

---

# Zukunftsperspektive zur Nutzung der Wellenenergie

---

Future prospect for the use of wave energy

Master-Thesis: Robin Ruff, Matr.-Nr. 2891602

September 2018



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)

Master-Thesis von Robin Ruff

Thema: „Zukunftsperspektive zur Nutzung der Wellenenergie“

Subject: “Future prospect for the use of wave energy”

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann, Dr.-Ing. Jens-Uwe Wieseemann

Studiengang Energy Science and Engineering

Technische Universität Darmstadt

Fachbereich 13 – Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Institut Wasserbau und Wasserwirtschaft

Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik

Franziska-Braun-Straße 7

64287 Darmstadt

Bearbeitungszeitraum: April 2018 – Oktober 2018

Datum der Einreichung: 17. September 2018

Datum der mündlichen Prüfung: Freitag, 21. September 2018

Darmstadt, 12. Oktober 2018

---



**Master-Arbeit für Herrn Robin Ruff (Matr.-Nr. 2891602)**

## **Zukunftsperspektive zur Nutzung der Wellenenergie**

**Future prospects for the use of wave energy**

### **Veranlassung und Thema**

Die Nutzung der Wasserkraft als regenerative Energie ist bereits heute eine wichtige Säule in der nationalen und internationalen Energiewirtschaft. Daher wird bis dato überwiegend nur die Energie von Fließgewässern in sog. Laufwasserkraftwerken genutzt – große Teile der Energie aus Meeresströmungen und Meereswellen wird derzeit nur sporadisch oder gar nicht genutzt.

Aktuelle Forschungen und Entwicklungen belegen jedoch, dass die Nutzung der Energie, welche in Meereswellen enthalten ist, durchaus möglich ist, um daraus elektrischen Strom zu produzieren. Erste Pilotanlagen zeigen eine Vielfalt an Systemen und deren Stärken und Schwächen sowie Einsatzmöglichkeiten.

### **Aufgabenstellung**

Im Rahmen seiner Masterarbeit soll Herr Ruff in Zukunftskonzept zur ökonomisch sinnvollen Nutzung der Wellenenergie entwickeln. Dazu sind folgende Leistungen zu erbringen:

- Recherche und Dokumentation existierender Systeme zur Nutzung der Wellenenergie sowie Darstellung der derzeit bestehenden systembezogenen Stärken, Schwächen und Einsatzmöglichkeiten;
- Recherche und Darstellung der bestehenden Einsatzörtlichkeiten der diversen Systeme speziell für den europäischen Raum;
- Erläuterung der Zusammenhänge, die dazu führen, dass die Wellenenergienutzung im Vergleich zu anderen Energieerzeugern gegenwärtig nicht so intensiv vorangetrieben wird;
- Aufstellung eines „*Zukunftskonzeptes Wellenenergie*“, welches die notwendigen Schritte, deren Abfolge/Verknüpfungen als auch die benötigten Beteiligten aufzeigt, um die Wellenenergienutzung für den europäischen Raum zielführend nutzbar machen zu können.

## Modalitäten

Grundsätzlich gelten die Bestimmungen zu Abschlussarbeiten in der Allgemeinen Prüfungsordnung TU Darmstadt und in der Studienordnung des Fachbereiches 13. Diese Bestimmungen beziehen sich u.a. auf die Aspekte

- Betreuung und Bewertung von Abschlussarbeiten und
- Besondere Regelungen bei externen Arbeiten

Der/die Kandidat/in hat dafür selbstständig Sorge zu tragen, dass diese Bestimmungen eingehalten werden. Darüber hinaus gelten folgende Randbedingungen

Referent	Prof. Boris Lehmann FG Wasserbau und Hydraulik Lehmann@wb.tu-darmstadt.de	Empfohlene Kenntnisse	- Hydromechanik - Wasserbau - Wellenmechanik - Wasserkraftnutzung
Bearbeitungszeitraum	Auslösung nach Vereinbarung, Leistungszeitraum 6 Monate	Arbeitsbedingungen	Heimarbeit

Darmstadt, den 5.4.2018

---

# Inhalt

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Symbolverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1. Entstehung von Wellen	3
2.2. Beschreibung von Wellen	3
2.3. Bewegung von Wasserteilchen	4
2.4. Abschätzung der bereitgestellten Leistung	5
2.5. Potential von Wellenenergie in Europa	6
3. Stand der Technik von Wellenenergiewandlern	8
3.1. Unterteilung von Wellenkraftwandlern	8
3.2. Verwendete Technologien	10
3.2.1. Oscillating Water Columns (OWCs)	10
3.2.2. Overtopping Devices	11
3.2.3. Oscillating Wave Surge Converters (OWSC)	13
3.2.4. Point Absorbers	14
3.2.5. Submerged Pressure Differentials (SPDs)	15
3.2.6. Attenuators	16
3.2.7. Bulge Wave Devices	17
3.2.8. Rotating Masses	18
3.2.9. Vergleich der unterschiedlichen Typen von Wellenkraftwandlern	19
4. Aktueller Stand des Ausbaus	20
5. Untersuchung der Entwicklung im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern	26
5.1. Untersuchung der installierten Leistung	26
5.1.1. Entwicklung der installierten Leistung an Windkraftanlagen von 1980 - 1987	27
5.1.2. Entwicklung der installierten Leistung an Photovoltaikanlagen von 1977 - 1984	28
5.1.3. Entwicklung der installierten Leistung an Gezeitenkraftanlagen von 2010 - 2017	28
5.1.4. Entwicklung der installierten Leistung an Wellenkraftanlagen von 2010 - 2017	29
5.2. Untersuchung der Preisentwicklung	30
5.2.1. Entwicklung der Stromgestehungskosten von Windkraftanlagen von 1980 - 1987	31
5.2.2. Entwicklung der Stromgestehungskosten von Photovoltaikanlagen von 1977 - 1984	31
5.2.3. Entwicklung der Stromgestehungskosten von Gezeitenkraftanlagen von 2010 - 2017	32
5.2.4. Entwicklung der Stromgestehungskosten von Wellenkraftanlagen von 2010 - 2017	33

---

6.	Kostenfaktoren für die Stromerzeugung aus Wellenkraft	34
6.1.	Art des Wellenkraftwandlers	34
6.2.	Anzahl der Wellenkraftwandler	34
6.3.	Wahl des Standortes	37
6.4.	Leistung des Wellenkraftwandlers	38
6.5.	Fazit Kapitel 6	41
7.	Zukunftskonzept Wellenenergie	42
7.1.	Der Technologie-Reifegrad	42
7.2.	Wesentliche Einflussfaktoren für Wellenkraftprojekte	44
7.3.	Ursachen für das Scheitern bisheriger Wellenkraftprojekte	47
7.4.	SWOT-Analyse	50
7.4.1.	Strategie „Ausbauen“	53
7.4.2.	Strategie „Aufholen“	54
7.4.3.	Strategie „Absichern“	55
7.4.4.	Strategie „Meiden“	55
7.4.5.	Fazit der SWOT-Analyse	55
7.5.	Beteiligte Akteure	56
8.	Fazit	60
9.	Anhang	67
10.	Eidesstattliche Erklärung	72

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1 Wellenparameter entlang einer sinusförmigen Welle (Pecher 2017)	3
Abbildung 2 Bewegung eines Wasserteilchens in einer Welle (AW-Energy Oy 2018)	4
Abbildung 3 Funktionsweise einer OWC-Anlage (WestCoast Power 2015)	10
Abbildung 4 OWC-Wellenkraftwerk Mutriku, angepasst nach (Bilbao Exhibition Centre 2015)	11
Abbildung 5 Wave Dragon im Einsatz, (Alchetron 2018)	12
Abbildung 6 Funktionsweise eines, in einen Wellenbrecher integrierten, überstömten Wellenenergiewandler (Vicinanza, Contestabile und Lauro 2017)	12
Abbildung 7 Funktionsweise eines OWSC (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy 2018)	13
Abbildung 8 Oyster Wellenkraftwandler, (ELECTRIC VEHICLE NEWS 2010)	14
Abbildung 9 Funktionsprinzip eines Pointabsorbers (Sigma Hellas 2018)	15
Abbildung 10 Funktionsweise Archimedes Wave Swing (Cruz 2008)	16
Abbildung 11 Vergleich der räumlichen Ausdehnung unterschiedlicher Wellenkraftwandler im Vergleich zur Wellenlänge $\lambda$ , (Cruz 2008)	16
Abbildung 12 Pelami Wave Energy Converter im Einsatz, (EMEC 2018)	17
Abbildung 13 Funktionsweise eines Bulge Wave Devices, (University of Southampton 2012)	18
Abbildung 14 Konzeptzeichnung eines Penguin WEC. Die rotierende Masse ist in rot und der Generator in gelb dargestellt. (Subsea world news 2013)	18
Abbildung 15 Prozentuale Verteilung der Wellenkraftwandler nach Bauart, eigene Darstellung	22
Abbildung 16 Prozentuale Verteilung der aufgebrauchten finanziellen Mittel für Forschung und Entwicklung (2014), angepasst nach (Magagna und Uihlein 2015)	23
Abbildung 17 Prozentuale Verteilung der aufgebrauchten finanziellen Mittel für Forschung und Entwicklung (2016), angepasst nach Von (Magagna und Uihlein 2015)	23
Abbildung 18 Prozentuale Verteilung der Hersteller von Wellenkraftwandlern nach Technologie, eigene Darstellung, nach (EMEC 2018)	24
Abbildung 19 Entwicklung der installierten Kapazität an Windkraft von 1980 – 1987, eigene Darstellung nach (Brown 2010)	27
Abbildung 20 Entwicklung der installierten Kapazität an Photovoltaikanlagen von 1977 – 1984, eigene Darstellung nach (Brown 2010)	28
Abbildung 21 Entwicklung der installierten Kapazität an Gezeitenenergie von 2010 – 2017, eigene Darstellung nach (Brito e Melo, Jeffrey, et al. 2017)	29
Abbildung 22 Entwicklung der installierten Kapazität an Wellenenergie von 2010 – 2017, eigene Darstellung nach (Brito e Melo, Jeffrey, et al. 2017)	30
Abbildung 23 Preisentwicklung im Windkraftsektor von 1980 – 1987, eigene Darstellung nach (WTWH Media 2018)	31
Abbildung 24 Preisentwicklung im Photovoltaiksektor von 1977 – 1984, eigene Darstellung nach (Diamandis 2014)	32
Abbildung 25 Zusammensetzung der Stromgestehungskosten des RM 5 für ein einzelnes Modell, angepasst nach (Jenne, Yu und Neary 2015)	35
Abbildung 26 Zusammensetzung der Stromgestehungskosten des RM 5 für 100 gekoppelten Modelle, angepasst nach (Jenne, Yu und Neary 2015)	35
Abbildung 27 Durchschnittliche Stromgestehungskosten nach Energieträger und Region, angepasst nach (IRENA 2018)	40

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1 Ausbauszenarien für die Wellenenergie in Europa	7
Tabelle 2 Vor- und Nachteile der einzelnen Arten von Wellenkraftwandlern	19
Tabelle 3 Liste der installierten Wellenkraftanlagen, (Magagna, Monfardini und Uihlein 2016) & (Brito e Melo 2016)	20
Tabelle 4 Liste der im Bau befindlichen Wellenkraftanlagen, (Magagna, Monfardini und Uihlein 2016) & (Brito e Melo 2016)	21
Tabelle 5 Liste der geplanten Wellenkraftanlagen, (Magagna, Monfardini und Uihlein 2016) & (Brito e Melo 2016)	21
Tabelle 6 Marktaufteilung der unterschiedlichen Wellenkraftwandlertypen, eigene Darstellung	24
Tabelle 7 Stromgestehungskosten von drei Referenzmodellen in Abhängigkeit von der Anlagenanzahl, angepasst nach (Jenne, Yu und Neary 2015)	34
Tabelle 8 Kostenverteilung der Stromgestehungskosten für RM5, bei einer Einheit und 100 Einheiten, eigene Darstellung nach (Jenne, Yu und Neary 2015)	36
Tabelle 9 Vergleich der ermittelten Stromgestehungskosten der Referenzmodelle 3, 5 & 6 mit den durchschnittlichen Stromgestehungskosten der Wellenkraftbranche	37
Tabelle 10 Darstellung der Kosten für eine 90 MW-Farm, mit 25 * 3,6 MW Windturbinen (links), 25 * 3,6 MW WECs (Mitte) und 120 * 0,75 MW WECs (rechts), (Pecher 2017)	39
Tabelle 11 Entwicklungsphasen des Technologie-Reifegrades, angepasst nach (EMEC 2018)	43
Tabelle 12 Anzahl der Wellenkraftwandler nach Technologie-Reifegrad (nur bestätigte Werte), angepasst nach (Mascarenhas, et al. 2015)	43
Tabelle 13 Verteilung der Wellenkraftwandler nach Technologie-Reifegrad (bestätigte und geschätzte Werte), angepasst nach (Mascarenhas, et al. 2015)	44
Tabelle 14 SWOT-Analyse für Wellenkraft in Europa	51
Tabelle 15 Grundstrategien einer SWOT-Analyse, eigene Darstellung nach (Fleig 2017)	53



---

## Symbolverzeichnis

---

Symbol	Bedeutung	Einheit
$p$	hydrostatischer Druck	[pa]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Wassertiefe	[m]
$\lambda$	Wellenlänge	[m]
$H$	Wellenhöhe	[m]
$T$	Periodendauer	[s]
$s$	Wellensteilheit	[-]
$a$	Amplitude	[m]
$E$	Energie	[J]
$c$	Ausbreitungsgeschwindigkeit	[m/s]
$k$	Wellenzahl	[1/m]
$\omega$	Kreisfrequenz	[1/s]
$c_g$	Gruppengeschwindigkeit	[m/s]
$P$	Leistung je Meter Wellenfront	[kW/m]

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

EMEC	European Marine Energy Centre
OWC	Oscillating Water Columns
OWSC	Oscillating Wave Surge Converter
WEC	Wave Energy Converter
WES	Wave Energy Scotland
TRL	Technology Readiness Level
SPD	Submerged Pressure Differential
RM	Referenzmodell
OpEx	Operational Expenditure
CapEx	Capital Expenditure
LCoE	Levelized Cost of Energy
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities & Threads
PWEC	Pelamis Wave Energy Converter

---

## 1. Einleitung

---

Erste Ansätze zur Nutzung der in Meereswellen gespeicherten Energie reichen bis ins Jahr 1799 zurück. Schon damals wurde vermutet, dass die Energie der Wellen genutzt werden könne, um Sägemühlen oder Pumpen anzutreiben (Luoma 2008). Über dreihundert Jahre später sind zwar viele Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von Meereswellen bekannt, eine ausgeprägte Nutzung existiert allerdings bis heute noch nicht. Wellenenergie zeichnet sich gegenüber anderen Energieträgern durch eine Reihe von Vorteilen aus:

- Bei Wellenenergie handelt es sich um eine regenerative, unendliche und klimaneutrale Energiequelle, die indirekt durch die Einstrahlung der Sonne kontinuierlich erneuert wird.
- Wellenenergie schwankt i.d.R. über einen Tag deutlich weniger, als beispielsweise Wind- oder Solarenergie. Zwar ist die Energiedichte nicht rund um die Uhr konstant, allerdings fällt sie im Gegensatz zu anderen regenerativen Energieträgern nie auf null (Rusu und Onea 2018). Über das ganze Jahr betrachtet, sind zwischen den Jahreszeiten allerdings deutliche Leistungsunterschiede zu erkennen (Barstow, et al. 2011).
- Die Energieerzeugung aus Wellen ist sehr gut vorhersehbar. Anhand der Windgeschwindigkeiten über dem offenen Meer kann die Verfügbarkeit von Wellen bereits mehrere Tage im Voraus bestimmt werden. Die Vorhersagbarkeit von Wind liegt im Vergleich dazu nur bei einigen Stunden (Girard, Laquaine und Kariniotakis 2013). Dadurch wird die Versorgungsplanung für Netzbetreiber deutlich erleichtert. Aufgrund der guten Vorhersagbarkeit und der dauerhaften Verfügbarkeit, eignen sich Wellenkraftwerke im Gegensatz zu vielen anderen erneuerbaren Energien auch bedingt als Grundlastkraftwerke.
- Die öffentliche Akzeptanz für große Wind- oder Photovoltaikanlagen ist oft nicht gegeben. Gründe dafür sind unter anderem die optische Beeinträchtigung durch die Anlagen oder die Beeinträchtigung von Naherholungsgebieten. Durch die Lage auf offener See und teilweise auch unter der Wasseroberfläche, könnten diese Probleme bei Wellenkraftanlagen deutlich niedriger ausfallen, wodurch die öffentliche Akzeptanz gefördert wird.
- Für Wellenkraftanlagen stehen aufgrund der Lage im Meer sehr große Flächen zur Verfügung. Mögliche Standorte für Wind- und Photovoltaikanlagen sind durch Landschafts- und Naturschutzgebiete oder durch gegensätzliche Interessen innerhalb der Bevölkerung deutlich stärker eingeschränkt.

Trotz dieser Vorteile und zahlreicher ambitionierter Klimaschutzziele auf EU- oder nationaler Ebene, ist Wellenkraft bis heute eine weitgehend unerschlossene Energiequelle. Auch im direkten Vergleich zur Gezeitenkraftnutzung, als vergleichbarer mariner Energieträger, besteht ein Entwicklungsdefizit

---

(Brito e Melo, Jeffrey, et al. 2017). Ziel dieser Ausarbeitung ist die Untersuchung dieses Entwicklungsrückstandes. Hierfür soll in einem ersten Schritt ein Überblick über die physikalischen Grundlagen der Wellenenergienutzung erstellt werden. Im Anschluss wird ein Überblick über Wellenkraftpotentiale, unterschiedliche Technologien als Nutzungsmöglichkeiten und den aktuellen Ausbaustatus gegeben. Darauf aufbauend soll ein Vergleich zu anderen regenerativen Energieträgern unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung gezogen werden. Die ermittelten Differenzen sollen im Folgenden auf deren Ursachen untersucht werden, um daraus in einem letzten Schritt ein Handlungskonzept zur Weiterentwicklung der Wellenenergie im europäischen Raum abzuleiten.

Da Wellenenergie aller Voraussicht nach in Deutschland keine große Rolle spielen wird (Bömer, et al. 2010), ist auch die Menge an deutschsprachiger Literatur sehr begrenzt. In englischsprachigen Ländern, wie dem Vereinigten Königreich, Australien, Kanada und den USA hingegen existiert eine Vielzahl an wissenschaftlichen Arbeiten und Forschungsberichten zur Wellenkraftnutzung. Dementsprechend existieren für viele Technologien bisher ausschließlich englische Fachbegriffe. Aus diesem Grund wird in dieser Ausarbeitung häufig auf englische Bezeichnungen zurückgegriffen.

## 2. Grundlagen

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über die physikalischen Grundlagen der Wellenenergienutzung gegeben.

### 2.1. Entstehung von Wellen

Wellen entstehen in der Regel auf offener See, durch die Reibung zwischen der Wasseroberfläche und dem darüber hinwegstreichenden Wind. Durch Windeinwirkung entsteht eine Beschleunigung der obersten Wasserschicht, welche nicht gleichförmig ist. Aufgrund dieser Ungleichförmigkeit entstehen Turbulenzen, welche zu Druckunterschieden zwischen einzelnen Bereichen der Wassersäule führen, wodurch sich die Wasseroberfläche anheben oder absenken kann, um die Druckdifferenzen auszugleichen. Durch diese Verschiebungen der Oberfläche entsteht eine vergrößerte Angriffsfläche für den Wind, welche wiederum zu stärkeren Druckschwankungen führt. Durch kontinuierliche Wiederholung dieser Vorgänge entstehen annähernd periodische Wellen, welche sich über lange Strecken, nahezu ohne Energieverlust fortbewegen können. Die Höhe der Wellen ist im Wesentlichen von der Windgeschwindigkeit, der Winddauer und der Windlauflänge über dem Wasser abhängig (Graw 1995).

Mit sinkender Wassertiefe sinken auch die Laufgeschwindigkeit und die Wellenlänge. Durch Reibung mit dem Meeresgrund geht ein Teil der Wellenenergie verloren, bis die Welle bei einer zu niedrigen Geschwindigkeit schließlich bricht. Aufgrund der besagten Reibung ist die entziehbare Leistung von Wellen im Küstenbereich deutlich niedriger als im Tiefwasser.

### 2.2. Beschreibung von Wellen

Wellen können vereinfacht als eine sinusförmige Veränderung der Wasserspiegelhöhe betrachtet werden. Sie können definiert werden über eine Höhe  $H$ , eine Amplitude  $a$ , welche der Hälfte der Wellenhöhe entspricht, eine Wellenlänge  $\lambda$  und eine Periodendauer  $T$  (Pecher 2017). Die Wellenlänge gibt hierbei den Abstand und die Periodendauer die Zeit zwischen zwei gleichen Punkten (z.B. Wellenkamm) an. Der Zusammenhang dieser Größen ist in Abbildung 1 dargestellt.

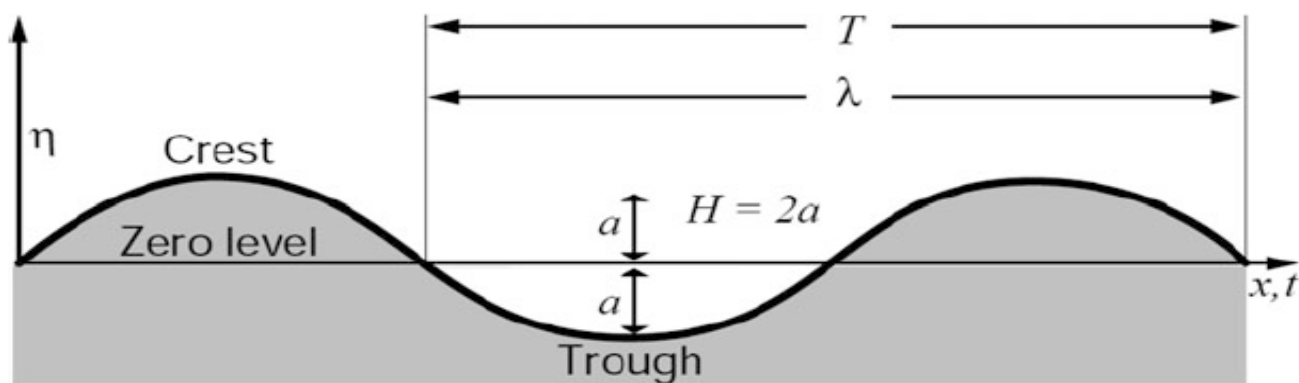


Abbildung 1 Wellenparameter entlang einer sinusförmigen Welle (Pecher 2017)

### 2.3. Bewegung von Wasserteilchen

Die Airy-Laplace-Wellentheorie geht davon aus, dass sich Wasserteilchen in tiefem Wasser ab einer Wassertiefe von  $h > \lambda/2$  auf geschlossenen Kreisbahnen bewegen. Somit erfolgt nach der Wellentheorie kein Massentransport entlang der Wellenausbreitungsrichtung. Der Radius der Kreisbewegung entspricht an der Wasseroberfläche der Wellenamplitude und sinkt mit steigender Entfernung zur Oberfläche bis auf null ab. Sinkt die Wassertiefe unter den Wert von  $\lambda/2$ , treten erste Interaktionen der bewegten Wasserteilchen mit dem Meeresgrund auf. Hierdurch wird die Kreisbewegung stetig abgeflacht und nimmt zunächst einen elliptischen Verlauf an, bis im Küstenbereich nur noch eine horizontale Schwingung der Wasserteilchen übrigbleibt (AW-Energy Oy 2018). Der Vorgang ist in Abbildung 2 dargestellt.

