, M., & Setoguchi, T. (11. April 2012). Air Turbines for Wave Energy Conversion. Saga-shi, Saga, Japan.

-
- Tannhauer, S. (03. Februar 2009). *Wellenenergie und ihre Nutzung*. Leopoldshöhe, Nordrhein-Westfalen, Deutschland.
- Taylor, P. (06. Juny 2007). *Alternative Energy*. Abgerufen am 22. July 2016 von <http://images.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.alternative-energy-news.info%2Fimages%2Ftechnical%2Fseagen-generator.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.alternative-energy-news.info%2Fseagen-tidal-power-installation%2F&h=665&w=600&tbid=JEpTtojLBFadRjM%3>
- Twidell, J., & Weir, T. (2006). *Renewable Energy Resources*. Abingdon: Taylor & Francis Group.
- Vega, L. A. (1999). *Ph. D.* Hawaii.
- Watter, H. (2015). *Regenerative Energiesysteme*. Flensburg: Springer Vieweg.
- Wikipedia. (21. Dezember 2004). Schema eines offenen Meereswärmekraftwerk; selbst gezeichnet.
- Wikipedia. (06. Januar 2005). Schema eines hybriden Meereswärmekraftwerk.
- Wikipedia. (31. Januar 2011). Closed Cycle OTEC diagram.
- Wind Prospect Group Ltd. (2016). *Windprospect*. Abgerufen am 23. July 2016 von http://www.windprospect.com.au/technologies?t=wave_pelamis
- World Energy Council. (2010). *2010 Survey of Energy Resources*. London: World Energy Council.
- Yemm, R., Pizer, D., Retzler, C., & Henderson, R. (2011). *Pelamis: experience from concept to connection*. Edinburgh: The Royal Society.
- Zhang, Y.-l., Lin, Z., & Liu, Q.-l. (2014). *Marine renewable energy in China: Current status and perspectives*. Peking: State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing.

10. Anhang

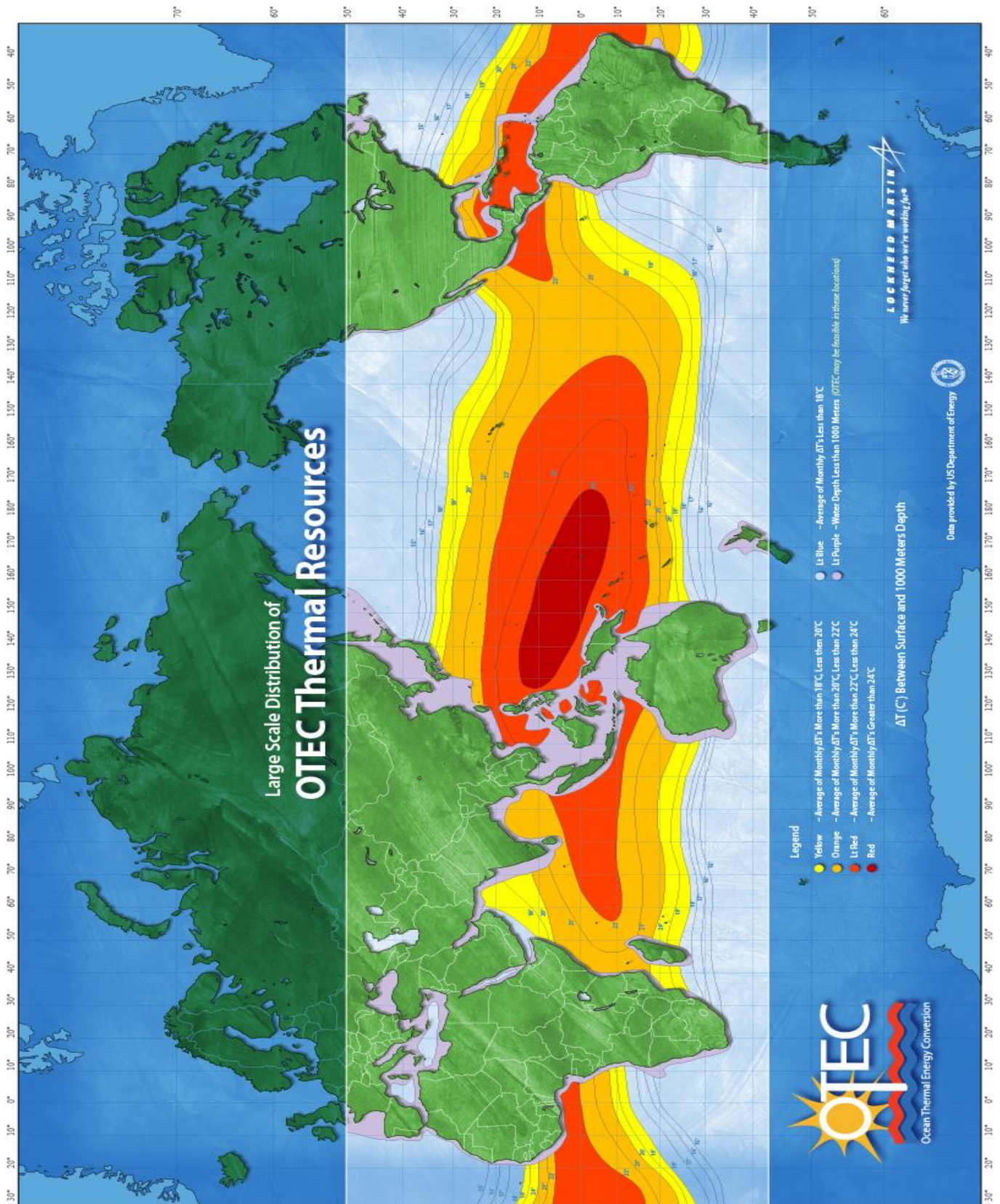


Abbildung 18 OTEC Ressourcenverteilung (Lockheed Martin, 2016)