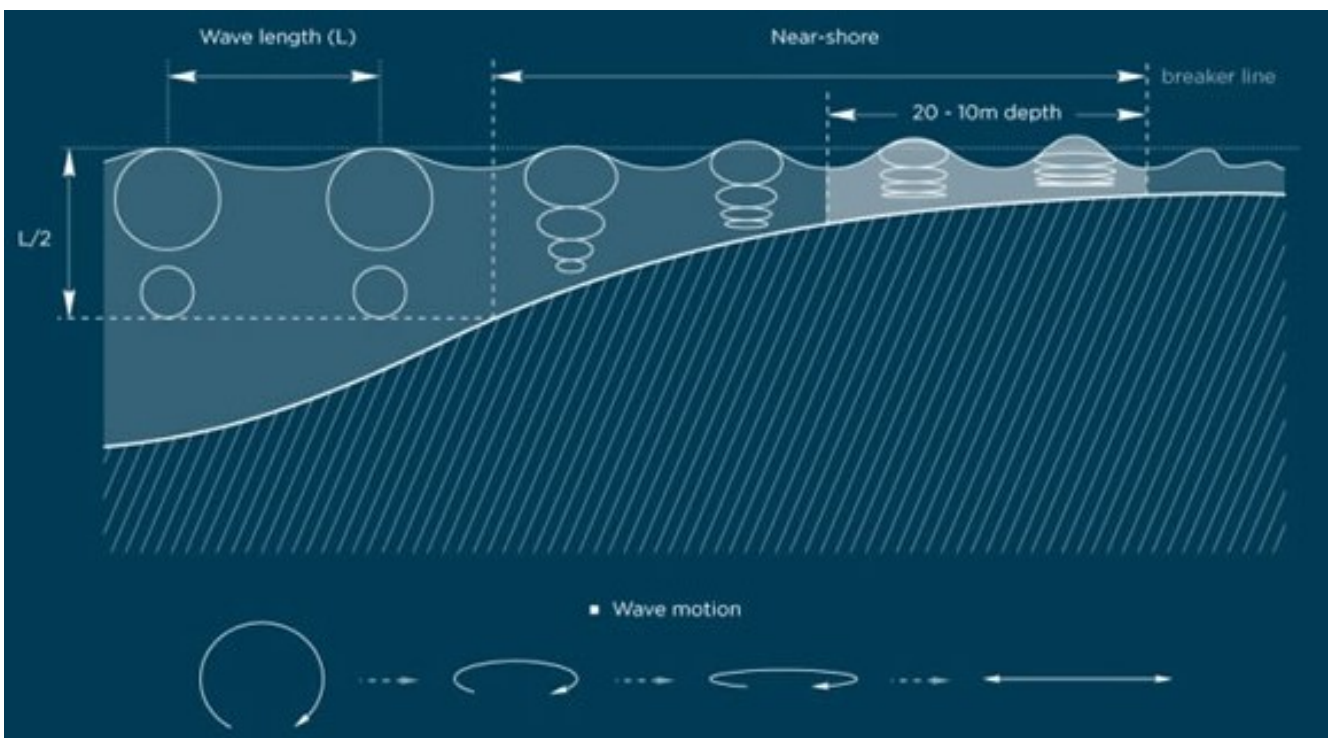


Abbildung 2 Bewegung eines Wasserteilchens in einer Welle (AW-Energy Oy 2018)

In der Realität ist bei Wasserteilchen allerdings eine Driftgeschwindigkeit zu beobachten. Daher bewegen sich diese in spiralförmigen Bahnen in Richtung der Wellenausbreitung (Malcherek 2010). Diese Drift ist insbesondere für den Sedimenttransport ausschlaggebend. Die Driftgeschwindigkeit steigt mit der Wellensteilheit (siehe Kapitel 2.4), sinkt jedoch mit der Entfernung zur Wasseroberfläche. In tieferen Wasserschichten nähern sich die lineare Wellentheorie nach Airy-Laplace und die Wellentheorien höherer Ordnungen somit zunehmend an. Für ingenieurtechnische Betrachtungen und Abschätzungen ist die Annäherung der linearen Wellentheorie in der Regel ausreichend (Büsching 1974).

## 2.4. Abschätzung der bereitgestellten Leistung

Für die Beschreibung von Wasserwellen mithilfe der linearen Wellentheorie müssen einige Annahmen getroffen werden. Hierzu zählen eine gleichbleibende Durchschnittstiefe sowie ein nicht viskoses und inkompressibles Fluid (Coastal Engineering Manual 2002). Neben den zuvor genannten Größen ist im Wellenmodell nach Airy-Laplace die sogenannte Wellensteilheit ein weiterer wichtiger Parameter zur Beschreibung von Meereswellen. Sie errechnet sich nach der folgenden Formel.

$$s = \frac{H}{\lambda} [-]$$

Formel I

Das lineare Wellenmodell liefert für Werte von  $s < 0.01$  sehr gute Näherungen für die Bewegung von Wasserteilchen. Mit steigenden Werten für  $s$  sinkt auch die Genauigkeit der linearen Wellentheorie und Wellenmodelle höherer Ordnung, wie beispielsweise das nach Stokes, liefern deutlich bessere Lösungen (Malcherek 2010). In der Theorie ist allerdings die Anwendung von Wellenmodellen höherer Ordnungen auf nicht absolut regelmäßig verlaufende Wellen äußerst aufwendig und anspruchsvoll. Aus diesem Grund wird die lineare Wellentheorie für Abschätzungen auch häufig bei Wellensteilheiten  $\gg 0.01$  verwendet (Pecher 2017). Die Energie einer Welle setzt sich zu gleichen Teilen aus der potentiellen und der kinetischen Energie zusammen. Die Energiedichte in  $J/m^2$  lässt sich nach der folgenden Formel berechnen (Bonifacio 2010).

$$E = E_{kin} + E_{pot} = \frac{\rho g a^2}{2} [J]$$

Formel II

Für die Auslegung von Wellenkraftanlagen ist allerdings weniger die in einer bestimmten Fläche enthaltene Energie, als vielmehr die über die Zeit gemittelte Leistung pro Meter Wellenfront von Interesse. Um diese zu ermitteln, muss die Energiedichte mit der Gruppengeschwindigkeit multipliziert werden. Diese bezeichnet die Geschwindigkeit eines Wellenpakets, also einer Ansammlung mehrerer, sich überlagernder Wellen. Sie kann in tiefem Wasser als die Hälfte der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Einzelwellen angenommen werden (Pecher 2017). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist definiert über die Formel

$$c = \frac{\lambda}{T} [m/s]$$

Formel III

$\lambda$  lässt sich mithilfe der Wellenzahl  $k$  bestimmen, welche sich allgemein nach der Formel

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} [1/m]$$

Formel IV

---

und speziell für Tiefwasserwellen nach der Formel

$$k = \frac{\omega^2}{g} \text{ [1/m]}$$

Formel V

berechnet, wobei  $\omega$  die Kreisfrequenz ist (Bonifacio 2010). Setzt man die Formel IV und Formel V gleich und setzt den so erhaltenen Term anschließend in Formel III ein, so ergibt sich die Gruppengeschwindigkeit demnach zu:

$$c_g = \frac{g}{2\omega} \text{ [m/s]}$$

Formel VI

Multipliziert man  $c_g$  nun mit  $E$  unter der Beachtung von  $\omega = 2\pi/T$  und  $a = H/2$ , so ergibt sich für die Leistung je Meter Wellenfront:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} * H^2 T \text{ [W/m]}$$

Formel VII

Durch einsetzen der Konstanten (mit  $\rho_{\text{Salzwasser}} = 1.025 \text{ kg/m}^3$ ), ergibt sich:

$$P = 0,491 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3 \text{s}} * H^2 T \text{ [W/m]}$$

Formel VIII

Die enthaltene Leistung ist somit proportional zur Periodendauer und zum Quadrat der Höhe der anströmenden Wellen.

## 2.5. Potential von Wellenenergie in Europa

Das in Europa verfügbare Wellenkraftpotential wird von verschiedenen Quellen zwischen 300 und 324 GW angegeben (Mork, et al. 2010), (Ghosh und Prelas 2011), (Pecher 2017). Nach (Mork, et al. 2010) beläuft sich das Potential in Nord- und Westeuropa zusammen auf 286 GW, in der Ostsee auf ca. 1 GW und im Mittelmeer auf etwa 37 GW. Gebiete mit zu niedriger Energiedichte (kleiner 5 kW/m) werden bei dieser Berechnung vernachlässigt, da eine wirtschaftliche Nutzung der Wellenenergie hier ausgeschlossen wird. Ebenso werden alle Gebiete, welche von Vereisung betroffen sind, nicht berücksichtigt. Geht man von einer Gesamtmenge von 324 GW aus, so ergibt sich daraus eine theoretische jährliche Energieproduktion von etwa 2.838 TWh. Der Jährliche Stromverbrauch in Europa belief sich im Vergleich dazu in den vergangenen Jahren auf etwa 3.200 TWh (LaenderDaten 2018). Geht man von einem zukünftigen Wirkungsgrad von Wellenenergiewandlern von ca. 40% aus (IRENA 2014), läge die Produktion bei 1.135 TWh, was etwa 35% des heutigen Strombedarfs Europas entsprechen würde. Zu beachten ist allerdings, dass es sich hierbei um Schätzungen handelt, welche zusätzlich davon ausgehen, dass das gesamte in Europa verfügbare Potential auch genutzt würde.



In Tabelle 1 werden mögliche Ausbauszenarien für die Wellenkraft in Europa miteinander verglichen. Dargestellt ist der notwendige Ausbau bei voller-, bzw. teilweiser Nutzung der vorhandenen Ressourcen. Die Verfügbaren Leistungen je Meter Wellenfront unterscheiden sich je nach Standort stark voneinander und liegen zwischen Werten von kleiner 5 kW/m in Teilen der Ostsee und des Mittelmeers und Werten von über 80 kW/m im Nordatlantik (Schlütter, Petersen und Nyborg 2015). Untersucht wurden die Ausbaumöglichkeiten für vier unterschiedliche Szenarien, welche durchschnittliche Leistungen von 20 kW/m (konservative Schätzung), 30 kW/m, 40 kW/m und 50 kW/m (optimistische Schätzung) annehmen.

Es lässt sich erkennen, dass eine vollständige Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen mit sehr großen Ausbaumaßnahmen verbunden wäre. Die Bebauung von bis zu 16.200 km Küstenlänge, bzw. küstennahen Wasserbereichen ist unrealistisch. Vielmehr erscheint eine nur teilweise Ausnutzung der Ressource deutlich sinnvoller. Es zeigt sich jedoch, dass auch bei einer nur teilweisen Ausnutzung der verfügbaren Potentiale Wellenkraft einen nicht unerheblichen Anteil zu einer zukünftigen Stromproduktion beitragen könnte. Diese ist jedoch sehr ungleichmäßig unter den einzelnen Ländern Europas verteilt. Zu den Staaten mit besonders guten Voraussetzungen für die Nutzung von Wellenenergie, für die ein Ausbau also eine durchaus sinnvolle Möglichkeit darstellen könnte, zählen Großbritannien, Frankreich, Spanien und Portugal (Mork, Barstow, et al. 2010), während andere Länder, wie beispielsweise Deutschland über wenige, bis keine nutzbaren Ressourcen verfügen.

Tabelle 1 Ausbauszenarien für die Wellenenergie in Europa

Ausnutzung des verfügbaren Potentials (340 GW)	100%	50%	20%	10%
Notwendige bebaute Küstenlänge (Annahme 20 kW/m)	16.200 km	8.200 km	3.240 km	1.600 km
Notwendige bebaute Küstenlänge (Annahme 30 kW/m)	10.800 km	5.400 km	2.160 km	1.080 km
Notwendige bebaute Küstenlänge (Annahme 40 kW/m)	8.100 km	4.050 km	1.620 km	810 km
Notwendige bebaute Küstenlänge (Annahme 50 kW/m)	6.480 km	3.240 km	1.296 km	648 km
Mögliche Produktion ( $\eta=40\%$ )	1.135 TWh	568 TWh	227 TWh	114 TWh
Prozentualer Anteil am europäischen Stromverbrauch	35,5%	17,5%	7,1%	3,5%

---

### 3. Stand der Technik von Wellenenergiewandlern

---

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über die Unterteilung von Wellenkraftwandlern, die an sie gestellten Anforderungen und die momentan verwendeten Technologien gegeben.

#### 3.1. Unterteilung von Wellenkraftwandlern

Unterschiedliche Bauarten von Wellenkraftwerken lassen sich nach zwei Hauptkriterien unterteilen. Zunächst ist eine Unterteilung anhand der Lage des Energiewandlers möglich. Unterschieden wird zwischen den folgenden drei Typen von Anlagen (Pecher 2017):

- *Landbasierte Anlagen / onshore-devices*: Diese Energieerzeuger sind in die Küstenlinie oder in Bauwerke integriert. Der technische Aufwand für Installation und Unterhaltung ist verhältnismäßig gering, allerdings ist auch die mögliche Energieausbeute niedriger, als in offenem Wasser (Texas A&M University 2015).
- *Küstennahe Anlagen / nearshore-devices*: Diese Anlagen liegen im ufernahen Flachwasserbereich. Die Energieausbeute und technischen Anforderungen sind im Vergleich zu landbasierten Anlagen deutlich höher. Nearshore-devices verfügen meist über ein festes Fundament im Meeresboden (Pecher 2017).
- *Anlagen auf offener See / offshore-devices*: Diese Anlagen sind ab einer Wassertiefe von mehreren 10 Metern zu finden. Die technischen Anforderungen sind durch die gestiegene Wassertiefe und das Auftreten von Starkwetterereignissen noch einmal deutlich höher. Allerdings kann hier die höchste Energieausbeute erzielt werden. Die Verankerung am Meeresboden erfolgt i.d.R. nur über ein Kabel oder einen Anker (Pecher 2017).

Weiterhin können Wellenkraftanlagen Anhand ihrer Funktionsweise unterteilt werden. Es existiert eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Gewinnung von elektrischer Energie aus Meereswellen. Anders als bei anderen Energieträgern, wie Photovoltaik, Windkraft oder Gezeitenenergie hat sich bisher noch keine einheitliche Bauweise für Wellenkraftanlagen durchgesetzt. Unabhängig von der Technologie, bestehen allerdings fast alle Wellenenergiewandler aus sehr ähnlichen Teilsystemen, die zwar bei unterschiedlichen Anlagen verschieden arbeiten, allerdings stets vergleichbare Funktionen erfüllen. Von der Literatur werden die vier folgenden Teilsysteme definiert (Pecher 2017):

- Das *hydrodynamische Teilsystem / hydrodynamic subsystem* dient der Absorption der kinetischen- und potentiellen Energie der anlaufenden Wellen. Die Energieaufnahme kann auf unterschiedliche Arten erfolgen, zum Beispiel durch einen Schwingkörper oder durch Überströmung. Das hydrodynamische Teilsystem ist zwecks Kraftübertragung mit dem Energiewandlungs- und dem Stabilitätsteilsystem verbunden.

- In der *Energiewandlungseinheit / power take off system* wird die aufgenommene Energie in elektrische Energie umgewandelt. Die Energiewandlung kann beispielsweise mithilfe von Hydraulikanlagen, Lineargeneratoren, Luftturbinen oder Niederruck-Wasserturbinen geschehen.
- Das *Stabilitätsteilsystem / reaction subsystem* sorgt für die Stabilität des Wellenenergiewandlers im Wasser. Die Stabilität kann durch eine Verankerung oder durch eine feste Stützstruktur gewährleistet werden.
- Das *Kontrollsystem / control subsystem* dient der Datenerhebung, Steuerung und Überwachung der Anlagen. Über das Kontrollsystem lassen sich beispielsweise Parameter wie die Eintauchtiefe oder der Anströmwinkel einiger Anlagen variieren.

Neben den vergleichbaren Komponenten, sind auch die Anforderungen, die an unterschiedliche Arten von Wellenkraftwandlern gestellt werden sehr ähnlich. Diese werden nach (Pecher 2017) wie folgt definiert.

- *Beständigkeit:* Wellenenergiewandler müssen in der Lage sein, den anspruchsvollen Bedingungen der marinen Umgebung standzuhalten. Hierzu zählen z.B. der Salzgehalt des Meerwassers, welcher insbesondere bei beweglichen Bauteilen zu erhöhter Korrosion führen kann und das Auftreten von Starkwetterereignissen.
- *Einfache Wartbarkeit:* Die Wartung einer Anlage sollte sinnvollerweise vor Ort möglich sein. Hierfür ist die Begehbarkeit einer Anlage von großem Vorteil.
- *Leistung:* Jeder Wellenenergiewandler sollte in der Lage sein, mit einem ausreichenden Wirkungsgrad elektrischen Strom zu erzeugen. Eine möglichst gleichmäßige, schwankungsfreie Stromerzeugung ist außerdem von Vorteil. Die Gleichmäßigkeit kann zusätzlich durch die Kopplung mehrerer Anlagen verbessert werden.
- *Skalierbarkeit:* Aufgrund der hohen Fixkosten von Wellenenergiewandlern ist es sinnvoll, die Anlagen möglichst groß auszulegen (im Bereich von mehreren MW). Die meisten heute im Einsatz befindlichen Anlagen bewegen sich allerdings noch im Bereich  $\leq 1$  MW (siehe Kapitel 4). Da sich die Bedingungen unterschiedlicher Standorte stark voneinander unterscheiden können, kann es sinnvoll sein, Typen von Wellenkraftwandlern in unterschiedlichen Größen einzusetzen, um sie optimal an die vorliegenden Begebenheiten anzupassen.
- *Geringe Umweltauswirkungen:* Neben der klimaneutralen Energiegewinnung, sollten auch die sonstigen Umwelteinwirkungen von Wellenenergieanlagen möglichst niedrig gehalten werden. So sollte beispielsweise darauf geachtet werden, die maritime Fauna möglichst wenig durch

schwingende Strukturen zu gefährden und als Hydraulikflüssigkeiten sollten nur nicht-toxische Stoffe verwendet werden, um eine Umweltschädigung bei Leckagen zu vermeiden.

### 3.2. Verwendete Technologien

Vom European Marine Energy Centre (EMEC)<sup>1</sup> werden acht unterschiedliche Typen von Wellenkraftwandlern definiert. Diese beinhalten den größten Teil aller in Europa bisher entwickelten, gebauten und geplanten Anlagen. Alle Anlagen, die keiner dieser Kategorien zugeordnet werden können, werden unter dem Begriff „Sonstige“ zusammengefasst. Hierbei handelt es sich um Bauweisen, deren Energiewandlungsstrategien nur von einzelnen Herstellern verwendet werden. Auch Anlagen, deren Funktionsweisen unzureichend dokumentiert ist, werden unter dem Begriff „Sonstige“ geführt. Sie spielen allerdings in der Gesamtmenge aller Wellenkraftprojekte eine Untergeordnete Rolle (siehe Kapitel 4) Im Folgenden werden nun die vom EMEC genannten Arten von Wellenkraftwandlern näher erläutert. Da für einige Anlagentypen keine deutschen Fachbegriffe existieren, wird hier auf die englischen Bezeichnungen zurückgegriffen.

#### 3.2.1. Oscillating Water Columns (OWCs)

Die OWCs zählen zu den landbasierten Anlagen. In einer an der Küste gelegenen Kammer oszillieren aufgrund der Wellenbewegung eine Luft- und eine Wassersäule. Bei jedem Anstieg der Wassersäule wird die darüberliegende Luft komprimiert und über einen „Kamin“ ausgetrieben. An dessen Ende befindet sich eine Turbine, welche über den Luftstrom angetrieben wird. Sinkt die Wassersäule anschließend wieder ab, wird neue Luft angesaugt und dadurch erneut die Turbine angetrieben. Als Turbinen kommen fast ausschließlich Wells-Turbinen zum Einsatz, da bei diesen die Drehrichtung unabhängig von der Durchströmungsrichtung ist (Cruz 2008). Aufgrund der unregelmäßigen Höhe von Wellen, schwankt die Energieerzeugung einzelner Anlagen. Dies kann durch Kurzzeitspeicher, wie beispielsweise Schwungräder oder die Kopplung mehrerer Anlagen teilweise kompensiert werden (Duquette, et al. 2009). Das Funktionsprinzip einer OWC Kammer ist in Abbildung 3 dargestellt.

**Funktionsweise eines Wellenkraftwerks**

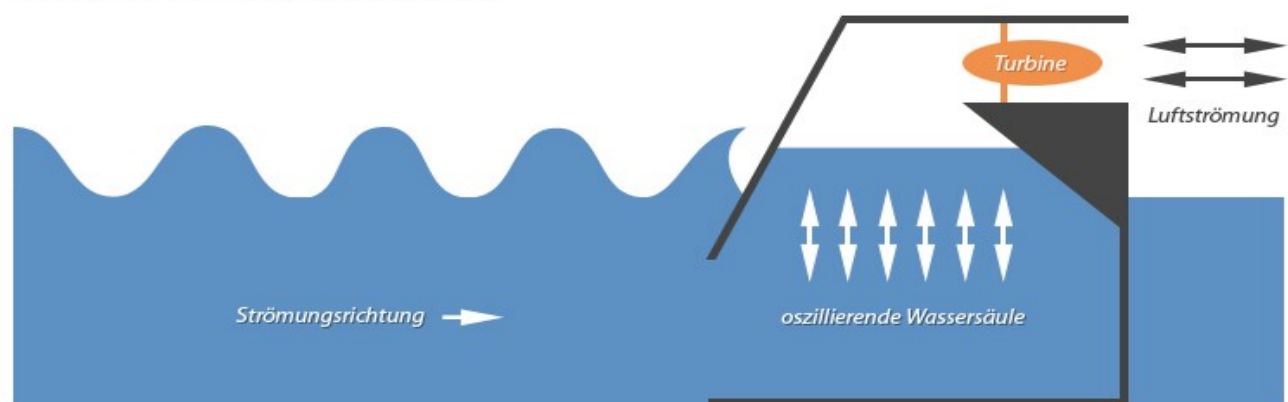


Abbildung 3 Funktionsweise einer OWC-Anlage (WestCoast Power 2015)

<sup>1</sup> Das EMEC ist eines der weltweit führenden Prüf- und Forschungszentren für die Entwicklung von Wellen- und Gezeitenkraftwerken.

---

Weiterhin besteht die Möglichkeit, das Prinzip der oszillierenden Wassersäule in Form von sogenannten OWC-Bojen als Offshorekraftwerk zu nutzen. Das Funktionsprinzip bleibt hierbei dasselbe, mit dem Unterschied, dass es sich um eine freischwimmende Konstruktion handelt. Hierdurch soll die Energieausbeute erhöht werden (Pecher 2017).

Die OWC-Technologie wird beispielsweise seit 2011 in einer Anlage in der nordspanischen Stadt Mutriku getestet. In die Wellenbrecher der Hafenanlage wurden hierfür 16 OWC-Kammern eingebaut, welche über eine Gesamtleistung von 300 kW verfügen (Lynn 2014).



Abbildung 4 OWC-Wellenkraftwerk Mutriku, angepasst nach (Bilbao Exhibition Centre 2015)

### 3.2.2. Overtopping Devices

Die Grundidee von Overtopping Devices besteht darin, die Energie der anlaufenden Wellen in potentielle Energie umzuwandeln. Das anströmende Wasser passiert eine Rampe und wird in einem Reservoir gesammelt, welches oberhalb des Wasserspiegels gelegen ist. Von dort wird es über eine oder mehrere Niederdruckturbinen abgeleitet und zur Energieerzeugung genutzt. Overtopping Devices sind demnach senkrecht zur Wellenrichtung ausgerichtet und haben eine große Breite, um eine möglichst große Wellenfront aufnehmen zu können.

Ursprünglich sollte die Technologie der überströmten Energiewandler für Offshore-Anlagen verwendet werden. Das bekannteste Beispiel stellt der sogenannte Wavedragon dar, der zwischen 2003 und 2011 von der Dänischen Firma Wave Dragon APS im dänischen Limfjord getestet wurde (Giesecke, Heimerl und Mosonyi 2014). Hierbei handelte es sich um eine freischwimmende Konstruktion auf offener See. Die anlaufenden Wellen wurden hierbei zunächst mithilfe von Wellenreflektoren gebündelt, und anschließend über die Rampe geleitet. Bei den Wellenreflektoren handelt es sich um zwei lange Stahlarme, welche Fächerförmig vom eigentlichen Körper des Wavedragons wegführen und die anlaufenden

---

Wellen zur Rampe leiten. Mithilfe von Druckluftkammern konnte die Eintauchtiefe der Konstruktion variiert und somit direkt die erzielbare Fallhöhe beeinflusst werden. Aus Kostengründen wurde die Verwendung als Offshore-Anlage allerdings weitgehend wieder verworfen (Europäische Kommission 2017).



Abbildung 5 Wave Dragon im Einsatz, (Alchetron 2018)

Inzwischen werden Ansätze verfolgt, um Overtopping Devices, ähnlich wie OWCs, in bestehende Bauwerke zu integrieren. Hierfür bieten sich beispielsweise Küstenschutzanlagen, wie Wellenbrecher an. Der Aufbau einer solchen Anlage ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Umsetzung ist grundsätzlich mit einem oder mehreren übereinander gelagerten Reservoirs möglich. Mehrere Studien prognostizieren durch die Verwendung von mehreren Sammelbecken zwar einen Anstieg der Leistung, allerdings auch eine deutliche Kostenerhöhung, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Wellenenergiewandlern gemindert wird. Deshalb wird heute hauptsächlich der Ansatz mit einem einzelnen Reservoir verfolgt (Vicinanza, Contestabile und Lauro 2017). Voraussetzungen für eine effektive Nutzung sind ein über das Jahr betrachtet möglichst gleichmäßiger Wellengang und eine geringe Zahl an Starkwetterereignissen. Aufgrund der niedrigen Fallhöhe bieten sich Kaplan-turbinen für die Energieerzeugung an (Lynn 2014).

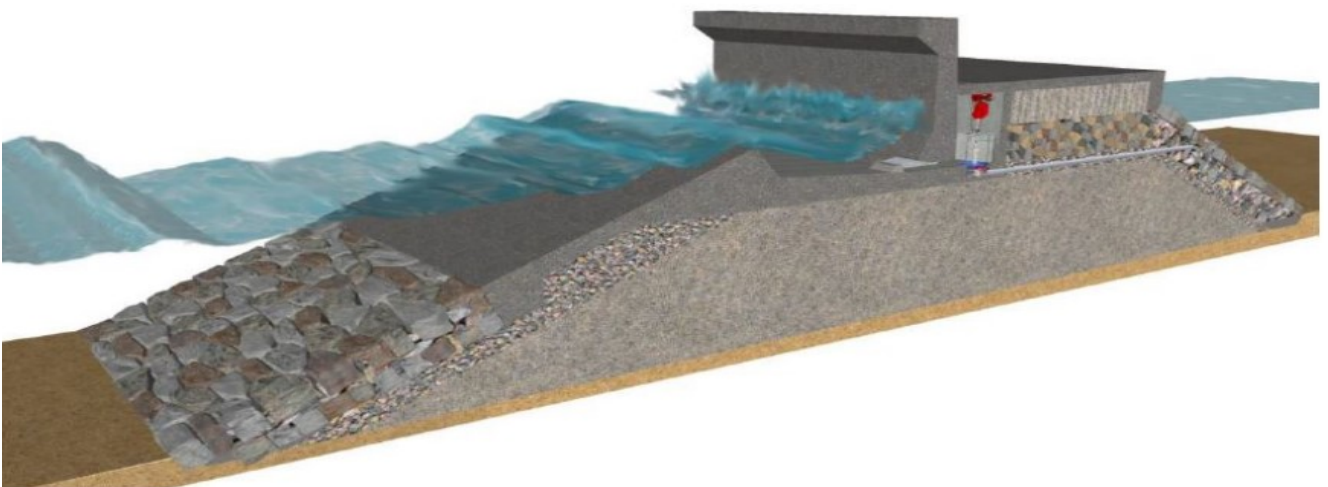


Abbildung 6 Funktionsweise eines, in einen Wellenbrecher integrierten, überstömten Wellenenergiewandler (Vicinanza, Contestabile und Lauro 2017)

### 3.2.3. Oscillating Wave Surge Converters (OWSC)

OWSCs nutzen den Schub, bzw. Sog von an- und ablaufenden Wellen, um eine Schwingbewegung an einer beweglich montierten Platte zu induzieren. Diese ist fest am Meeresgrund verankert und über ein Gelenk drehbar gelagert. Läuft eine anströmende Welle gegen die Platte, wird diese in die gleiche Richtung mitschwingen. Beim Überströmen durch das anschließende Wellental, schwingt die Platte zurück in ihre Ausgangsposition. Die Bewegung der Platte wird auf einen Kolben übertragen, durch den Wasser verdichtet und über eine Hochdruckleitung zu einem an Land gelegenen Turbinenhaus geleitet wird. Hier wird das unter Druck stehende Wasser über eine Pelton-Turbine entspannt und anschließend in einem geschlossenen Kreislauf zurück zum Wellenenergiewandler geleitet (Lynn 2014). Die Funktionsweise eines OWSC ist in Abbildung 7 dargestellt.

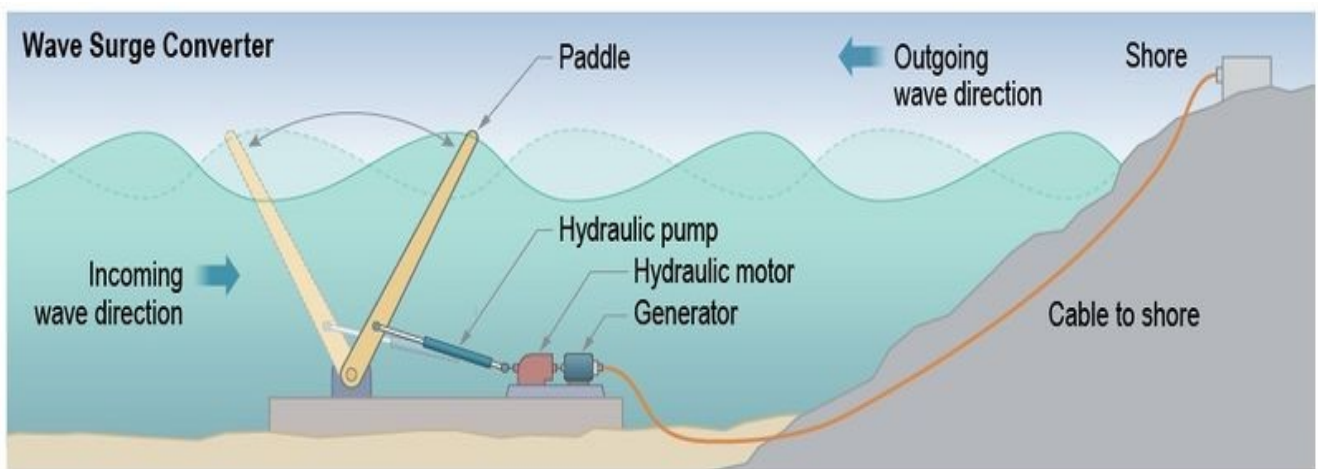


Abbildung 7 Funktionsweise eines OWSC (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy 2018)

Das prominenteste Beispiel eines OWSC ist der Oyster Wave Energy Converter, der in Abbildung 8 dargestellt ist und seit 2009 vor der Küste Schottlands von der Firma Aquamarine Power getestet und weiterentwickelt wird (Lynn 2014). Er besteht aus einem 36 Tonnen schweren Tragwerk und einer 120 Tonnen schweren Energieerfassungseinheit mit den Maßen 26 x 12 x 4 Meter. Die Klappe durchschneidet hierbei die gesamte Wassersäule vom Meeresgrund bis zur Wasseroberfläche. Momentan wird die Entwicklung einer zweiten Generation von Anlagen vorangetrieben. Diese arbeitet nach dem gleichen Prinzip, soll allerdings aufgrund von Strukturoptimierungen über eine höhere Leistung verfügen (Pecher 2017).



Abbildung 8 Oyster Wellenkraftwandler, (ELECTRIC VEHICLE NEWS 2010)

### 3.2.4. Point Absorbers

Der Begriff Pointabsorber umfasst mehrere, ähnlich funktionierende Arten von Wellenenergiewandlern. Der Name ist auf die kleine räumliche Ausdehnung im Vergleich zur vorherrschenden Wellenlänge zurückzuführen. Pointabsorbers bestehen aus einem Schwimmkörper (Boje) und einem Energiewandler, die beweglich miteinander verbunden sind. Der Energiewandler ist hierbei entweder am Meeresgrund fixiert oder wird durch eine angehängte Masse stationär gehalten (Faizal, Rafiuddin und Young-Ho 2014). Die Relativbewegung der beiden Komponenten zueinander, die beim Durchlaufen von Wellenbergen und Wellentälern entsteht, kann auf verschiedene Arten in elektrische Energie umgewandelt werden. Einige Bauweisen verwenden ein ähnliches Prinzip wie OWSCs, bei dem Wasser in eine Druckleitung gepumpt und anschließend an Land in einer Turbine wieder entspannt wird. Diese Bauweise ist in Abbildung 9 dargestellt.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung von Lineargeneratoren, einer speziellen Generatorbauweise zur Nutzung geradlinig gerichteter Bewegungsenergie. Bei anderen Bauarten wird die geradlinige Bewegung zunächst in eine kreisförmige überführt und anschließend in einem herkömmlichen Generator zur Energieerzeugung genutzt. Ein großer Vorteil von Punktabsobern besteht darin, dass die Energieerzeugung unabhängig von der Anströmrichtung ist, wodurch sie sehr flexibel einsetzbar sind (Borthwick 2016).



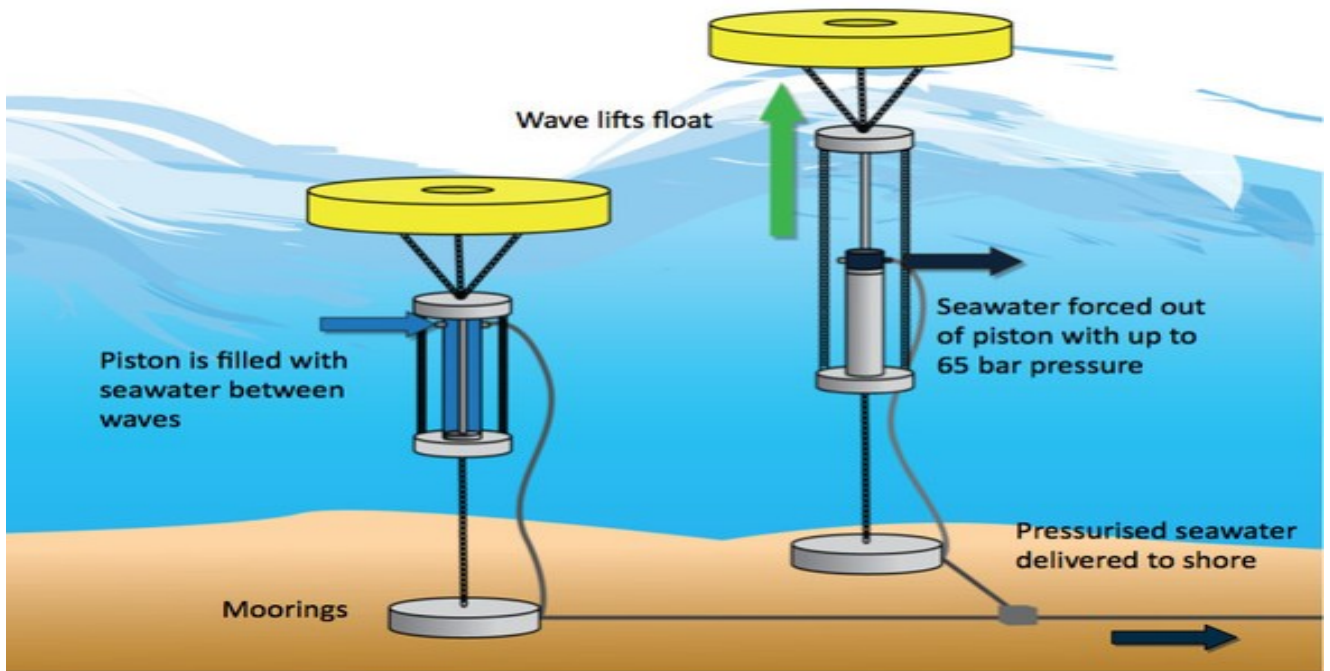


Abbildung 9 Funktionsprinzip eines Pointabsorbers (Sigma Hellas 2018)

### 3.2.5. Submerged Pressure Differentials (SPDs)

Submerged Pressure Differentials stellen eine spezielle Form der Punktabsorber dar. Da sie allerdings nach einem etwas anderen Prinzip arbeiten, als die zuvor beschriebenen Anlagen, werden sie hier in einem eigenen Kapitel behandelt. Wie der Name bereits vermuten lässt, werden hier Druckschwankungen zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet. Anlagen dieser Art bestehen aus zwei ineinandergreifenden Zylindern, die mit Luft gefüllt sind. Der untere Zylinder ist am Meeresgrund fixiert und somit statisch, während der obere Zylinder vertikal beweglich ist. Die Konstruktion ist durch eine Dichtung vor der Flutung durch Wasser geschützt (Drew, Plummer und Sahinkaya 2009).

Der hydrostatische Druck berechnet sich nach der Formel:

$$p(h) = \rho * g * h [Pa]$$

Formel IX

Er ist somit proportional zur Wassertiefe. Wird die Anlage von einem Wellenberg überlaufen, erhöht sich der hydrostatische Druck und der obere Zylinder wird herabgedrückt, wodurch die Luft im Inneren komprimiert wird. Durch die Bewegung wird ein Lineargenerator angetrieben, welcher die kinetische Energie in elektrische umwandelt.

Beim anschließenden Wellental geschieht die gleiche Bewegung in umgekehrter Richtung. Für eine maximale Energieerzeugung ist es sinnvoll, die Schwingfrequenz des Systems an die herrschenden Wellenbedingungen anzupassen (Cruz 2008).

Das bekannteste Beispiel für Anlagen dieser Art stellt die Archimedes Wave Swing dar, deren Funktionsweise Abbildung 10 entnommen werden kann. Die relativ hohe Frequenz der Schwingungen und die große Masse der beweglichen Bauteile führen zu einer hohen Belastung der Konstruktion. Um diese zu kompensieren, ist die Anlage mit einer hydraulischen Bremsvorrichtung ausgestattet (Cruz 2008).

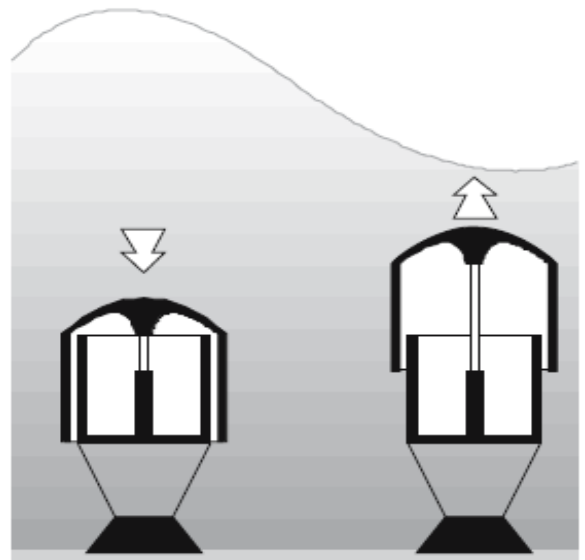


Abbildung 10 Funktionsweise Archimedes Wave Swing (Cruz 2008)

### 3.2.6. Attenuators

Attenuators sind in Form und Ausrichtung das genau Gegenstück zu Overtopping Devices. Es handelt sich um freischwimmende Anlagen mit einer großen Länge und geringer Breite. In Abbildung 11 sind die Dimensionen und die Ausrichtungen von Overtopping Devices (hier als Terminator bezeichnet), Attenuators und Pointabsorbern dargestellt. Overtopping Devices sind demnach senkrecht zur Wellenlaufrichtung ausgerichtet und weisen eine Länge von mehreren Wellenlängen auf. Attenuators sind parallel zur Wellenrichtung ausgerichtet und können ebenfalls Dimensionen von mehreren Wellenlängen haben. Pointabsorber hingegen verfügen im Vergleich zur Wellenlänge nur über eine geringe räumliche Ausdehnung und können unabhängig von der Wellenlaufrichtung ausgerichtet werden.

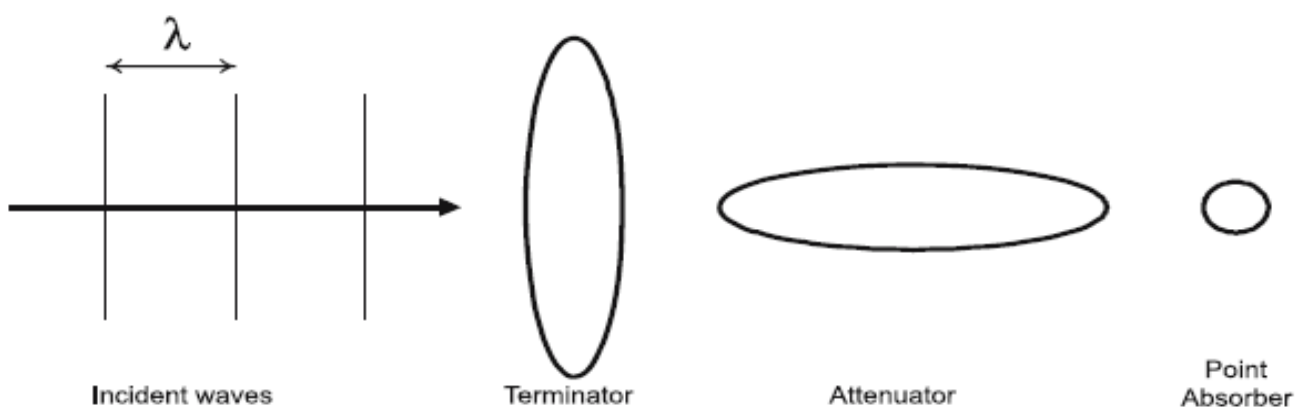


Abbildung 11 Vergleich der räumlichen Ausdehnung unterschiedlicher Wellenkraftwandler im Vergleich zur Wellenlänge  $\lambda$ , (Cruz 2008)

Attenuators bestehen aus zwei oder mehr Segmenten, die über Gelenke miteinander verbunden sind. Durchläuft der Attenuator eine Welle, werden die einzelnen Segmente nacheinander angehoben und

---

anschließend wieder abgesenkt. Die Relativbewegung der einzelnen Glieder zueinander wird genutzt, um Hydraulikzylinder anzutreiben, welche in den Gelenken gelagert sind. Die Hydraulikflüssigkeit wird dadurch in einen Motor gepumpt, der wiederum einen Generator antreibt. Die erzeugte elektrische Energie kann anschließend über Unterseekabel abgeführt werden (Lagoun, Benalia und Benbouzid 2011). Die Verankerung am Meeresboden, erfolgt mithilfe eines Kabels. Durch die Fixierung an nur einem Punkt, ist die Anlage in der Lage, sich mit der Strömung zu drehen und sich selbstständig in Richtung der anlaufenden Wellen auszurichten.

Der bekannteste Vertreter dieser Technologie ist der Pelamis Wave Energy Converter, welcher von 2010 – 2014 von Pelamis Wave Power im EMEC getestet wurde. Er ist in Abbildung 12 dargestellt. Hierbei handelte es sich um das erste vorkommerzielle Wellenkraftprojekt mit Netzanschluss. Zwar wurde eine Weiterentwicklung der Wave Snake durch die Insolvenz des Herstellers verhindert, allerdings konnten bis zum Rückbau der Anlage 2014 über 15.000 Betriebsstunden verzeichnet werden. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse finden bei vielen heute verwendeten Attenuator-Bauweisen Anwendung (Europäische Kommission 2017).



Abbildung 12 Pelami Wave Energy Converter im Einsatz, (EMEC 2018)

### 3.2.7. Bulge Wave Devices

Ähnlich wie Attenuators, sind auch Bulge Wave Devices längliche, schmale Anlagen, die senkrecht zur Wellenrichtung ausgerichtet werden. Sie bestehen aus einer langen Gummiröhre, die mit Wasser unter niedrigem Druck gefüllt und an beiden Enden verschlossen ist. Am hinteren Ende der Anlage ist ein Energiewandler in Form einer herkömmlichen Niederdruckturbine angebracht, welche vom Wasser im Inneren der Anlage durchströmt wird. Wird die Röhre durch eine Welle angeströmt, wird der vordere Teil angehoben und das darin enthaltene Wasser verdrängt. Hierdurch entsteht die namensgebende „Ausbuchtung“ (englisch „bulge“). Bewegt sich der Wellenkamm entlang der Anlage, schiebt er die Ausbuchtung vor sich her, wodurch diese stetig wächst. Am Ende der Röhre wird das so verdrängte Wasser in eine Turbine geleitet. Anschließend wird das Wasser wieder dem Hauptsystem zugeführt (World Energy Council 2016). Ein bekanntes Beispiel von Bulge Wave Devices ist der Anaconda Wave Energy Converter, welcher von Checkmate Seaenergy UK Ltd entwickelt wird. Die Funktionsweise einer solchen Anlage während eines Wellenzyklus ist schematisch in Abbildung 13 dargestellt. Bulge

Wave Devices kommt in der Gesamtmenge der Wellenkraftanlagen heute allerdings nur eine geringe Bedeutung zu (siehe Kapitel 4)

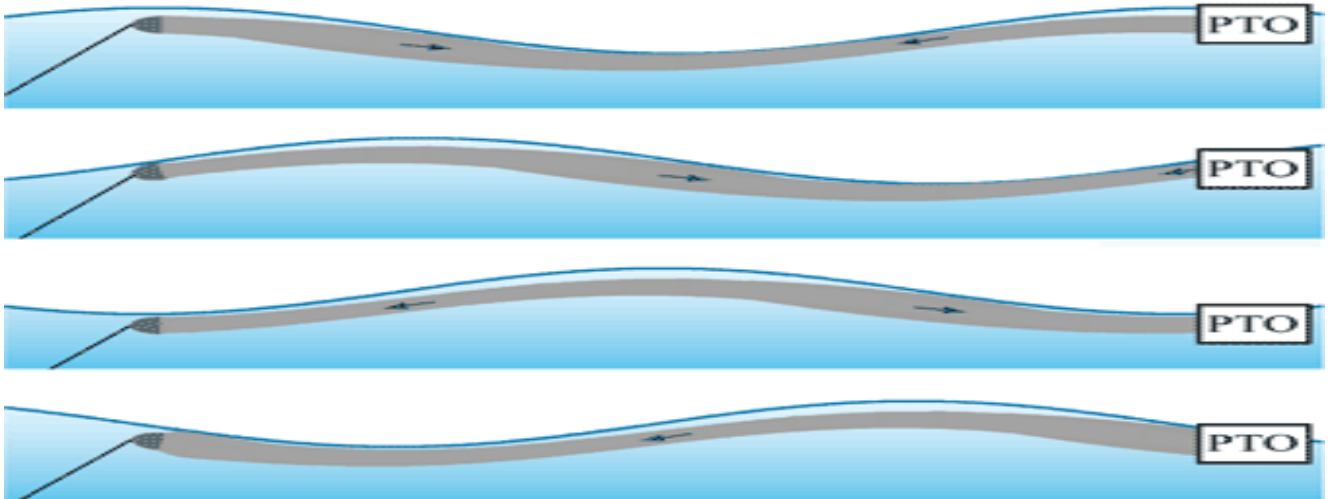


Abbildung 13 Funktionsweise eines Bull Wave Devices, (University of Southampton 2012)

### 3.2.8. Rotating Masses

Die letzte Form der gängigen Wellenkraftwandler sind die sogenannten Rotating Masses. Wie der Name bereits vermuten lässt, geschieht die Energieumwandlung über eine rotierende Masse, die im Inneren der Konstruktion angebracht ist. Die Anlage schwimmt auf dem Wasser und bewegt sich mit dem Wellengang. Aufgrund der Bewegung verschiebt sich das Gravitationszentrum der Anlage, wodurch eine Bewegung der rotierenden Masse induziert wird, da diese stets versucht, einen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Die kinetische Energie in Form der Rotationsbewegung wird dann auf einen Generator übertragen und dort in elektrische Energie umgewandelt (World Energy Council 2016). Ein prominentes Beispiel der Rotating Mass Converter ist der von Wello entwickelte „Penguin“, der momentan vor der Küste der Orkney-Inseln getestet wird. Ein Konzeptbild des Penguin ist in Abbildung 14 dargestellt. Durch die asymmetrische Form soll der Penguin in der Lage sein, Wellen mit unterschiedlichen Anströmrichtungen optimal aufnehmen zu können (Magagna, Monfardini und Uihlein 2016).