Abbildung 19 Verteilung der globalen Wellenenergieressourcen mit Energiedichte in kW je Meter Küstenlinie (AW-Energy Ltd, 2012)

Quantified global resource of 25GW Equivalent to 16,000 turbine sales

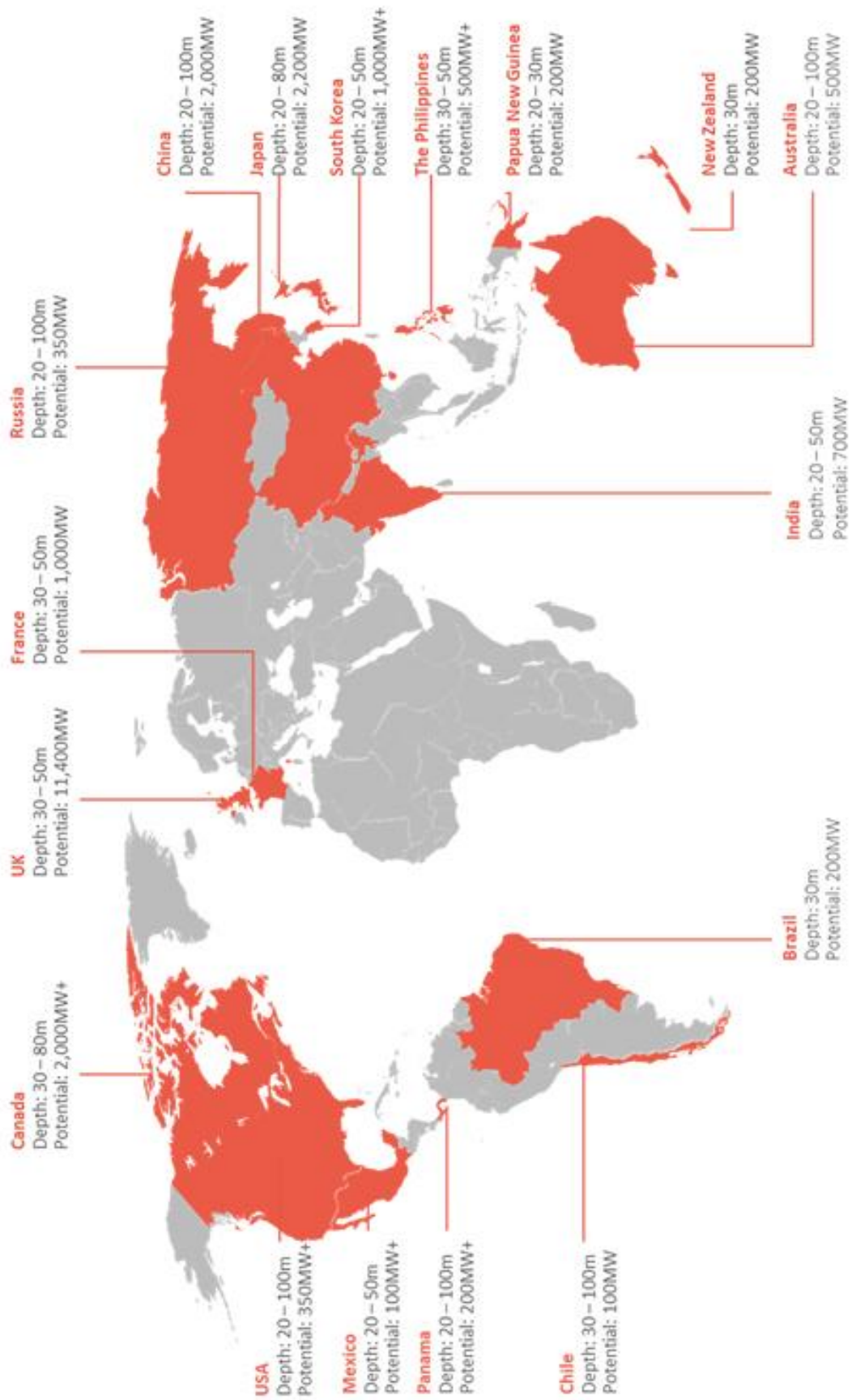


Abbildung 20 Verteilung der quantifizierten globalen Strömungsenergieressourcen (Atlantis Resources , 2014)

11. Eidesstattliche Erklärung

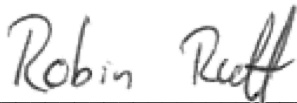
Abschlussarbeit von:

Herrn Robin Ruff

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22, Abs. 7 APB

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 17.10.2016



Unterschrift