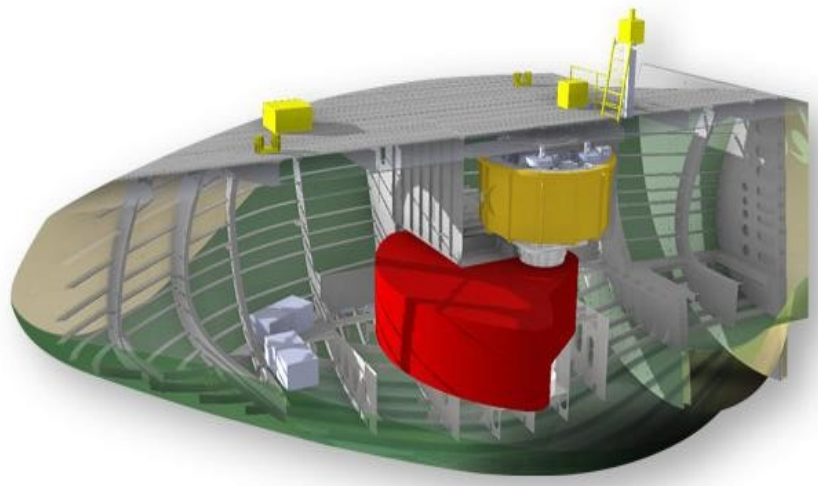


Abbildung 14 Konzeptzeichnung eines Penguin WEC. Die rotierende Masse ist in rot und der Generator in gelb dargestellt. (Subsea world news 2013)

### 3.2.9. Vergleich der unterschiedlichen Typen von Wellenkraftwandlern

In Tabelle 2 sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Wellenkraftwandlertypen gegenübergestellt. Bei OWCs und Overtopping Devices wurde hier jeweils die landbasierte Anlagenvariante betrachtet. Es wurden keine allgemeinen Vor- und Nachteile gegenüber anderen Energieträgern berücksichtigt, sondern lediglich diejenigen, gegenüber anderen Arten von Wellenkraftwandlern.

Tabelle 2 Vor- und Nachteile der einzelnen Arten von Wellenkraftwandlern

		OWC	Overtopping	OWSC	Pointabsorber	SPD	Attenuator	Bulge Wave Devices	Rotating Masses
Vorteile	Instandhaltungsmaßnahmen können an Bord durchgeführt werden	✓	✓						✓
	Die Produktion ist unabhängig von der Wellenaufrichtung, bzw. eine Anpassung an die Wellenaufrichtung ist möglich				✓	✓	✓	✓	
	Die Integration in vorhandene Bauwerke ist möglich	✓	✓						
	Die Verwendung eines Hydrauliksystems ermöglicht die Lagerung aller elektronischen Komponenten an Land			✓	✓				
	Die spezifischen Kosten zur Energieerzeugung sind verhältnismäßig niedrig (siehe Kapitel 6.1)			✓	✓			✓	
	Der Technologie-Reifegrad ist überdurchschnittlich hoch (siehe Kapitel 7.1)	✓		✓					✓
	Die Technologie wurde bereits in mehreren Projekten umgesetzt (siehe Kapitel 4)	✓		✓	✓		✓		✓
	Es stehen überdurchschnittlich hohe Fördermittel zur Verfügung (siehe Kapitel 4)				✓				✓
Nachteile	Ein Fundament ist notwendig			✓	✓	✓			
	Unterseekabel sind notwendig. Die Transportwege zum Stromnetz sind groß					✓	✓	✓	✓
	Es besteht Kontakt zwischen beweglichen Bauteilen und Salzwasser		✓	✓	✓				
	Schiffahrtsrouten können beeinträchtigt werden			✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Deutliche akustische Umweltbelastungen	✓				✓			
	Hohe Anfälligkeit für Starkwetterereignisse				✓		✓	✓	✓
	Es entsteht eine zusätzliche optische Umweltbelastung				✓		✓	✓	✓
	Es besteht eine direkte Gefährdung von maritimer Fauna durch schwingende Strukturen.			✓	✓	✓			

#### 4. Aktueller Stand des Ausbaus

Im Folgenden wird der Stand des Ausbaus der Wellenenergienutzung untersucht. Hierbei ist sowohl die installierte Leistung, als auch die Verwendungshäufigkeit der einzelnen Bauarten von Interesse. Dafür wurde in einem ersten Schritt eine Liste der bereits vollständig oder teilweise errichteten sowie der geplanten Anlagen erstellt. Die Ergebnisse sind in den Tabelle 3 bis Tabelle 5 dargestellt. Tabelle 3 enthält die bereits errichteten-, Tabelle 4 die im Bau befindlichen- und Tabelle 5 die geplanten Wellenkraftprojekte. Als Quelle wurden hauptsächlich die jährlichen Berichte von Ocean Energy Systems der Jahre 2016 (Brito e Melo 2016) & 2017 sowie der JRC Ocean Energy Status Report 2016 (Magagna, Monfardini und Uihlein 2016) verwendet. Da viele Anlagen nur sehr schlecht dokumentiert sind und oftmals unterschiedliche Angaben zu Projektstatus und Leistung existieren, können die Tabellen nur einen groben Überblick bieten und haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Insgesamt wurde eine Anzahl von 51 Wellenkraftwerken mit einer maximalen Gesamtkapazität von ca. 63 MW ermittelt. Eine Darstellung der räumlichen Verteilung aller genannten Anlagen kann Anhang 1 entnommen werden.

Tabelle 3 Liste der installierten Wellenkraftanlagen, (Magagna, Monfardini und Uihlein 2016) & (Brito e Melo 2016)

Projektname	Land	Nennleistung	Technologie
CEFOW	Vereinigtes Königreich	3 MW	Rotating Mass
Perth project	Australien	0,2 MW	Pointabsorber
Wavestar	Dänemark	0,6 MW	Pointabsorber
Ocean Energy USA	USA	0,5 MW	Pointabsorber
Yongsoo WEC/OWC	Südkorea	0,5 MW	OWC
Pico	Portugal	0,4 MW	OWC
Shengshan Island Isolated Hybrid Power Demonstration Station	China	0,3MW	OWSC
GIEC Wanshan Island Isolated Hybrid Power Demonstration Station	China	0,3 MW	OWSC
Mutriku	Spanien	0,3 MW	OWC
Wave4Power	Norwegen	0,2 MW	Pointabsorber
UNDIGEN	Spanien	0,2 MW	Pointabsorber
Lysekil wave energy research test site	Schweden	0,2 MW	Pointabsorber
Columbia Power Technologies	USA	0,14 MW	Attenuator
INWave WEC	Südkorea	0,135 MW	Pointabsorber
Eco Wave Power	Spanien	0,1 MW	Pointabsorber
WaveEL	Schweden	0,1 MW	Pointabsorber
40SouthEnergy	Italien	0,1 MW	OWSC
CSIC710 Wanshan Wave Energy Demonstration Project	China	0,1 MW	OWSC

Fortsetzung Tabelle 3

Projektname	Land	Nennleistung	Technologie
Resolute Marine Energy SurgeWEC	USA	0,05 MW	OWSC
Oceantec	Spanien	0,03MW	OWC
Hwa Jin WEC	Südkorea	0,03 MW	Pointabsorber
Corpower	Vereinigtes Königreich	0,025 MW	Pointabsorber
Fred Olsen	USA	0,023 MW	Pointabsorber
Isle of Muck	Vereinigtes Königreich	0,022 MW	Attenuator
Azura Wave	USA	0,02 MW	Pointabsorber
AZURA Wave	Neuseeland	0,02 MW	Pointabsorber
Wavepiston	Dänemark	0,012 MW	Attenuator
Mermaid Power	Kanada	0,011 MW	Pointabsorber
PB3	USA	0,003 MW	Pointabsorber
NEMOS	Dänemark	0,001 MW	Sonstige
Seapower	Irland	k.A.	Attenuator
$\Sigma$		8,272 MW	

Tabelle 4 Liste der im Bau befindlichen Wellenkraftanlagen, (Magagna, Monfardini und Uihlein 2016) &amp; (Brito e Melo 2016)

Projektname	Land	Nennleistung	Technologie
Ghana	Ghana	14 MW	Pointabsorber
CET06 Wave hub	Vereinigtes Königreich	15 MW	Pointabsorber
Sotenäs	Schweden	10 MW	Pointabsorber
Swell	Portugal	5,6 MW	OWSC
CET06	Australien	4 MW	Pointabsorber
WEC device Exclusive	Mexiko	0,2 MW	OWSC
Camp Rilea	USA	0,04 MW	OWSC
Baby Penguin	Spanien	k.A.	Rotating Mass
Wedge Global	Spanien	k.A.	Rotating Mass
$\Sigma$		48,84 MW	

Tabelle 5 Liste der geplanten Wellenkraftanlagen, (Magagna, Monfardini und Uihlein 2016) &amp; (Brito e Melo 2016)

Projektname	Land	Nennleistung	Technologie
Westwave	Irland	5 MW	Sonstige
Northwest Energy Innovations	USA	1 MW	Pointabsorber
KRISO Floating WEC	Südkorea	0,3 MW	Pointabsorber
ISWEC	Italien	0,1 MW	Rotating Mass
H24 WEC	Italien	0,05 MW	Sonstiges
CrestWING	Dänemark	0,03 MW	Attenuator
Butterfly	Spanien	0,007 MW	Pointabsorber
Weptos	Dänemark	0,006 MW	Sonstiges
Resen Waves	Dänemark	0,001 MW	Pointabsorber
ExoWave	Dänemark	0,001 MW	OWSC
REWEC-3	Italien	k.A.	OWC
$\Sigma$		6,495 MW	

Zu beachten ist hierbei, dass in vielen Fällen die maximal installierte und die wirklich erbrachte Leistung stark voneinander abweichen. Die sehr niedrige Leistung vieler Anlagen im Bereich  $<1\text{MW}$  ist dadurch zu erklären, dass es sich bei fast allen Projekten um Testanlagen oder Prototypen handelt. Diese werden zunächst einzeln oder in einem verkleinerten Maßstab getestet, sollen jedoch anschließend in kommerziellen Projekten deutlich vergrößert und leistungsstärker eingesetzt werden. Es lässt sich somit erkennen, dass bisher noch keine fertiggestellte, wirtschaftlich betriebene Anlage existiert.

Die Verteilung der 51 ermittelten Wellenkraftwerke nach Bauart kann Abbildung 15 entnommen werden. Hierbei wird deutlich, dass knapp die Hälfte aller gebauten- und geplanten Wellenkraftwerke den Pointabsorbern zuzuordnen sind. Den Bauarten „Bulge Wave Device“ und „Overtopping Device“ kommt offensichtlich bei aktuellen Projekten keine Bedeutung zu, da beide in der Liste nicht vertreten sind. Auch die Bezeichnung „Submerged Pressure Differential Devices“ wurde für keine der bekannten Anlagen verwendet. Da diese in der Fachliteratur allerdings meist den Pointabsorbern zugerechnet werden, ist nicht auszuschließen, dass diese Technologie auch Verwendung findet. Hierdurch könnte der sehr hohe Wert für Pointabsorber etwas relativiert werden. Wie bereits erwähnt, ist die Dokumentation vieler Anlagen mangelhaft, weshalb nicht immer die genaue Funktionsweise ermittelt werden konnte.

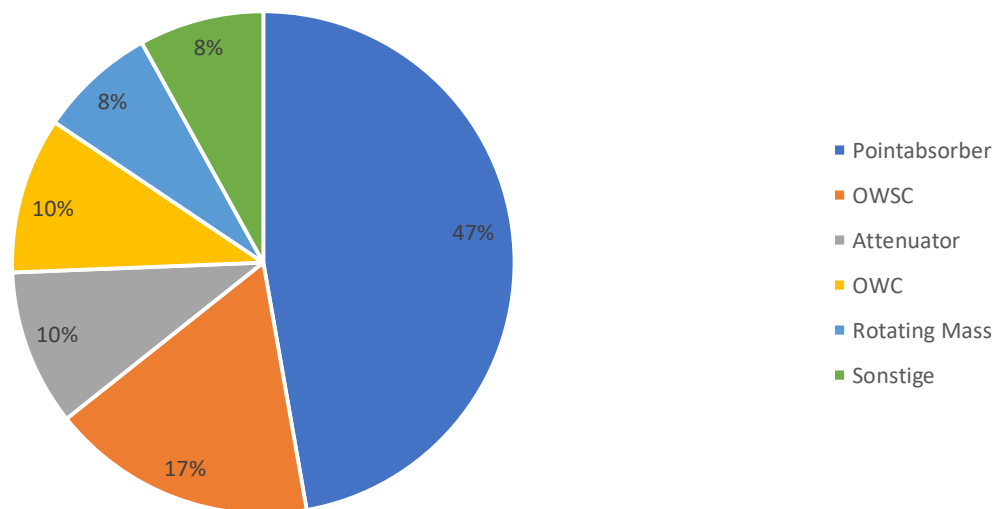


Abbildung 15 Prozentuale Verteilung der Wellenkraftwandler nach Bauart, eigene Darstellung

Von (Magagna und Uihlein 2015) & (Magagna, Monfardini und Uihlein 2016) wurde die Verteilung der für Forschung und Entwicklung aufgebrauchten Finanzmittel auf die unterschiedlichen Technologien untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 (Bezugsjahr 2014) & Abbildung 17 (Bezugsjahr 2016) dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass innerhalb von zwei Jahren eine deutliche Verschiebung



der Verteilung zu verzeichnen war. Während die Finanzierung für OWSCs, Attenuators und Rotating Masses deutlich rückläufig war, konnten OWCs und „Sonstige“ einen deutlichen Zuwachs verbuchen.

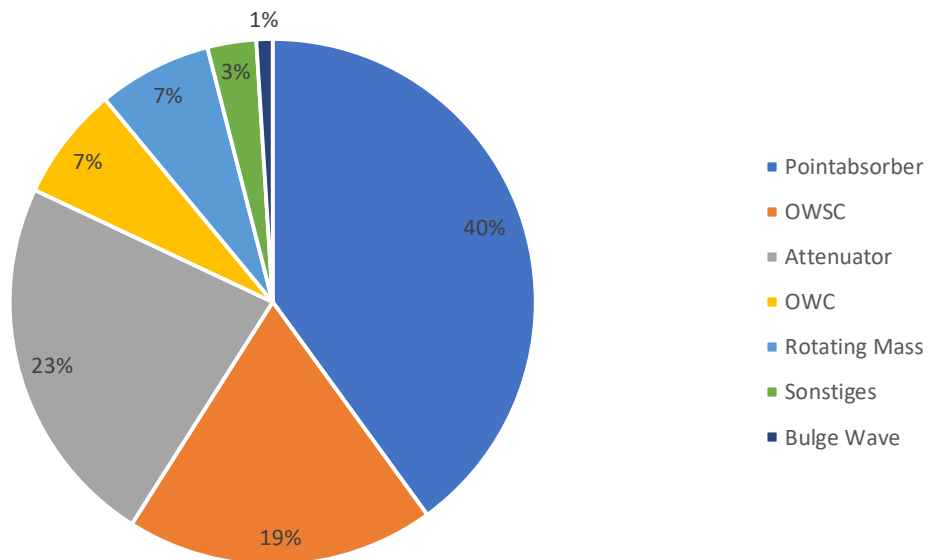


Abbildung 16 Prozentuale Verteilung der aufgebrauchten finanziellen Mittel für Forschung und Entwicklung (2014), angepasst nach (Magagna und Uihlein 2015)

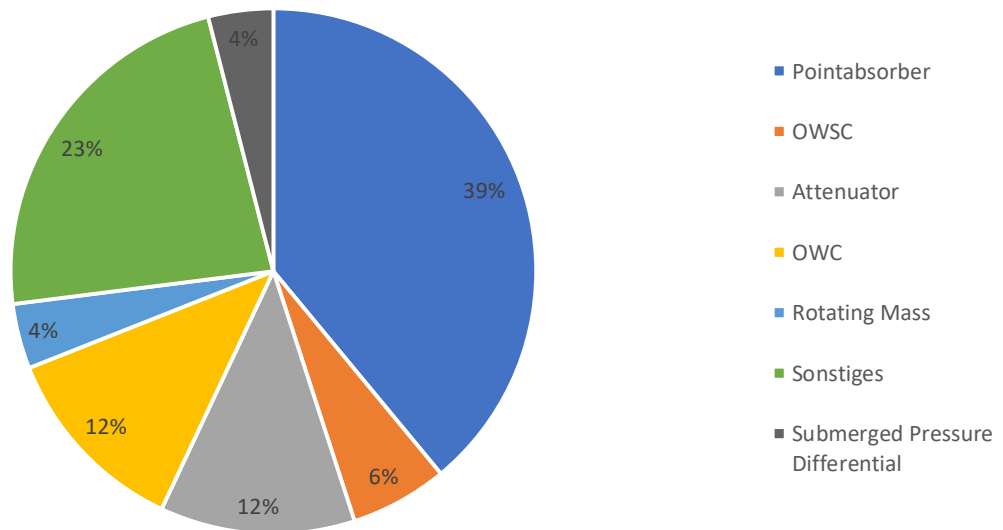


Abbildung 17 Prozentuale Verteilung der aufgebrauchten finanziellen Mittel für Forschung und Entwicklung (2016), angepasst nach Von (Magagna und Uihlein 2015)

Im letzten Schritt der Untersuchung soll die Verteilung der Hersteller von Wellenkraftwandlern nach Technologietyp untersucht werden. Insgesamt wurden vom EMEC 226 Hersteller identifiziert (EMEC 2018). Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt.

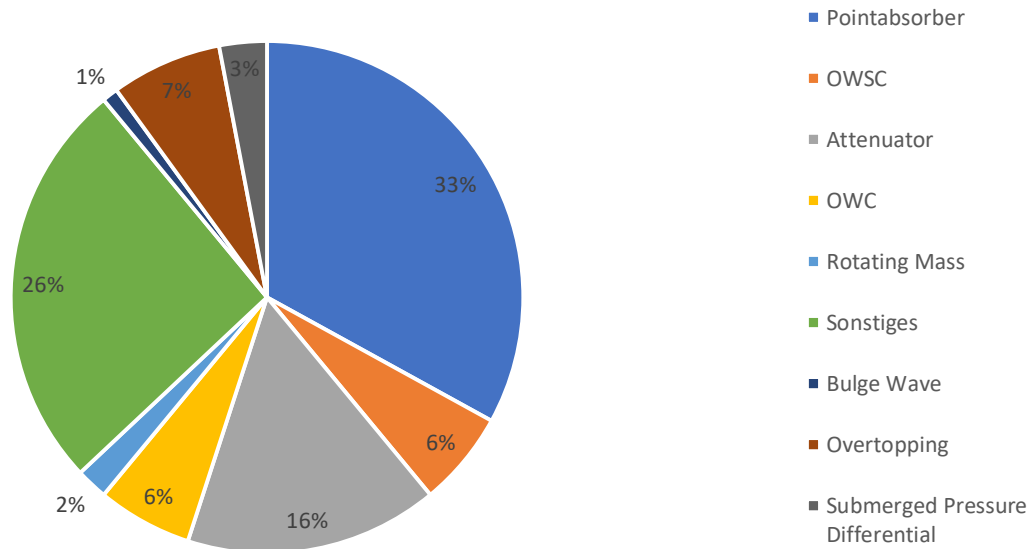


Abbildung 18 Prozentuale Verteilung der Hersteller von Wellenkraftwandlern nach Technologie, eigene Darstellung, nach (EMEC 2018)

Entsprechend diesen Ergebnissen besteht offensichtlich eine Diskrepanz zwischen der Menge der Entwickler, den nach Technologie aufgebrachtten Finanzmitteln und den tatsächlich in der Umsetzung befindlichen Projekten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 6 Marktaufteilung der unterschiedlichen Wellenkraftwandlertypen, eigene Darstellung

	Anteil an allen dokumentierten Projekten	Anteil an aufgebrachtten Finanzmitteln 2014	Anteil an aufgebrachtten Finanzmitteln 2016	Anteil an Technologieentwicklern
Pointabsorber	47%	40%	39%	33%
OWSCs	17%	19%	6%	6%
Attenuator	10%	23%	12%	16%
OWCs	10%	12%	6%	6%
Rotating Masses	8%	7%	4%	2%
Bulge Wave Devices	–	1%	–	1%
Overtopping Devices	–	–	–	7%
SPDs	–	–	4%	3%
Sonstige	8%	3%	23%	26%

---

Aus der Tabelle können die Folgenden Ergebnisse abgeleitet werden:

- **Pointabsorber** stellen sowohl in Bezug auf Projekt- und Entwickleranzahl, als auch in Bezug auf die aufgebrauchten finanziellen Mittel den größten Marktanteil dar. Die finanzielle Förderung war in der Vergangenheit relativ konstant.
- Im Verhältnis zu den finanziellen Mitteln und den Entwicklern für **OWSCs**, verfügt die Technologie über einen überdurchschnittlichen Anteil an der Anzahl der Gesamtprojekte. Dennoch sind die aufgebrauchten Finanzmittel rückläufig.
- Die für **Attenuators** aufgebrauchten Finanzmittel sind ebenfalls rückläufig. Im Verhältnis zu der Anzahl an Entwicklern sind relativ wenige Projekte dieser Technologie zuzuordnen.
- Für **OWCs** und **Rotating Masses** gilt Ähnliches, wie für OWSCs. Ein verhältnismäßig geringer Anteil an Entwicklern und finanziellen Mitteln, aber ein relativ hoher Anteil an den dokumentierten Projekten. Auch hier sind die finanziellen Mittel tendenziell rückläufig.
- **Bulge Wave Devices**, **Overtopping Devices** und **SPDs** spielen offensichtlich am Markt keine nennenswerte Rolle.
- „**Sonstige**“ Technologien haben einen hohen Anteil an Entwicklern und finanzieller Förderung, aber einen verhältnismäßig sehr geringen Anteil an dokumentierten Projekten.

---

## 5. Untersuchung der Entwicklung im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern

---

In diesem Kapitel soll die Entwicklung der Wellenenergie mit der von anderen regenerativen Energieträgern (Windkraft, Photovoltaik und Gezeitenenergie) verglichen werden. Daraus soll anschließend eine Abschätzung darüber getroffen werden, ob die Entwicklung schneller-, vergleichbar- oder langsamer vorangeht, als bei ähnlichen Energieträgern.

### 5.1. Untersuchung der installierten Leistung

Betrachtet wurde für Wellenkraftwandlern der Zeitraum von 2010 (erster Netzanschluss eines Wellenkraftwandlers im Megawattbereich) (TETHYS 2016) bis 2017. Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob die Entwicklung von Wellenkraftanlagen atypisch für vergleichbare Energieträger verläuft, müssen bei den zum Vergleich gewählten Technologien die folgenden Kriterien berücksichtigt werden:

- Es muss ebenfalls die Frühphase der Entwicklung mit einer niedrigen installierten Leistung im Bereich von einigen MW betrachtet werden.
- Die Markteinführung der Technologie darf nicht zu lange zurückliegen.
- Zum Zeitpunkt der Markteinführung darf noch keine zu große wissenschaftliche Expertise für die verwendete Technologie vorgelegen haben. Deshalb ist beispielsweise die Betrachtung der Offshore-Windkraft für einen Vergleich ungeeignet, da die Technologie bereits aus Onshore-Windkraftanlagen bekannt war.
- Es muss eine sehr gute Dokumentation der installierten Leistung im Untersuchungszeitraum vorliegen.
- Die Energiegewinnung sollte nicht in großen Kraftwerken erfolgen, sondern durch mehrere (gekoppelte) Anlagen im Bereich von einigen KW, bis mehreren MW.

Berücksichtigt man die oben genannten Kriterien, so bieten sich für einen aussagekräftigen Vergleich am besten Photovoltaikanlagen sowie Windkraftanlagen an. Dennoch muss beachtet werden, dass die Frühphase der Entwicklung von Wind- und Solarenergie Ende der 1970er- und Anfang der 1980er Jahre stattfand und somit andere wirtschaftliche und technologische Voraussetzungen herrschten, als heute. Der Vergleich zur Wellenkraft kann somit nur eine ungefähre Tendenz vorgeben, bietet aber dennoch die beste Möglichkeit, zwei neu einzuführende regenerative Energieträger gegenüberzustellen. Zur besseren Einordnung sind zusätzlich in den Anhang 2 & Anhang 3 die gesamte Entwicklung der kumulierten Leistung an Windkraft- und Photovoltaikanlagen dargestellt.

Ein dritter Vergleich wird zur Gezeitenenergie gezogen, um eine Abschätzung darüber treffen zu können, wie die Entwicklung der Wellenenergie im Vergleich zu anderen marinen Energieträgern vorangeht.

Bei den drei zu vergleichenden Energieträgern wurde ebenfalls jeweils ein Zeitraum von 8 Jahren, im technologischen Frühstadium betrachtet. Die installierte Leistung zum Untersuchungsbeginn lag in allen Fällen im Bereich  $\leq 10$  MW. Für Windkraftanlagen wurde zu diesem Zweck der Zeitraum von 1980 – 1987 untersucht, für Photovoltaikanlagen der Zeitraum von 1977 – 1984 und für Gezeitenkraftanlagen der Zeitraum von 2010 – 2017. Zu beachten ist, dass bei den Zahlen zur Gezeitenenergie die Staudammbauweise (engl. Tidal Barrage) nicht berücksichtigt wird. Die Ergebnisse beziehen sich lediglich auf die freistehenden Gezeitenenergieanlagen (engl. Tidal Stream oder Tidal Current). Die Ergebnisse sind in den Abbildung 19 - Abbildung 22 dargestellt.

### 5.1.1. Entwicklung der installierten Leistung an Windkraftanlagen von 1980 - 1987

Betrachtet man zunächst die Ergebnisse zur Windkraft, welche in Abbildung 19 dargestellt sind, so wird deutlich, dass im Untersuchungszeitraum eine kontinuierliche Entwicklung mit einem durchschnittlichen Wachstum von ca. 120% pro Jahr zu verzeichnen war. Die installierte Leistung lag im Jahr 1980 weltweit bei knapp 10 MW und Ende 1987 bei knapp 1.450 MW, was einer Steigerung um 14.400% entspricht. Auffällig ist außerdem, dass bei absoluter Betrachtung die Menge der Neuinstallationen in den ersten fünf Jahren kontinuierlich anstieg, in den folgenden Jahren allerdings wieder leicht zurück ging. Dieser Rückgang setzte sich in den beiden folgenden Jahren bis 1989 weiter fort. Seit 1989 ist jedoch in jedem Jahr ein Wachstum der zugebauten Leistung an Windkraftanlagen zu verzeichnen (Brown 2010).

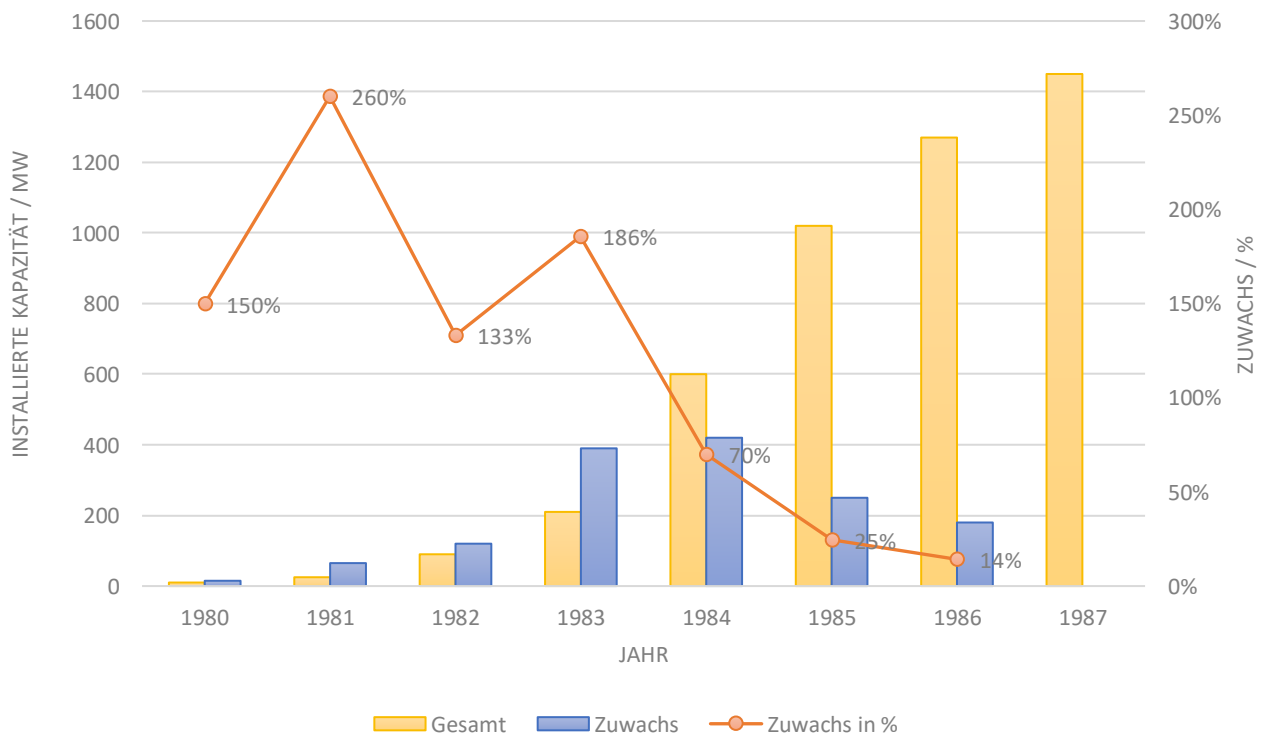


Abbildung 19 Entwicklung der installierten Kapazität an Windkraft von 1980 – 1987, eigene Darstellung nach (Brown 2010)

### 5.1.2. Entwicklung der installierten Leistung an Photovoltaikanlagen von 1977 - 1984

In Abbildung 20 ist die Entwicklung der installierten Leistung von Photovoltaikanlagen dargestellt. Es sind einige Parallelen zur Windkraft erkennbar. Ebenso wie zuvor, ist über den gesamten Untersuchungszeitraum ein kontinuierliches Wachstum zu beobachten, welches jedoch mit ca. 52% p.a. deutlich niedriger ausfällt, als bei der Windkraft. Bei der Entwicklung des Zubaus ist ein Unterschied zur Windkraft erkennbar. Der bei Windkraftanlagen erkennbare Rückgang der zugebauten Leistung nach 5 Jahren ist hier nicht zu erkennen. Vielmehr stieg die zugebaute Menge an Photovoltaikanlagen kontinuierlich an. Dieser Trend setzte sich bis 2009 fort (Brown 2010). Die installierte Leistung im Untersuchungszeitraum liegt zwischen 2 MW im Jahr 1977 und ca. 76 MW im Jahr 1984. Dies bedeutet eine Gesamtsteigerung von etwa 3.700%.

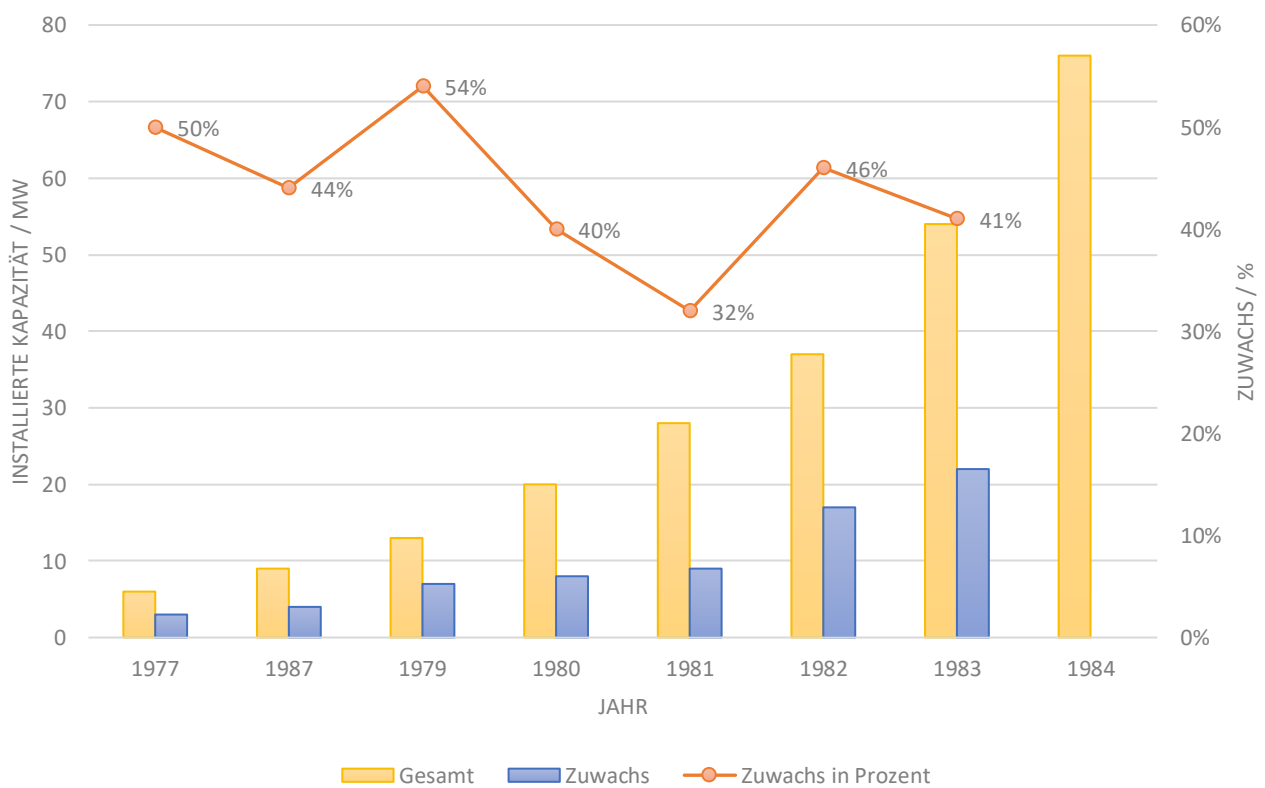


Abbildung 20 Entwicklung der installierten Kapazität an Photovoltaikanlagen von 1977 – 1984, eigene Darstellung nach (Brown 2010)

### 5.1.3. Entwicklung der installierten Leistung an Gezeitenkraftanlagen von 2010 - 2017

In Abbildung 21 ist die Entwicklung der installierten Leistung von Gezeitenkraftwerken von 2010 – 2017 dargestellt. Ähnlich wie bei den beiden vorangegangenen Energieträgern ist zwar ein Wachstum zu beobachten, dieses findet jedoch sehr viel unregelmäßiger und sprunghafter statt. Das durchschnittliche Wachstum fällt mit etwa 39% p.a. außerdem deutlich niedriger aus.

Ein Trend beim absoluten Zubau ist ebenfalls nicht erkennbar. Stattdessen fällt das absolute Wachstum zunächst ab, sinkt im Jahr 2014 bis auf null ab und steigt anschließend wieder stark an. Anfang 2010 lag die weltweit installierte Leistung bei 2,2 MW, im Vergleich zu 18,7 MW Ende 2017. Dies entspricht einer Gesamtzunahme um 750%.

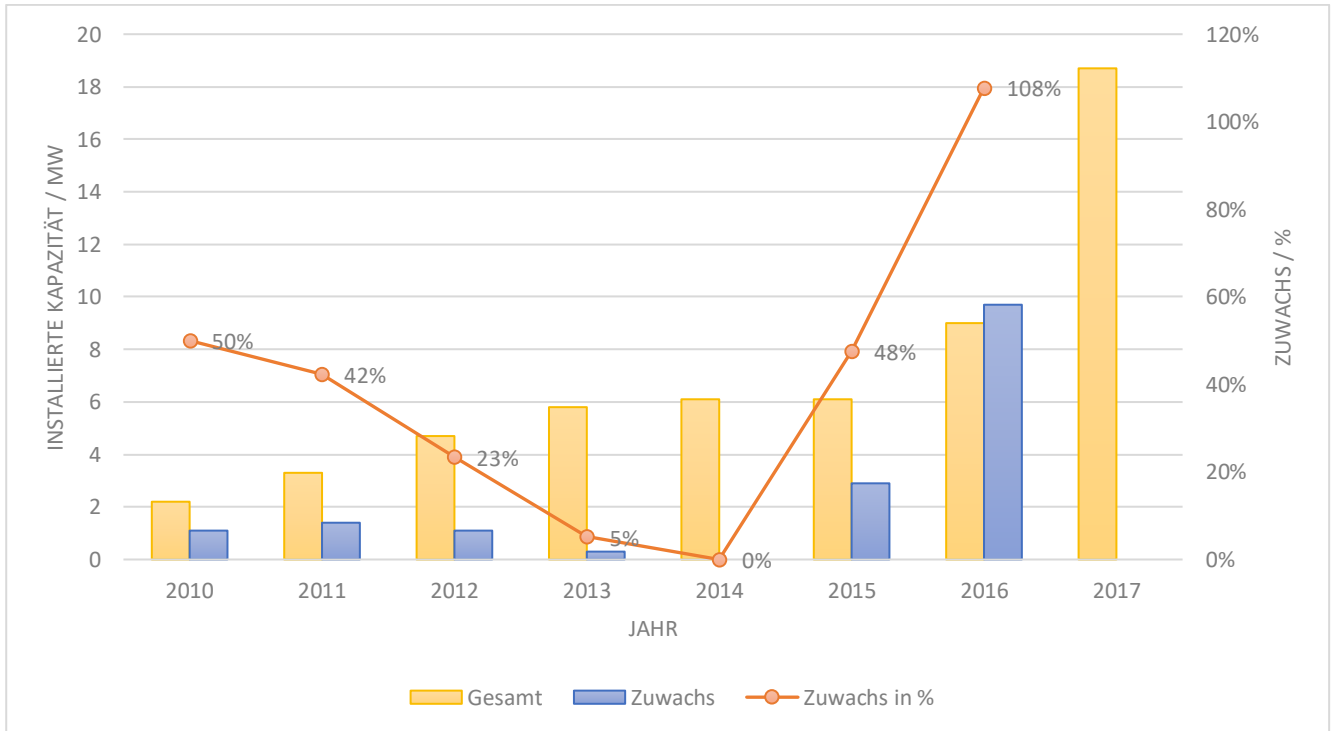


Abbildung 21 Entwicklung der installierten Kapazität an Gezeitenenergie von 2010 – 2017, eigene Darstellung nach (Brito e Melo, Jeffrey, et al. 2017)

#### 5.1.4. Entwicklung der installierten Leistung an Wellenkraftanlagen von 2010 - 2017

Die Entwicklung der installierten Leistung an Wellenkraftanlagen ist in Abbildung 22 dargestellt. Zwar ist auch hier über den Betrachtungszeitraum ein Anstieg zu beobachten, allerdings ist dabei keine Regelmäßigkeit zu erkennen. In den drei Jahren, welche auf die Installation der ersten Anlage folgten, lag der Zubau an neuen Anlagen bei null. Die durchschnittliche jährliche Entwicklung liegt mit etwa 45% p.a. in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der Gezeitenenergie und damit unterhalb der Werte von Windkraft und Photovoltaik. Der Gesamtzuwachs von 1 MW auf 8,6 MW liegt bei 760% und ist damit ebenfalls sehr ähnlich zur Gezeitenenergie. Der hier für das Jahr 2017 angegebene Wert von 8,6 MW passt hervorragend zu der in Kapitel 4 ermittelten installierten Gesamtleistung von 8,272 MW, wodurch die erzielten Ergebnisse noch einmal bestätigt werden.

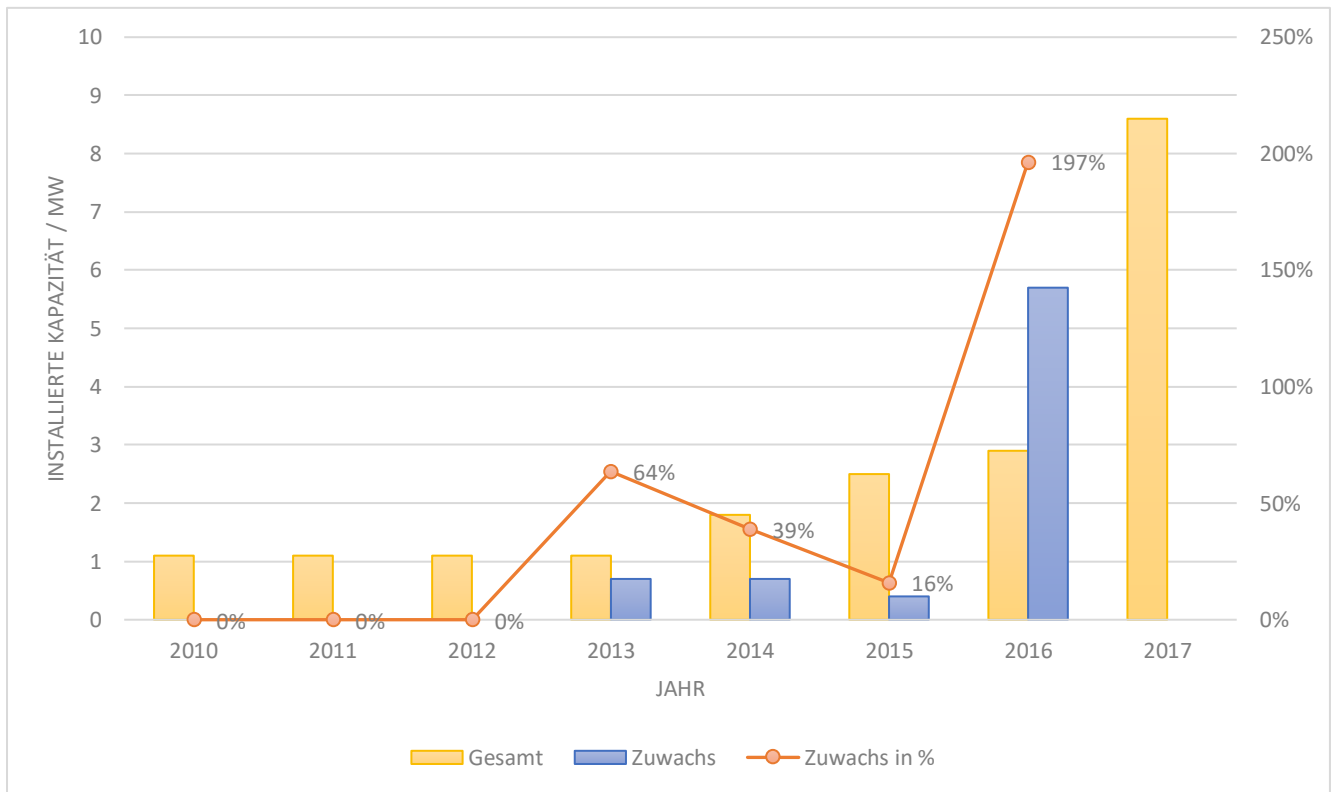


Abbildung 22 Entwicklung der installierten Kapazität an Wellenenergie von 2010 – 2017, eigene Darstellung nach (Brito e Melo, Jeffrey, et al. 2017)

Zusammenfassend ist erkennbar, dass die Entwicklung von Wellen- und Gezeitenkraftanlagen deutliche Unterschiede zu der von Wind- und Photovoltaikanlagen aufweist. Auch wenn diese sich in den Zahlen voneinander unterscheiden, sind sowohl bei der Windkraft, als auch bei der Photovoltaik deutliche Regelmäßigkeiten und Trends erkennbar. Diese fehlen jedoch bei der Gezeitenenergie und Wellenenergie vollständig. Sowohl im relativen, als auch im absoluten Vergleich, bleiben die Meeresenergie-träger deutlich hinter den beiden etablierten Energieträgern zurück. Beim direkten Vergleich der beiden marinen Energieträger fällt auf, dass der Zubau der Gezeitenkraft zumindest etwas regelmäßiger abläuft, als der der Wellenenergie. Somit kann angenommen werden, dass der Ausbau der Wellenenergie und auch der Gezeitenenergie tendenziell langsamer und unregelmäßiger abläuft, als der von vergleichbaren Energieträgern.

## 5.2. Untersuchung der Preisentwicklung

In diesem Kapitel soll die Entwicklung der Stromgestehungskosten der oben genannten regenerativen Energieträger in den gleichen Zeiträumen, wie im vorigen Kapitel untersucht werden. Daraus soll im Anschluss abgeleitet werden, ob die hohen Kosten für die Stromerzeugung aus Wellenkraftanlagen ein typisches Merkmal eines regenerativen Energieträgers in diesem Entwicklungsstadium sind oder ob die Kosten im Vergleich zu anderen Energieträgern zu hoch liegen. Die Bezeichnung Cent, bzw. ¢ bezieht sich im Folgenden auf US-amerikanische Cents.



### 5.2.1. Entwicklung der Stromgestehungskosten von Windkraftanlagen von 1980 - 1987

In Abbildung 23 ist die Entwicklung der Kosten für Windkraftanlagen im Zeitraum von 1980 bis 1987 dargestellt. Ein kontinuierlicher Abwärtstrend ist gut zu erkennen. Über den Untersuchungszeitraum sank der Preis von 63,3 ¢/kWh auf 29,2 ¢/kWh, was einer Kostensenkung um etwa 54% entspricht. Durchschnittlich fiel der Preis jedes Jahr um etwa 10,4%. Diese Preisreduktion setzte sich auch in den kommenden Jahren fort (Dvorak 2017). Die gesamte Preisentwicklung von 1980 – 2015 kann Anhang 5 entnommen werden.

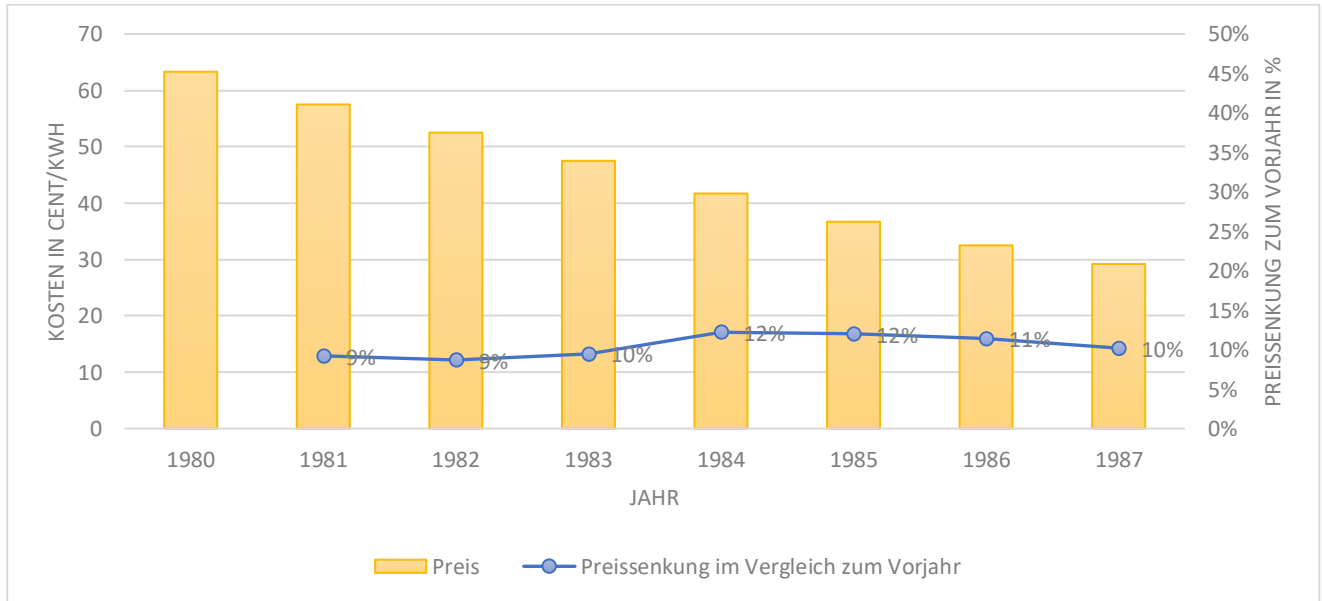


Abbildung 23 Preisentwicklung im Windkraftsektor von 1980 – 1987, eigene Darstellung nach (WTWH Media 2018)

### 5.2.2. Entwicklung der Stromgestehungskosten von Photovoltaikanlagen von 1977 - 1984

Die Preisentwicklung von Photovoltaikanlagen von 1977 – 1984 kann Abbildung 24 entnommen werden. Da keine belastbaren Ergebnisse in der Einheit ¢/kWh ermittelt werden konnten, sind die Werte für Photovoltaikanlagen in \$/W installierter Leistung angegeben. Da hauptsächlich die prozentuale Preisentwicklung von Interesse ist, fällt dieser Unterschied aber nicht weiter ins Gewicht. Auch hier ist im Beobachtungszeitraum eine kontinuierlich fallende Entwicklung zu verzeichnen. Diese fällt allerdings noch einmal deutlich stärker aus, als bei der zuvor untersuchten Windkraft. In den untersuchten acht Jahren fiel der Preis von 76,7 \$/W installierter Leistung auf 14,2 \$/W. Dies entspricht einer Gesamtsenkung um 81,5%. Durchschnittlich fielen die Kosten pro Jahr um etwa 21,1%. Die Preisentwicklung von Photovoltaikanlagen wurde Anfang der 2000er von Richard Swanson untersucht. Das nach ihm benannte Swanson-Gesetz besagt, dass bei jeder Verdopplung der bisher insgesamt weltweit produzierten Photovoltaikanlagen eine Kostensenkung um etwa 20% zu beobachten ist (Partain und Fraas 2016). Überprüft man diese Aussage für den untersuchten Zeitraum ab 1977, so zeigt sich, dass insgesamt sechs Mal eine Verdopplung der installierten Gesamtleistung zu verzeichnen war ( $0,77 \text{ MW} * 2^6 = 49,28 \text{ MW} \approx 52 \text{ MW}$ ). Die Preisreduktion für jeden dieser Abschnitte lag bei etwa 24,5% ( $76,7 \text{ $/W} *$

0,755<sup>6</sup> = 14,2 \$/W). Die Kostensenkung liegt damit zwar etwas oberhalb des von Swanson genannten Wertes, dies ist allerdings dadurch zu erklären, dass das Swanson-Gesetz den gesamten Zeitraum von 1977 – etwa 2012 beschreibt und lediglich Aussagen zur durchschnittlichen Preisentwicklung trifft. Diese kann in einzelnen Zeiträumen auch höher oder niedriger ausfallen.

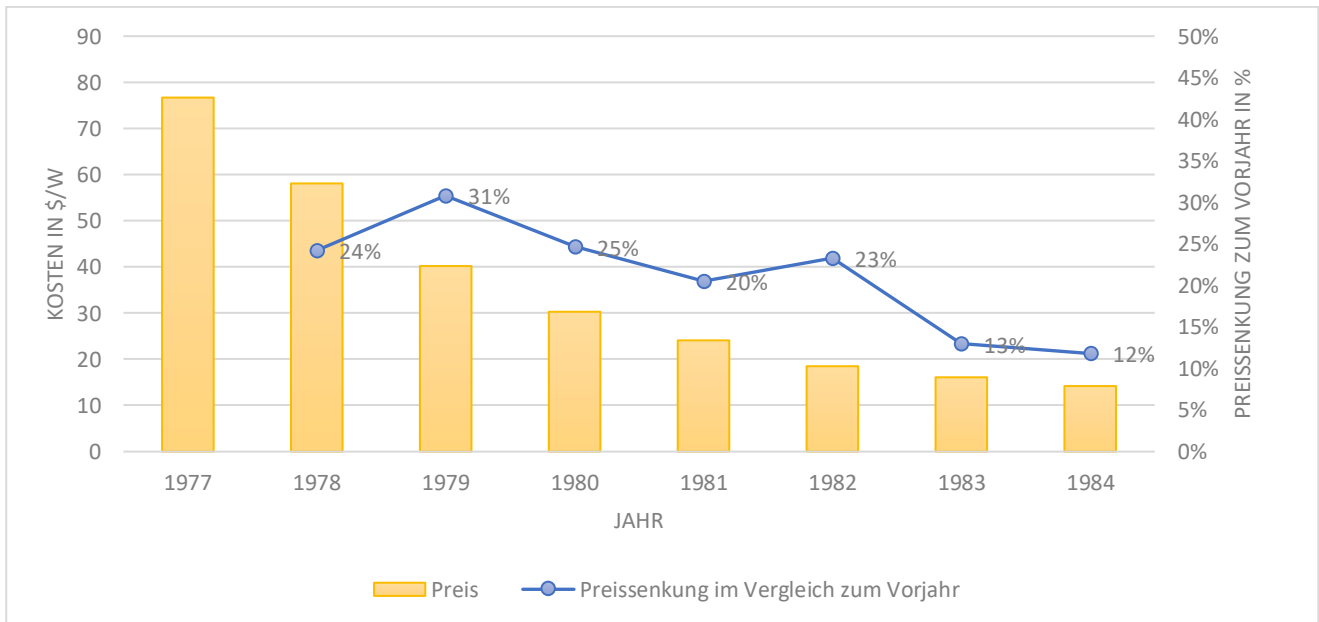


Abbildung 24 Preisentwicklung im Photovoltaiksektor von 1977 – 1984, eigene Darstellung nach (Diamandis 2014)

### 5.2.3. Entwicklung der Stromgestehungskosten von Gezeitenkraftanlagen von 2010 – 2017

Es existiert eine Vielzahl von Angaben zu aktuellen Stromgestehungskosten für Gezeitenkraftwerke. Diese unterscheiden sich teils stark voneinander und decken einen großen Wertebereich ab. Die im Folgenden genannten Werte bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung und werden deshalb als aussagekräftiger betrachtet als Werte, welche nur von einzelnen Quellen, ohne Angabe von Begründungen gegeben wurden.

- (Kempener und Neumann 2014): 250 – 470 €/MWh (entspricht 29 – 55 ¢/kWh)
- (World Energy Council 2016): 44 ¢/kWh
- (Borthwick 2016): 155 - 390 £/MWh (entspricht 20 – 51 ¢/kWh)

Obwohl zahlreiche Studien existieren, welche einen zukünftigen Rückgang der Stromgestehungskosten prognostizieren (z.B. (Astariz, Vazquez und Iglesias 2015) & (International Energy Agency 2018)), konnte eine solche Entwicklung in der Vergangenheit nicht beobachtet werden. Keine der gefundenen Quellen trifft eine Aussage zu Kostenreduktionen im Gezeitenkraftsektor, die in der Vergangenheit aufgetreten sind.

---

#### 5.2.4. Entwicklung der Stromgestehungskosten von Wellenkraftanlagen von 2010 – 2017

Auch im Wellenkraftsektor existieren zahlreiche Aussagen zu den aktuellen Stromgestehungskosten, die zum Teil stark voneinander abweichen. Mögliche Ursachen hierfür werden in Kapitel 6 erläutert. Die als am zuverlässigsten betrachteten Werte sind im Folgenden aufgeführt. Als Auswahlkriterien für die Belastbarkeit wurden hier eine ungefähre Übereinstimmung mit anderen Quellen sowie eine nachvollziehbare Argumentation der Quellen gewählt.

- (Magagna und Uihlein 2015): 500 – 650 €/MWh (entspricht 58 – 70 ¢/kWh)
- (Astariz, Vazquez und Iglesias 2015): 325 €/MWh (entspricht 38 ¢/kWh)
- (World Energy Council 2016): 50 ¢/kWh

Vergleicht man die Werte mit den Zahlen aus Abbildung 23, so wird deutlich, dass sie sich in einer ähnlichen Größenordnung bewegen. Die Kosten für Wind- und Wellenkraftanlagen waren somit in der Frühphase der kommerziellen Nutzung vergleichbar. Allerdings werden genau wie bei der Gezeitenenergie von keiner der gefundenen Quellen Angaben zu Kostensenkungen für Wellenkraftanlagen gemacht. Eine ansatzweise lineare Kostenreduktion, wie bei Windkraftanlagen oder gar eine feste Gesetzmäßigkeit zwischen installierter Leistung und Stromgestehungskosten, wie bei Photovoltaikanlagen, konnte bisher für den Wellenenergiesektor nicht ermittelt werden.

Zwischen der Gezeitenenergie und der Wellenenergie sind somit deutliche parallelen zu erkennen. Beide bewegen sich in Bezug auf die Stromgestehungskosten zumindest in einer ähnlichen Größenordnung, wobei die Kosten für Wellenkraftanlagen insgesamt etwas höher ermittelt wurden. Eine Kostenreduktion konnte bisher in beiden Fällen noch nicht beobachtet werden, wird allerdings für die Zukunft von zahlreichen Quellen prognostiziert (z.B. (Astariz, Vazquez und Iglesias 2015) & (Pecher 2017))

## 6. Kostenfaktoren für die Stromerzeugung aus Wellenkraft

Die Kostenreduktion der Stromgestehungskosten von Wellenkraftanlagen stellt eine Grundvoraussetzung für die Erreichung der Marktreife der Technologien dar. Im vorangegangenen Kapitel hat sich jedoch gezeigt, dass eine Kostenreduktion, wie sie bei anderen regenerativen Energieträgern zu beobachten war, bisher noch nicht aufgetreten ist. Ausgehend von den im vorigen Kapitel erzielten Ergebnissen, soll deshalb untersucht werden, welche Faktoren einen Einfluss auf die Preisentwicklung von Wellenkraftanlagen haben können.

### 6.1. Art des Wellenkraftwandlers

Die stark unterschiedlichen Angaben für die Stromgestehungskosten sind auf mehrere Ursachen zurückzuführen. (Jenne, Yu und Neary 2015) zeigen beispielsweise, dass die Kosten stark mit der Anzahl der installierten Wellenkraftwandler korrelieren. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse für drei Referenzmodelle (RM) dargestellt. Untersucht wurden jeweils die möglichen Stromgestehungskosten beim gleichzeitigen Betrieb von einer, 10, 50 und 100 Anlagen.

Tabelle 7 Stromgestehungskosten von drei Referenzmodellen in Abhängigkeit von der Anlagenanzahl, angepasst nach (Jenne, Yu und Neary 2015)

	RM 3	RM 5	RM 6
Annahme Wirkungsgrad	0,3	0,3	0,3
Annahme Leistung	286 kW	360 kW	370 kW
Stromgestehungskosten für eine Anlage	436 ¢/kWh	359 ¢/kWh	479 ¢/kWh
Stromgestehungskosten für 10 Anlagen	141 ¢/kWh	144 ¢/kWh	198 ¢/kWh
Stromgestehungskosten für 50 Anlagen	83 ¢/kWh	77 ¢/kWh	120 ¢/kWh
Stromgestehungskosten für 100 Anlagen in	73 ¢/kWh	69 ¢/kWh	106 ¢/kWh

Als Referenzmodelle wurden als RM3 ein Pointabsorber, als RM5 ein OWSC und als RM6 ein OWC verwendet, welche alle unter den gleichen Bedingungen getestet wurden. Bei den Referenzmodellen 1, 2 & 4 handelt es sich um Gezeitenkraftanlagen, die für diese Ausarbeitung nicht von Interesse sind. Anhand von Tabelle 7 zeigt sich zunächst, dass die Stromgestehungskosten für unterschiedliche Arten von Wellenkraftwandlern bei gleichen Standortbedingungen deutlich unterschiedlich ausfallen. So liegen die Werte für das RM6 (OWC) stets deutlich oberhalb der Werte für RM3 (Pointabsorber) und RM5 (OWSC). Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die spezifischen Kosten bei einem anders gewählten Standort anders ausfallen könnten.

### 6.2. Anzahl der Wellenkraftwandler

Es zeigt sich an den Ergebnissen aus Tabelle 7 außerdem, dass durch den Verbund mehrerer WECs (engl. für Wave Energy Converter) die Kosten für die Stromerzeugung signifikant reduziert werden können. Bei der Installation von 10 gleichen Einheiten wurden die Kosten beim RM 3 mehr als gedrit-

telt, und auch in den anderen beiden Fällen mehr als halbiert. Beim Schritt von 10 zu 50 Anlagen, fand erneut eine Kostenreduktion um etwa die Hälfte statt. Auffällig ist, dass die Kostenunterschiede zwischen dem Betrieb einer einzelnen und 100 Anlagen für alle drei Referenzmodelle sehr ähnlich ausfallen. Die Kostenreduktion lag beim RM3 bei 83%, beim RM5 bei 81% und beim RM6 bei 75%.

In den Abbildung 25 & Abbildung 26 ist die Zusammensetzung der Stromgestehungskosten für eine einzeln betriebene Anlage und einen Verbund von 100 Anlagen des RM 5 dargestellt. In Tabelle 8 sind die einzelnen Kostenanteile in ¢/kWh dargestellt. Die Werte zeigen sehr deutlich, dass beim Betrieb von mehreren gekoppelten Anlagen alle Kostenanteile gesenkt werden können, wobei die Einsparpotentiale der einzelnen Anteile sich stark voneinander unterscheiden. Die größten Kostensenkungsmöglichkeiten bestehen demnach bei der Entwicklung, der Installation, den Materialkosten, den Risikozuschlägen und den Betriebskosten.

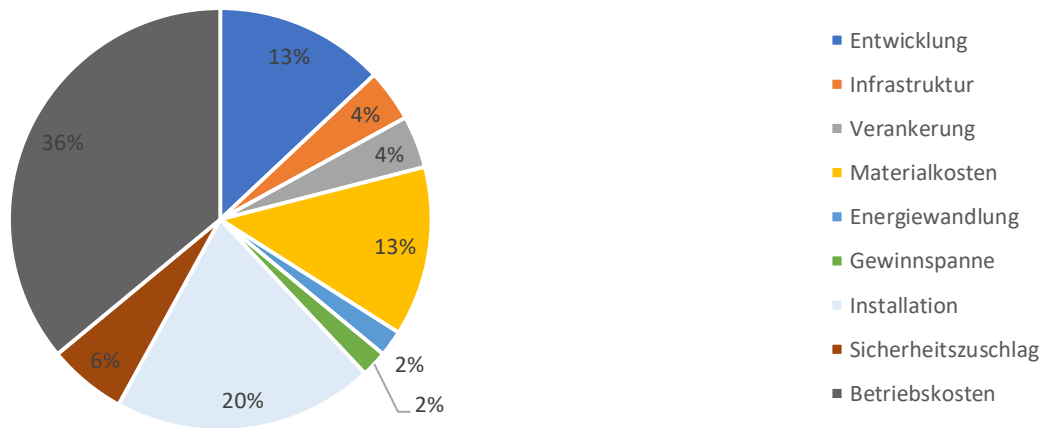


Abbildung 25 Zusammensetzung der Stromgestehungskosten des RM 5 für ein einzelnes Modell, angepasst nach (Jenne, Yu und Neary 2015)

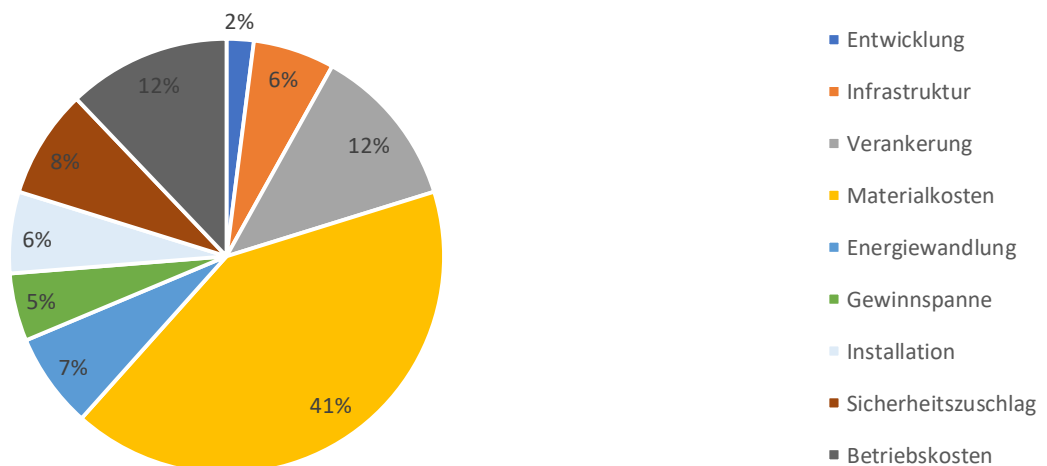


Abbildung 26 Zusammensetzung der Stromgestehungskosten des RM 5 für 100 gekoppelten Modelle, angepasst nach (Jenne, Yu und Neary 2015)

Vergleicht man die Daten aus Abbildung 25 & Abbildung 26, so zeigt sich, dass der Anteil an fortlaufenden Kosten (Forschung & Entwicklung, Gewinnspanne, Risikobewältigung und Betriebskosten) mit 57% beim Betrieb einer einzelnen Anlage relativ hoch ausfällt. Im Fall von 100 parallel arbeitenden Wellenkraftwandlern liegt der Anteil der fortlaufenden Kosten nur noch bei 27% und hat sich demnach mehr als halbiert. Durch den Verbund mehrerer Anlagen steigt demnach der prozentuale Anteil an einmaligen Kosten (Infrastruktur, Verankerung, Materialkosten, Energiewandlung und Installation) von 43% auf etwa 73%.

Tabelle 8 Kostenverteilung der Stromgestehungskosten für RM5, bei einer Einheit und 100 Einheiten, eigene Darstellung nach (Jenne, Yu und Neary 2015)

	Entwick- lung	Infrastruk- tur	Veranke- rung	Material- kosten	Energie- wandlung	Gewinn- spanne	Installati- on	Sicherheits- zuschlag	Betriebs- kosten	$\Sigma$
1 Einheit	47 ¢/kWh	14 ¢/kWh	14 ¢/kWh	47 ¢/kWh	7 ¢/kWh	7 ¢/kWh	72 ¢/kWh	22 ¢/kWh	129 ¢/kWh	359 ¢/kWh
100 Ein- heiten	1 ¢/kWh	4 ¢/kWh	9 ¢/kWh	29 ¢/kWh	5 ¢/kWh	3 ¢/kWh	4 ¢/kWh	6 ¢/kWh	8 ¢/kWh	69 ¢/kWh
Kostenre- duktion	98%	71%	36%	38%	29%	57%	94%	72%	94%	81%

Die Entwicklungskosten bleiben unabhängig von der Menge der eingesetzten Anlagen relativ konstant, verteilen sich allerdings auf eine deutlich höhere Stromproduktion, sodass der Anteil an den Stromgestehungskosten deutlich gesenkt werden kann. Gleiches gilt für den Arbeitseinsatz zur Installation der Anlagen. Dieser ist vermutlich mit hohen Fixkosten verbunden, wie beispielsweise für das Mieten von Transportschiffen oder den Anschluss an das Stromnetz. Der variable Kostenanteil für zusätzliche Anlagen ist nach Tabelle 8 offensichtlich sehr gering. Bauteile für einzelne Anlagen müssen oft maßangefertigt werden, was mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Im Falle eines Kraftwerksparks von mehreren gekoppelten Anlagen könnten durch eine Massenproduktion der Bauteile die Kosten erheblich gesenkt werden, wodurch das Einsparpotential im Bereich „Materialkosten“ zu erklären ist.

Der Risikoanteil bezeichnet diejenigen Kosten, die entstehen, um beispielsweise den Ausfall oder Stillstand einer Anlage zu kompensieren. Bei einzelnen Anlagen würde eine Beschädigung zu einer vollständigen Unterbrechung der Stromproduktion führen, wohingegen sie mit steigender Anzahl der Anlagen immer weniger ins Gewicht fallen wird. Der Betrieb von einzelnen Anlagen kann außerdem zu stark variierender Produktion führen, was im Umkehrschluss auch zu schwankenden Einnahmen führen würde. Durch den Betrieb mehrerer Anlagen können sich die Leistungsschwankungen der einzelnen Modelle untereinander ausgleichen, was zu einer deutlich gleichmäßigeren Energieproduktion und besseren Vorhersagbarkeit führt. Aus den genannten Gründen können auch die Kosten für die Risikobewältigung im Verbundbetrieb deutlich niedriger angesetzt werden. Die Betriebskosten stellen das mit Abstand größte Einsparpotential dar. Sie beinhalten nach (Dalton, Alcorn und Lews 2010) unter anderem Kosten für Betrieb und Überwachung, Versicherungskosten und Kosten für Instandsetzung und für Austausch von Anlagen. Auch die Wartung von Anlagen ist vermutlich mit sehr hohen Fixkosten verbunden, die sich beim Betrieb mehrerer Anlagen auf diese verteilen und somit Einsparpo-

tentiale bieten. Hierzu zählen beispielsweise die Kosten für Ausrüstung (Schiff und bemannte/unbemannte Unterwasserfahrzeuge) oder die Sammlung, Übermittlung und Verarbeitung von Betriebsdaten.

### 6.3. Wahl des Standortes

Getestet wurden die Referenzmodelle unter Laborbedingungen, welche dem geplanten Einsatzort vor der kalifornischen Küste bei Eureka nachempfunden wurden. Die durchschnittliche Leistung am gewählten Standort wird von (Barstow, et al. 2011) mit 38 kW/m angegeben. Zu beachten ist, dass es sich hierbei um den Jahresdurchschnittswert handelt. Wie an anderen Standorten auch, unterscheiden sich die Werte je nach Jahreszeit und Wetter sehr stark voneinander. Der niedrigste Wert wird im vorliegenden Fall im Sommerquartal mit durchschnittlich 15 kW/m erreicht, während der höchste Wert im Winterquartal bei 66 kW/m liegt. Eine Ressource von 38 kW/m liegt deutlich unterhalb der Werte, die beispielsweise an der europäischen Atlantikküste erreicht werden (Schlütter, Petersen und Nyborg 2015). In Tabelle 9 werden die in Kapitel 6.1 ermittelten Stromgestehungskosten für die Referenzmodelle 3, 5 und 6 mit den ermittelten durchschnittlichen Stromgestehungskosten von Wellenkraftanlagen aus Kapitel 5.2.4 (grau hinterlegt) verglichen.

Tabelle 9 Vergleich der ermittelten Stromgestehungskosten der Referenzmodelle 3, 5 & 6 mit den durchschnittlichen Stromgestehungskosten der Wellenkraftbranche

Durchschnittliche Stromgestehungskosten (Magagna und Uihlein 2015)	58 – 70 ¢/kWh
Durchschnittliche Stromgestehungskosten (Astariz, Vazquez und Iglesias 2015)	38 ¢/kWh
Durchschnittliche Stromgestehungskosten (World Energy Council 2016):	50 ¢/kWh
Durchschnittliche Stromgestehungskosten RM 3, eine Anlage	436 ¢/kWh
Durchschnittliche Stromgestehungskosten RM 3, 100 Anlagen	73 ¢/kWh
Durchschnittliche Stromgestehungskosten RM 5, eine Anlage	359 ¢/kWh
Durchschnittliche Stromgestehungskosten RM 5, 100 Anlagen	69 ¢/kWh
Durchschnittliche Stromgestehungskosten RM 6, eine Anlage	479 ¢/kWh
Durchschnittliche Stromgestehungskosten RM 6, 100 Anlagen	106 ¢/kWh

Es fällt auf, dass die Stromgestehungskosten der Referenzmodelle zum größten Teil deutlich außerhalb (rot hinterlegt) des in Kapitel 5.2.4 ermittelten Bereichs liegen. Für eine einzelne Anlage des Referenzmodells 6, liegen die Kosten bei 479 ¢/kWh, was mehr als dem Siebenfachen der von (Magagna und Uihlein 2015) genannten Werte entspricht. Selbst der niedrigste, in Tabelle 7 genannte Wert (100 Einheiten des RM5, grün hinterlegt), liegt mit 69 ¢/kWh gerade an der Obergrenze des in Kapitel 5.2.4 ermittelten Wertebereichs. Die unterschiedlichen Werte könnten u.a. auf die verschiedenen Standortbedingungen zurückzuführen sein. Die Stromgestehungskosten bei der gewählten Beispielanlage bei Eureka könnten deshalb u.a. darum so hoch liegen, weil die vorhandene Leistung relativ gering ist, allerdings sind die Schwankungen zwischen Sommer und Winter relativ hoch ausgefallen. Je bessere und gleichmäßigere Bedingungen zur Wellenkrafterzeugung an einem Standort herrschen, desto ge-

---

ringer sind auch die Stromgestehungskosten. Anforderungen, die an einen geeigneten Standort bestehen und mit denen die Kosten zur Stromerzeugung variieren können, sind nach (Pecher 2017) u.a.:

- Eine hohe durchschnittliche Leistung je Meter Wellenfront
- Eine hohe Wellensteilheit, möglichst  $> 0,015$ . Hierdurch kann der Wirkungsgrad der Anlage signifikant erhöht werden.
- Eine möglichst geringe Differenz zwischen maximaler- und durchschnittlicher Wellenhöhe. Wellenkraftanlagen werden in der Regel ausgelegt, um sogenannten Jahrhundertwellen widerstehen zu können, aber bei der durchschnittlich vorherrschenden Wellenhöhe Energie zu produzieren. Die geforderte Widerstandsfähigkeit gegen die größtmöglich auftretenden Wellen ist allerdings mit erhöhten Investitionskosten verbunden.
- Möglichst geringe jahreszeitliche Schwankungen der bereitgestellten Wellenenergie. Wellenenergieanlagen sind normalerweise auf den Betrieb bei bestimmten Wellenbedingungen optimiert, sodass bei anderen Bedingungen der Wirkungsgrad reduziert wird.
- Eine möglichst geringe Entfernung zur Küste, zur Netzinfrastruktur und zum Endverbraucher, da dadurch die Investitions- und Betriebskosten reduziert werden können.

#### **6.4. Leistung des Wellenkraftwandlers**

Von (Pecher 2017) wurden die Stromgestehungskosten für Wellenkraftwandler unterschiedlicher Leistung miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt. Untersucht wurden die Stromgestehungskosten (engl. LCoE für Levelized Cost of Electricity) für jeweils eine Wind- und eine Wellenkraftfarm mit je 25 Anlagen á 3,6 MW sowie einer Wellenkraftfarm mit 120 Anlagen á 0,75 MW. Angenommen wurde eine Lebensdauer von 20 Jahren, bei einem Wirkungsgrad von 30%. Die Faktoren „Balance of Plant“, „Development and consent“ sowie „Turbine / WEC“ bilden zusammen die Investitionsausgaben (engl. CapEx für Capital Expenditure). Da sich die Baukosten des eigentlichen Wellenkraftwandlers, je nach Bauart stark voneinander unterscheiden, wurden diese in Tabelle 10 als Unbekannte mit dem Wert X bezeichnet. Gleiches gilt für die Kategorie „Balance of plant“. Hierunter werden alle Komponenten zusammengefasst, welche zur Stromerzeugung notwendig sind, allerdings nicht direkt zur Energiewandlungsanlage gehören. Beispiele hierfür sind Transformatoren, Fundamente oder Kabel.

Die angegebenen Werte wurden anhand der Daten für Offshore-Windkraftanlagen berechnet. Da diese ebenfalls im Meer installiert werden und viele Arbeitsschritte sich auf Wellenkraftwandler übertragen lassen, ist es hier möglich, einen Vergleich zu ziehen (Pecher 2017). Hierzu zählen beispielsweise das Verlegen von Unterseekabeln oder die geophysikalischen und geotechnischen Voruntersuchungen. Die einzelnen Kostenanteile wurden anschließend noch für die Anwendung auf Wellenkraftanlagen entsprechend angepasst. So fallen zum Beispiel die Kosten für die geotechnischen Voruntersuchungen des Meeresbodens für Wellenkraftwandler deutlich niedriger aus, als für Windkraftanlagen, da letztere deutlich höheren Belastungen ausgesetzt sind und dementsprechend deutlich besser verankert werden müssen (Pecher 2017). Für die Betriebskosten (engl. OpEx für Operational Expenditure) einer Wellen-



kraftanlage wurde der gleiche Wert angenommen, wie für eine Offshore-Windkraftanlage gleicher Leistung. Dies wurde dadurch begründet, dass durch einige Eigenschaften von Wellenkraftanlagen die Betriebskosten erhöht werden, während sie durch andere Eigenschaften reduziert werden können. Zu den preissteigernden Eigenschaften zählt beispielsweise die Tatsache, dass bei einem Wellenkraftwandler im Gegensatz zur Windkraftanlage auch bewegliche Bauteile mit Salzwasser in Kontakt treten, wodurch der Verschleiß erhöht wird. Auf der anderen Seite können einige Bauarten von Wellenkraftanlagen für die Revision abgeschleppt und an Land gebracht werden, wodurch die Reparatur maßgeblich vereinfacht wird.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei den Zahlen lediglich um Schätzwerte handelt, die anhand der vergleichbaren Kosten für Offshore-Windkraftanlagen bestimmt wurden. Sie können somit bestenfalls als ungefähre Näherung betrachtet werden. In der Realität existiert noch keine Wellenkraftfarm einer vergleichbaren Größenordnung. Außerdem trifft (Pecher 2017) keinerlei Aussagen über die geltenden Standortbedingungen. Diese haben jedoch, wie in Kapitel 6.3 gezeigt, einen wesentlichen Einfluss auf die zu erwartenden Stromgestehungskosten.

Tabelle 10 Darstellung der Kosten für eine 90 MW-Farm, mit 25 \* 3,6 MW Windturbinen (links), 25 \* 3,6 MW WECs (Mitte) und 120 \* 0,75 MW WECs (rechts), (Pecher 2017)

Costs	3.6 MW Wind (k€)	3.6 MW WEC (k€)	0.75 MW WEC (k€)
Development and consent	649	588	271
Turbine/WEC	5281	X	X
Balance of plant	5929	2365 + X	594 + X
Installation and commissioning	4163	2219	1077
<b>Total CapEx</b>	<b>16022</b>	<b>5822 + X</b>	<b>1941 + X</b>
Annual OpEx	721	721	361
<b>Discounted OpEx (20 years)</b>	<b>6138</b>	<b>6138</b>	<b>3069</b>
Total (CapEx & OpEx) costs	22160	11960 + X	5010 + X
<i>Revenue</i>			
Approx. capacity factor (%)	30	30	20
Mean annual energy production (MWh)	9467	9467	1315
<b>Levelized cost of energy</b>	(€/kWh)	(€/kWh)	(€/kWh)
Base LCoE (without OpEx)	0.085	<b>0.031 + X</b>	<b>0.074 + X</b>
Total LCoE	<b>0.117</b>	<b>0.063 + X</b>	<b>0.191 + X</b>

Offensichtlich, wie in Tabelle 10, dargestellt können demnach durch die Verwendung leistungsstärkerer Anlagen die Stromgestehungskosten deutlich gesenkt werden. Diese errechnen sich nach der untenstehenden Formel (Pecher 2017):

$$LCoE = \frac{CapEx + OpEx_{Lebensdauer}}{Jährliche\ Stromerzeugung * Lebensdauer}$$

Formel X

In Abbildung 27 sind die Stromgestehungskosten der häufigsten regenerativen Energieträger nach Region zusammengetragen. Mithilfe der Werte aus Tabelle 10 wurde ein ungefährer Wertebereich für Wellenkraftwerke berechnet, der nach (Pecher 2017) bei einer kommerziell betriebenen Wellenkraftfarm zukünftig erreicht werden könnte. Hierfür wurden für die Werte X als Untergrenze (sehr optimistische Schätzung) jeweils die Hälfte der entsprechenden Kosten einer Windkraftanlage gewählt. Als Obergrenze wurden die jeweils 1,5-fachen Werte von Windkraftanlagen verwendet (eher konservative Schätzung). Der Wertebereich liegt demnach zwischen 9 ¢/kWh und 16 ¢/kWh. Beim Vergleich der Werte aus Tabelle 10 und Abbildung 27 zeigt sich zunächst, dass die von (Pecher 2017) berechneten Stromgestehungskosten für Offshore-Windkraftanlagen innerhalb des von (IRENA 2018) für Offshore-Windkraft in Europa ermittelten Bereichs liegen. Die beiden Quellen stimmen demnach bezüglich ihrer Abschätzungen in etwa überein.

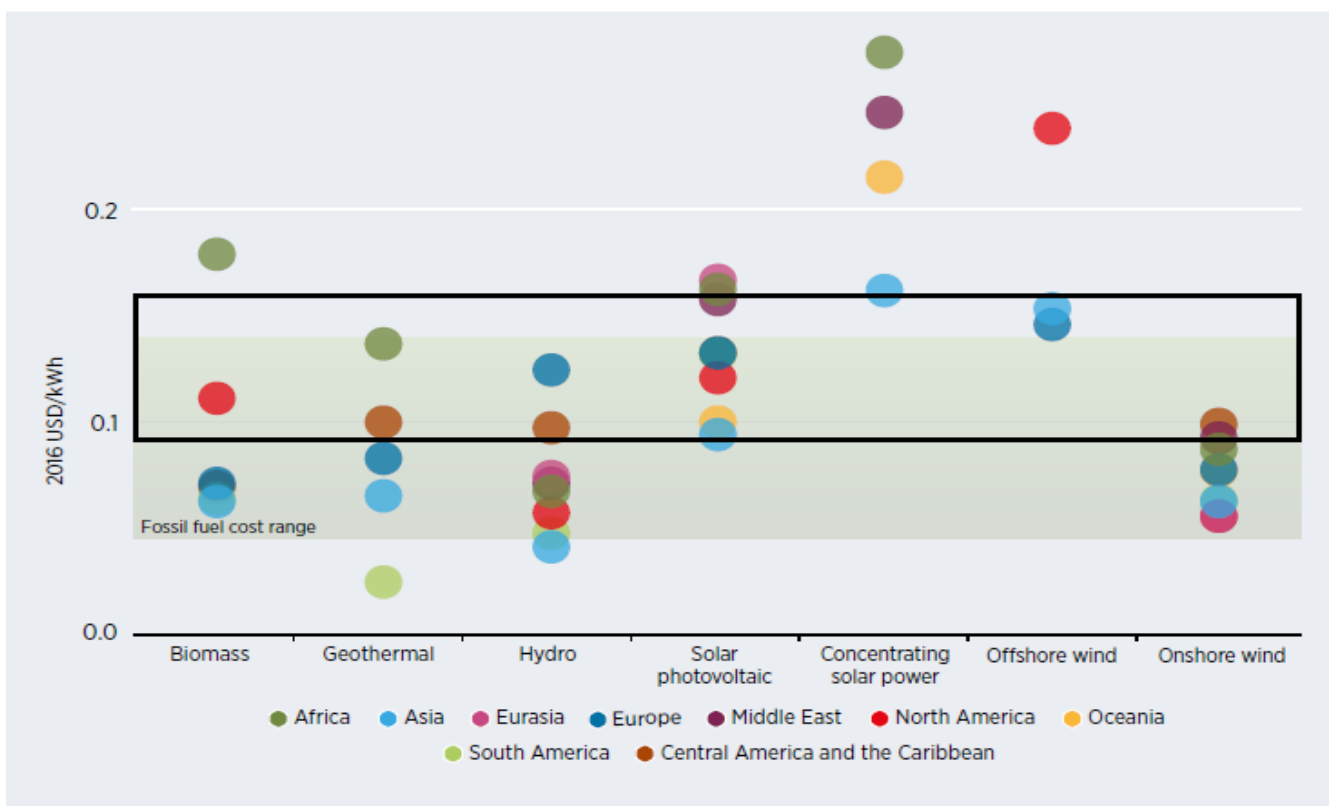


Abbildung 27 Durchschnittliche Stromgestehungskosten nach Energieträger und Region, angepasst nach (IRENA 2018)

Der potentielle Wertebereich für eine wirtschaftlich betriebene Wellenkraftfarm (zwischen 9 und 16 ¢/kWh) wird durch den schwarz umrandeten Bereich dargestellt. Demnach liegen die möglichen Kosten für Wellenkraftanlagen in einem ähnlichen Bereich, wie die für andere regenerative Energieträger. So liegen die durchschnittlichen europäischen Stromgestehungskosten für Wasserkraft, Photovoltaik und Offshore-Windkraft alle innerhalb des ermittelten Bereichs. Es zeigt sich außerdem, dass die Kosten für Biomasse, Geothermie, Onshore-Windkraft und die konventionellen Energieträger niedriger ausfallen, als die kleinstmöglichen ermittelten Kosten für Wellenkraft.

---

## 6.5. Fazit Kapitel 6

Zu den wesentlichen Einflussfaktoren auf die Kosten für die Stromerzeugung aus Wellenkraft zählen die Wahl der Technologie, die Anzahl und Leistungsfähigkeit der betriebenen Wellenkraftwandler und die Standortbedingungen. Durch all diese Parameter bestehen zukünftig Einsparpotentiale, durch die die Stromgestehungskosten voraussichtlich deutlich gesenkt werden können. Dies stellt eine Grundvoraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit der Technologie dar. Es hat sich gezeigt, dass Wellenkraftanlagen zukünftig durchaus in der Lage sein können, zu ähnlichen Kosten Strom zu produzieren, wie andere erneuerbare Energieträger. Dies könnte durch geeignete Subventionen, wie beispielsweise Einspeisevergütungen noch einmal zusätzlich begünstigt werden. Zu berücksichtigen ist allerdings noch, dass die ermittelten Kostenfaktoren sich auch gegenseitig beeinflussen können. Die Wahl des Standortes kann auf unterschiedliche Arten von Wellenkraftwandlern unterschiedliche Kostenauswirkungen haben. Ebenso kann bei einem Kraftwerksprojekt mit zuvor festgelegter Leistung sowohl die Anzahl, als auch die Leistungsfähigkeit der Anlagen variiert werden. Beides hat jedoch wesentlichen Einfluss auf die entstehenden Kosten. Somit muss vermutlich immer im Einzelfall entschieden werden, welcher der ermittelten Faktoren wie hoch zu gewichten ist.

---

## 7. Zukunftskonzept Wellenenergie

---

In diesem Kapitel soll anhand der zuvor gesammelten Erkenntnisse ein Handlungskonzept für den europäischen Raum entwickelt werden. Dieses soll Handlungsempfehlungen geben, um einen kommerziellen Ausbau der Wellenenergie zu ermöglichen. Zunächst soll hierfür die Entwicklung unterschiedlicher Wellenkraftanlagen anhand des Technologie-Reifegrades untersucht werden, um darauf aufbauend eine Abschätzung über den aktuellen technologischen Stand treffen zu können. Im Anschluss daran sollen wesentliche Einflussfaktoren auf die Umsetzung von Wellenkraftprojekten sowie Ursachen für das Scheitern vergangener Projekte identifiziert werden. Mit den gewonnenen Ergebnissen soll anschließend eine SWOT-Analyse (siehe Kapitel 7.4) des gesamten europäischen Wellenkraftsektors durchgeführt werden, um daraus mögliche Handlungsstrategien abzuleiten. In einem letzten Schritt sollen dann die Ergebnisse zusammengefasst werden, indem wesentliche Akteure für die Weiterentwicklung der Wellenkraft in Europa identifiziert und Handlungsempfehlungen für diese erarbeitet werden.

### 7.1. Der Technologie-Reifegrad

Der Technologie-Reifegrad (engl. Technology Readiness Level, TRL) bezeichnet eine Skala, welche den aktuellen Entwicklungsstand von neuen Technologien bewertet. Die Skala kann in neun Stufen unterteilt werden (McGarvey, et al. 2009).

TRL 1: Untersuchung und Beschreibung des Funktionsprinzips

TRL 2: Konzepte zur Anwendung der Technologie

TRL 3: Nachweis über die Funktionsfähigkeit der Technologie

TRL 4: Laboruntersuchungen an Einzelkomponenten oder dem Gesamtsystem

TRL 5: Untersuchung von Einzelkomponenten oder dem Gesamtsystem in vereinfachter oder simulierter Einsatzumgebung

TRL 6: Untersuchungen am Prototyp in vereinfachter oder simulierter Einsatzumgebung

TRL 7: Untersuchungen am Prototyp unter realen Einsatzbedingungen

TRL 8: Nachweis der Funktionsfähigkeit unter realen Einsatzbedingungen

TRL 9: Marktfähigkeit der Technologie

Vom EMEC wurde die Entwicklung von marinen Energieerzeugungstechnologien von der Idee bis zur Einführung einer marktreifen Technologie in fünf Phasen unterteilt, welche sich an den neun Technologie-Reifegraden orientieren und Tabelle 11 entnommen werden können.

Tabelle 11 Entwicklungsphasen des Technologie-Reifegrades, angepasst nach (EMEC 2018)

Konzeptvalidierung	Designvalidierung	Freiwasseruntersuchung	Vorkommerzielle Projekte	Wirtschaftliche Validierung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung und Validierung des Grundkonzepts im Wellenkanal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung von Teilsysteme im verkleinerten Maßstab</li> <li>• Nachgewiesene Fähigkeit zur Energiegewinnung</li> <li>• Untersuchungen anhand von numerischen Modellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung kleinskaliger Anlagen im Freiwasser</li> <li>• Untersuchung von Teilsystemen in Originalgröße</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung an maßstabsgetreuen Prototypen unter Freiwasserbedingungen</li> <li>• Bestätigung der Fähigkeit zur Einspeisung ins Stromnetz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betrieb mehrerer maßstabsgetreuer Anlagen unter Freiwasserbedingungen für einen längeren Zeitraum</li> <li>• Massenproduktion einzelner Komponenten oder Anlagen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• TRL 1 – 3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TRL 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TRL 5 - 6</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TRL 7 – 8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TRL 9</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beispiele: --- (Abgeschlossen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beispiele: --- (Abgeschossen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beispiele: Wavedragon, Wavestar, Wave-Roller</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beispiele: Archimedes Wave Swing, Oyster800, Mutriku-OWC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beispiele: --- (Noch nicht erreicht)</li> </ul>

Von (Mascarenhas, et al. 2015) wurden die unterschiedlichen Technologie-Reifegrade der bekannten Wellenkraftprojekte untersucht. In Tabelle 12 & Tabelle 13 sind jeweils die Anzahl der dokumentierten Wellenkraftprojekte nach Technologie und nach TRL dargestellt. Tabelle 12 berücksichtigt nur die bestätigten Werte während Tabelle 13 ebenfalls die Projekte umfasst, für die aufgrund von mangelhafter Dokumentation eine Abschätzung getroffen werden musste.

Tabelle 12 Anzahl der Wellenkraftwandler nach Technologie-Reifegrad (nur bestätigte Werte), angepasst nach (Mascarenhas, et al. 2015)

	TRL 1 – 4	TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9	TRL Ø
Attenuator	–	2	1	1	–	–	5,8
Pointabsorber	–	7	9	1	–	–	5,6
OWSC	–	1	2	–	–	–	5,7
OWC	–	–	1	2	1	–	7
Overtopping	–	1	–	–	–	–	5
Rotating Mass	–	–	–	1	–	–	7
Σ	–	11	13	5	1	–	5,9

Tabelle 13 Verteilung der Wellenkraftwandler nach Technologie-Reifegrad (bestätigte und geschätzte Werte), angepasst nach (Mascarenhas, et al. 2015)

	TRL 1 – 4	TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9	TRL Ø
Attenuator	–	2	1	1	–	–	5,8
Pointabsorber	–	9	12	3	–	–	5,8
OWSC	–	1	3	2	1	–	6,4
OWC	–	1	1	4	1	–	6,7
SPD	–	2	1	–	–	–	5,3
Overtopping	–	1	–	–	–	–	5
Rotating Mass	–	2	1	1	–	–	5,8
Sonstige	–	2	1	–	–	–	5,3
Σ	–	20	20	11	2	–	5,9

Es zeigt sich, dass die Reifegrade der einzelnen Technologien sehr ähnlich ausfallen und durchweg zwischen den Werten 5 & 8 liegen. Die durchschnittlich höchsten Reifegrade wurden in Tabelle 12 von Rotating Masses und OWCs und Tabelle 13 von OWSCs sowie OWCs erreicht. Aufgrund der sehr kleinen Stichprobe an Rotating Masses im ersten Fall, ist das Ergebnis allerdings wenig aussagekräftig. Interessant ist jedoch, dass der durchschnittliche Reifegrad von Pointabsorbern in beiden Fällen unterhalb des Gesamtdurchschnittes liegt. Pointabsorber sind die mit großem Abstand häufigste Form von Wellenkraftanlagen, weisen jedoch trotzdem in der technologischen Entwicklung einen Rückstand gegenüber anderen Formen von Wellenkraftwandlern auf. Ebenfalls zeigt sich, dass offensichtlich noch keine einzige Technologie die Marktreife erlangt hat, was die Ergebnisse aus Kapitel 4 bestätigt. In diesem Kapitel soll nun weiterhin untersucht werden, wie die Erreichung der Marktreife der Technologien vorangetrieben werden kann.

## 7.2. Wesentliche Einflussfaktoren für Wellenkraftprojekte

Im nächsten Schritt sollen Faktoren ermittelt werden, welche zu einer wachsenden Wettbewerbsfähigkeit von Wellenkraftwerken beitragen oder diese behindern können. Zahlreiche dieser Faktoren wurden von (Karagozi und Parker 2016) in einer empirischen Studie zusammengetragen. Hierzu wurden Wellenkraftentwickler im Rahmen von strukturierten Interviews dazu aufgefordert, Aspekte zu identifizieren, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Umsetzung ihrer Projekte hatten. Die Gewichtung und Vernetzung der einzelnen Faktoren fallen je nach betrachtetem Land deutlich unterschiedlich aus. Im Folgenden soll auf einige der am häufigsten genannten näher eingegangen werden.

- **Erschwinglichkeit der Technologie:** Die Erschwinglichkeit bezeichnet die Gesamtheit der Investitions- und Betriebskosten von der Entwicklung, bis zum Rückbau der Anlage. Projekte, wie der Pelamis Wave Energy Converter scheiterten an den, im Vergleich zu anderen Energieträgern, zu hohen Kosten. Daraus entwickelte sich eine gewisse Skepsis und Zurückhaltung in Bezug auf Investitionen im Wellenenergiesektor.

- 
- **Supply Chain Management:** Unter Supply Chain Management wird die physische Infrastruktur des Wellenenergiesektors zusammengefasst. Diese beinhaltet unter anderem Entwicklung, Transport, Testanlagen und Netzanschlüsse.
  - **Zusammenarbeit:** Der Austausch von Informationen zwischen unterschiedlichen Entwicklern, Forschungseinrichtungen und anderen Stakeholdern. Dieser Austausch kann sowohl mit, als auch ohne finanziellen Ausgleich durchgeführt werden. Da sich jedoch Wellenkraftanlagen noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden und ein starker Wettbewerb herrscht, sind viele Entwickler nicht bereit, ihr geistiges Eigentum mit anderen Marktteilnehmern zu teilen (Karagjozi und Parker 2016). Eine Möglichkeit zum Datenaustausch stellen Einrichtungen wie das EMEC dar, die als Projektmanager Entwicklern die Möglichkeit bieten, Ihre Prototypen zu testen und gleichzeitig die gesammelten Daten anderen Marktteilnehmern zur Verfügung stellen.
  - **Kommunikation:** Wissensaustausch zwischen den einzelnen Teilbereichen des Wellenenergiesektors. Obwohl zahlreiche Stakeholder (Entwickler, Energieversorger, Netzbetreiber, Umweltschützer) über große Expertisen in ihren jeweiligen Teilsektoren verfügen, fehlt oft das Verständnis für die Perspektiven und Prioritäten anderer Marktteilnehmer. Eine gute Kommunikation der einzelnen Stakeholder untereinander ist für einen integrierten Ansatz zur Förderung der Wellenkraftnutzung unerlässlich.
  - **Anlagenleistung:** Die Fähigkeit einer Anlage, kontinuierlich Energie zu wettbewerbsfähigen Preisen zu generieren.
  - **Anlagenbeständigkeit:** Die marine Umgebung sorgt für hohe Belastungen. Die Überlebensfähigkeit von Anlagen stellt somit eine wichtige Voraussetzung für eine Marktfähigkeit dar.
  - **Umweltaktivismus:** Verschiedene Umweltaspekte haben in der Vergangenheit bereits mehrfach die Entwicklung oder Umsetzung von Wellenkraftprojekten verzögert, bzw. verhindert (siehe Kapitel 7.3). Der Widerstand war oft auf mangelnde Informationsbereitstellung zurückzuführen. Dieser Punkt ist somit sehr dicht mit dem Unterpunkt „Kommunikation“ verbunden.
  - **Die Europäische Union:** Die EU wird aufgrund ihrer Gesetzgebungskompetenz und zahlreicher (finanzieller) Förderprogramme als wichtige Stütze bei der Einführung neuer Technologien betrachtet. Die Unterstützung einzelner Projekte, bzw. Technologien durch die EU setzt allerdings eine Informationsbereitstellung seitens der Entwickler voraus, was von vielen noch abgelehnt wird (Karagjozi und Parker 2016).
  - **Finanzierung:** Als Technologie im frühen Entwicklungsstadium ist die Wellenenergie auf hohe Investitionen angewiesen. Die Vergangenheit hat jedoch gezeigt, dass eine Investition im Wel-

---

lenkraftsektor mit einem hohen Risiko verbunden ist, da zahlreiche Projekte scheiterten. Durch die große Uneinigkeit am Markt, über Potential und Nutzungsmöglichkeiten der Wellenenergie, hat die Branche noch immer mit großen Finanzierungsproblemen zu kämpfen. Nach (Karagjozi und Parker 2016) fielen die für Wellenenergie aufgebrauchten finanziellen Mittel in der Vergangenheit deutlich niedriger aus, als bei anderen regenerativen oder sogar fossilen Energieträgern (Neslen 2017). Ohne eine zuverlässige Finanzierung für Forschung und Entwicklung scheint eine Kostensenkung in der Wellenenergiebranche und damit verbunden ein Rückgang des Investmentrisikos allerdings unwahrscheinlich.

- **Fossile Brennstoffe und Kernenergie als Wettbewerber:** Regenerative Energieträger müssen sich am Markt gegen konventionelle Energieträger durchsetzen können. Diese profitieren jedoch in einigen Ländern, wie beispielsweise Großbritannien, deutlich höherer von staatlicher Unterstützung, als regenerative Energien (Neslen 2017). Da konventionelle Kraftwerke bereits zu sehr niedrigen laufenden Kosten Energie produzieren, sind die Anreize zur Förderung neuer Energieträger wie der Wellenkraft gering. Dies könnte durch gezielte finanzielle Anreize, wie Subventionen oder Einspeisevergütungen reduziert werden.
- **Synergieeffekte mit regenerativen Energieträgern:** Genau wie Solar- und Windenergie ist Wellenenergie ein dargebotsabhängiger Energieträger. Allerdings fallen die Erzeugungsspitzen oft auf andere Zeitpunkte, als die von Photovoltaik oder Windkraft (siehe Kapitel 6.3), sodass die Schwankungen in der Erzeugung teilweise ausgeglichen werden könnten. Hinzu kommt, dass die Produktion aus Wellenenergie deutlich besser und länger vorhersagbar ist, als bei anderen fluktuierenden Erzeugern (Girard, Laquaine und Kariniotakis 2013). Es zeigt sich somit, dass Wellenenergie und andere emissionsfreie Energieträger sich gegenseitig sehr gut ergänzen könnten. Ein weiterer Synergieeffekt besteht mit der Offshore-Windkraft. Durch deren zunehmende Nutzung wird gleichzeitig der Ausbau der Netzinfrastruktur in Küstennähe und der Ausbau von Übertragungsleitungen zu den Verbraucherzentren vorangetrieben. Beides sind ebenfalls wichtig Voraussetzung für eine großflächige Nutzung der Wellenenergie.
- **Standortbedingungen:** Die Nutzbarkeit von marinen Kraftwerken ist mehr als jeder andere Energieträger standortgebunden. Hierzu zählt zum Beispiel die reine Ressourcenverfügbarkeit, welche global sehr unterschiedlich verteilt ist. Hinzu kommen ggf. geophysikalische Standortbedingungen, welche darüber entscheiden, ob eine Ressource technologisch, ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll nutzbar ist. Auch die Erschließbarkeit und Entfernung zum Verbraucher können hier eine wichtige Rolle spielen.
- **Marktansatz:** Je nach Land unterscheidet sich der Marktansatz zur Förderung der Wellenenergie. Dies soll am Beispiel von Schweden und Schottland erläutert werden. In Schottland wurde nach der Insolvenz von Pelamis Wave Power das WES (Wave Energy Scotland) eingerichtet. Diese Organisation bietet Entwicklern von Wellenkraftwerken eine Möglichkeit zum Testen und



---

Weiterentwickeln ihrer Anlagen, ebenso wie zum Informationsaustausch sowie zum Eintreiben von Fördermitteln. Erklärtes Ziel des WES ist die Weiterentwicklung von Wellenkraftwerken zur Marktreife zur Nutzung der schottischen Wellenenergieressourcen (Wave Energy Scotland 2018). Eine Fokussierung auf einzelne Arten von Wellenkraftwandlern besteht nicht. Im Gegensatz hierzu ist in Schweden eine Tendenz zu Kooperationen zwischen einzelnen Entwicklern zu beobachten. Ein Schwerpunkt bei der Entwicklung in Schweden liegt klar auf Pointabsorbern (Karagjozi und Parker 2016). Da im Vergleich zu Schottland die verfügbaren Wellenressourcen eher als gering zu betrachten sind, entwickeln zahlreiche schwedische Unternehmen ihre Wellenkraftwandler als Exporte für den ausländischen Markt.

### 7.3. Ursachen für das Scheitern bisheriger Wellenkraftprojekte

Die langsame Weiterentwicklung des Wellenkraftsektors sowie die Zurückhaltung vieler Investoren, ist u.a. auf zahlreiche Fehlschläge in der Vergangenheit zurückzuführen, die zur Insolvenz vieler Entwickler führten (Europäische Kommission 2017). In einer von der Europäischen Kommission veröffentlichten Studie wurde ermittelt, dass etwa die Hälfte aller bisher registrierten Wellenkraftprojekte frühzeitig abgebrochen wurde. Die Zahl ist in etwa mit der Gezeitenenergiebranche vergleichbar, allerdings fand im Falle der Wellenkraftanlagen nur in den seltensten Fällen eine Informationsweitergabe statt (Europäische Kommission 2017). Aus diesem Grund ist es notwendig, die gemachten Fehler zunächst zu identifizieren sowie die notwendigen Lehren daraus zu ziehen. Dies erscheint jedoch nur mit einem kooperativen Ansatz möglich. In diesem Kapitel sollen Faktoren identifiziert werden, die in der Vergangenheit zum Scheitern von Wellenkraftprojekten führten. Dies wird im Folgenden eine wichtige Grundlage für das „Zukunftskonzept Wellenenergie“ bilden.

- **Zu kurze Modelllaufzeiten und konzeptionelle Mängel aufgrund von Zeit- und Kostendruck:**  
Das wahrscheinlich bekannteste Beispiel eines gescheiterten Wellenkraftprojektes war der vom schottischen Unternehmen Pelamis Wave Energy entwickelte Pelamis Wave Energy Converter (PWEC siehe Kapitel 3.2.6). Zunächst wurde zwischen 1998 und 2001 eine Reihe von Laboruntersuchungen und Modellierungen durchgeführt, bevor 2001 ein im Maßstab 1:7 verkleinerter Prototyp im Freiwassereinsatz getestet wurde. Bereits zwei Jahre später wurde ein maßstabsgetreuer Prototyp zunächst unter Laborbedingungen und anschließend auf offener See im EMEC getestet. 2008 ging die erste Wellenkraftfarm der Geschichte, bestehend aus drei maßstabsgetreuen PWEC vor der portugiesischen Küste in Betrieb. Bereits zwei Monate später mussten jedoch die Anlagen aufgrund zahlreicher technischer Probleme wieder außer Betrieb genommen werden. Zwar konnten die technischen Probleme mit dem PWEC der zweiten Generation behoben werden, aufgrund der hohen Kosten für die drei eingesetzten Anlagen und eines Rückgangs der Investitionen, musste die Firma einige Jahre darauf aber in die Insolvenz gehen (Europäische Kommission 2017).

Den bei der Wellenkraftfarm aufgetretenen Problemen, hätte vermutlich durch ausführlichere Voruntersuchungen vorgebeugt werden können. Es wurden bereits sehr früh Anlagen voller

---

Größe eingesetzt, die mit Kosten von je 3 Mio. € deutlich teurer waren, als kleinskalige Testanlagen und somit auch mit einem höheren Risiko behaftet waren. Zusätzlich dazu wurden die Freiwassertests lediglich unter den Standortbedingungen im EMEC durchgeführt. Für den Einsatz am eigentlichen Standort der Wellenkraftfarm wurden nur unzureichende oder gar keine Voruntersuchungen durchgeführt. Besonders hervorzuheben ist außerdem der gleichzeitige Einsatz von drei Anlagen gleicher Bauweise, welche zuvor nur unzureichend getestet wurden. Durch die Aneinanderreihung hoher, risikobehafteter Investitionen in der Frühphase der Entwicklung, war eine kontinuierliche und empirische Weiterentwicklung des Projektes über einen längeren Zeitraum nicht mehr möglich.

- **Zu optimistische Erwartungen in Bezug auf die maritimen Gegebenheiten:**

Es hat sich gezeigt, dass bei vielen Projekten die anfänglichen Abschätzungen sowohl der vorhandenen Ressourcen, als auch des zu erreichenden Wirkungsgrades deutlich zu hoch angesetzt waren. Ein sehr bekanntes Beispiel hierfür ist das 2011 in der spanischen Stadt Mutriku in Betrieb gegangene OWC-Kraftwerk (siehe Kapitel 3.2.1). Die Anlage besteht aus 16 OWC-Kammern, welche für eine Gesamtleistung von 300 KW ausgelegt waren. Die tatsächliche Produktion lag allerdings deutlich unterhalb dieses Wertes (Lynn 2014). Eine solche Überdimensionierung wird in den meisten Fällen zu einer Unwirtschaftlichkeit des Projektes führen und zukünftige Investoren abschrecken. Eine reine Abschätzung der verfügbaren Ressourcen ist demnach für konkrete Projekte nicht ausreichend. Vielmehr ist es notwendig, die Ressourcen über einen längeren Zeitraum mit hoher Auflösung zu erfassen und auszuwerten, um weitere vergleichbare Fehlschläge zu vermeiden.

Neben den Wellenbedingungen, wurden auch die geotechnischen Begebenheiten als Ursache für das Scheitern einiger Projekte identifiziert. Standorte, die bei der ersten oberflächlichen Untersuchung als geeignet für ein Wellenkraftwerk erklärt wurden, mussten anschließend nach einer zweiten, detaillierteren Überprüfung als ungeeignet eingestuft werden. Die dort geplanten Projekte mussten dementsprechend wieder verworfen werden (Europäische Kommission 2017).

- **Unklarheiten bezüglich ökologischer Einflüsse:**

Zahlreiche Investoren begründeten die Zurückhaltung bei Wellenkraftprojekten mit den Unsicherheiten bei den möglicherweise auftretenden Umwelteinwirkungen. Die Regelungen zum Umweltschutz bei marinen Kraftwerken ist zwar auf EU-Ebene geregelt, die konkrete Umsetzung in nationales Recht kann allerdings innerhalb der einzelnen Staaten voneinander abweichen (Europäische Kommission 2017). Hinzu kommt, dass die Prioritäten der lokalen Behörden je nach Standort stark unterschiedlich ausfallen können. Vor Projektbeginn sind am Standort umfassende ökologische Untersuchungen durchzuführen, die sehr kostenintensiv sind und zur Unzulässigkeit eines Projektes führen können. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Arten von Wellenkraftwandlern, sind auch die Auswirkungen auf die marine Umwelt zu großen Tei-

---

len noch unklar, da sie für jeden einzelnen Typ genau geprüft werden müssen. Aufgrund dieser großen Unsicherheiten sehen viele Investoren Wellenkraftprojekte bis heute als zu risikobehaftet an.

- **Fehlen von Lieferketten:**

Da bisher noch keine Wellenkraftwerke in größerem Umfang installiert wurden und eine solche Entwicklung bisher auch noch nicht absehbar ist, hat sich bis heute keine Fertigungsindustrie in der Branche entwickelt. Dieses Fehlen von zuverlässigen Lieferketten veranlasst noch immer zahlreiche Entwickler dazu, ihre Anlagen selbst zu bauen, oftmals ohne die notwendige Expertise (Europäische Kommission 2017). Dadurch sind in der Vergangenheit oftmals suboptimale Ergebnisse erzielt worden, durch die die Leistung der eingesetzten Anlagen deutlich reduziert wurde.

- **Zu Geringe Kostenschätzungen:**

Von Investorensseite wurde mehrfach bemängelt, dass die Projektkosten von den Anlagenentwicklern regelmäßig zu niedrig kalkuliert wurden. Da in der Frühphase eines Projektes die meisten Arbeiten vom Entwickler selbst durchgeführt wurden, wurden sämtliche Kosten als sehr niedrig angenommen. Im späteren Projektverlauf wurden allerdings häufig Kooperationen mit anderen Unternehmen notwendig, die direkt oder indirekt an der Entwicklung beteiligt waren. Die daraus zusätzlich entstandenen Kosten wurden in vielen Fällen im Vorfeld nicht einkalkuliert (Europäische Kommission 2017).

- **Zu lange Genehmigungsverfahren:**

Genehmigungsverfahren für Wellenkraftprojekte gestalten sich bisher sehr aufwendig und ziehen sich oftmals über mehrere Jahre hin, da beispielsweise vor der Genehmigung weitgreifende ökologische Untersuchungen durchgeführt werden müssen (MacGillivra, et al. 2013). Hinzu kommt, dass viele Gemeinden befürchten, durch den Bau eines Wellenkraftwerkes andere Nutzungsmöglichkeiten des Küstenbereiches einzuschränken und den Unternehmungen dementsprechend skeptisch gegenüberstehen. Hierzu zählen beispielsweise Fischfang und Tourismus. Oftmals werden Genehmigungen nur für einen ganz bestimmten Projektrahmen erteilt. Sollten beim Betrieb der Anlage Probleme auftreten oder technologische Fortschritte erzielt werden und somit eine signifikante Veränderung am Wellenkraftwandler vorgenommen werden müssen, so ist in vielen Fällen ein neues Genehmigungsverfahren notwendig. Durch diese Unsicherheiten wurden in der Vergangenheit zahlreiche Investoren abgeschreckt. Eine Vereinfachung, Beschleunigung und Vereinheitlichung der Genehmigungsverfahren ist deshalb notwendig.

- **Unklare nationale und internationale Zielsetzungen:**

Im Gegensatz zu anderen erneuerbaren Energieträgern existiert bei marinen Energien kein Konsens über die angestrebte Entwicklung. Es fehlen klare Entwicklungsziele und Förderpro-

---

gramme (Badcock-Broe, et al. 2014). Seitens der Europäische Union sind Photovoltaik und Windkraft als tragende Säulen der Energiewende angesehen und werden durch langfristige Förderprogramme und Subventionen zusätzlich unterstützt (Lutz und Ammann 2016). Die Nachfrage nach diesen Produkten ist somit für einen langen Zeitraum gesichert. Im Gegensatz dazu existieren für Wellen- und Gezeitenkraft lediglich zeitlich begrenzte Finanzierungsprogramme, die jedoch keine langfristige Sicherheit garantieren. Viele Geldgeber begründen ihre Zurückhaltung mit dem Mangel an internationalen Strategien und Richtlinien. Ein Beispiel für eine langfristige Fördermaßnahme sind Einspeisevergütungen, die bereits für die meisten regenerativen Energien existieren, jedoch noch nicht bei marinen Energieträgern (IRENA 2014). Eine weitere von Investoren genannte Maßnahme liegt in einer klaren Ausweisung von Gebieten, welche für die marine Energieerzeugung geeignet und genehmigt sind (vergleichbar mit den Deutschen Vorrang-, Vorbehalts- und Eignungsgebieten).

- **Schwierigkeiten beim Netzanschluss:**

In einer von (MacGillivray, et al. 2013) durchgeführten Studie wurden 16 Entwickler von Wellenkraftwandlern nach Ursachen für die schwierige Umsetzung von Wellenkraftprojekten befragt. Alle befragten gaben an, dass der Anschluss ans Stromnetz bei ihren Projekten zu Komplikationen geführt habe. In der Vergangenheit war die Stromversorgung stets zentral ausgerichtet, mit konventionellen Kraftwerken, welche in der Nähe der großen Verbraucherzentren gelegen waren. Durch den Umstieg auf erneuerbare Energien wird die Stromversorgung zunehmend dezentralisiert. Dies erfordert einen Ausbau an Übertragungsleitungen von den neuen Erzeugungsstandorten zu den Regionen mit hohem Verbrauch. Dieser Ausbau geht allerdings in vielen Gebieten nur sehr langsam voran. Der Zeitpunkt des Netzanschlusses war oft bei der Projektplanung unbekannt. Zusätzlich wurde von den Entwicklern die niedrige Transparenz des Ausbau- und Anschlussprozesses bemängelt. Hinzu kommt, dass die Netzanschlussentgelte in vielen Fällen einen großen Teil der Investitionskosten ausmachten. Als Beispiel seien hier die schottischen Orkney-Inseln genannt. Die Inseln verfügen über sehr große marine Energiepotentiale, weshalb hier auch das EMEC beheimatet ist. Die Kosten für einen Netzanschluss liegen aufgrund der Lage allerdings sieben Mal höher, als auf dem Britischen Festland (MacGillivray, et al. 2013).

#### **7.4. SWOT-Analyse**

Im nächsten Schritt wird eine SWOT-Analyse (engl. **S**trengths, **W**eaknesses, **O**pportunities & **T**hreats, für Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken) für die Nutzung der Wellenenergie in Europa durchgeführt. Die SWOT-Analyse ist ein Instrument der strategischen Planung für Unternehmen oder Industriezweige, welches in den 1950er Jahren an der Harvard Universität entwickelt wurde (Pelz 2018). In einer internen Analyse werden zunächst Merkmale, welche direkt das Unternehmen / die Branche betreffen untersucht und nach Stärken und Schwächen unterteilt. Im Anschluss daran wird bei einer externen Analyse das direkte Umfeld des Untersuchungsobjektes betrachtet und Einflussfaktoren ermittelt, die kein direkter Bestandteil des Unternehmens / der Branche sind. Diese werden nach Chancen

und Risiken unterteilt. Daraus sollen anschließend Handlungsstrategien abgeleitet werden. Die Ergebnisse, die aus den vorhergehenden Untersuchungen entnommen wurden, sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14 SWOT-Analyse für Wellenkraft in Europa

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissionsfreie Technologie zur Energieerzeugung, die zur Reduktion der Treibhausgasbelastung beiträgt</li> <li>• Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, welche teilweise aus politisch instabilen Regionen kommen</li> <li>• Insbesondere Nordwest-Europa verfügt über sehr gute Voraussetzungen für die Nutzung von Wellenenergie</li> <li>• Die optische Belastung liegt aufgrund der Lage im Meer niedriger, als bei anderen Energieträgern. Dadurch steigt die öffentliche Akzeptanz</li> <li>• Es sind keine Standorte an Land notwendig, wegen denen es zu Interessenskonflikten kommen könnte</li> <li>• Stromerzeugung aus Wellen ist sehr gut prognostizierbar</li> <li>• Die Stromerzeugung ist auch zu Zeiten möglich, an denen andere regenerative Energieträger nicht produzieren können (keine Sonne, bzw. Wind)</li> <li>• Wellenkraftwerke sind in ihrer Größe und Leistung sehr gut skalierbar und können somit flexibler eingesetzt werden, als konventionelle Kraftwerke</li> <li>• Die Leistungsdichte in Wellen liegt deutlich höher, als bei Wind oder Sonnenstrahlung (Cruz 2008). Anlagen gleicher Leistung können somit deutlich kleiner dimensioniert werden</li> <li>• Leistungsschwankungen sind bei kurzfristiger Betrachtung deutlich niedriger, als bei Wind und Photovoltaik und sind allgemein besser prognostizierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Technologien zur Stromgewinnung aus Wellen befinden sich noch im Entwicklungsstadium</li> <li>• Wellenkraftnutzung wird bisher nicht kommerziell betrieben und liefert nur einen geringen Beitrag zur europäischen Stromproduktion</li> <li>• Die Produktion ist nur an Standorten mit ausreichenden Wellenressourcen und ggf. guten geophysikalischen Verhältnissen möglich.</li> <li>• Die Stromerzeugung ist noch mit sehr hohen Kosten verbunden</li> <li>• Die Entwicklung vom Prototyp zu kommerziell genutzten Anlagen ist für die Entwickler sehr schwierig</li> <li>• Die Technologie für Wellenkraftwerke ist momentan noch weniger ausgereift, als die der Gezeitenenergie als direktem Konkurrenten.</li> <li>• Die Kosten und der Aufwand für den Betrieb von Anlagen im Meer sind noch sehr hoch</li> <li>• Stromerzeugung und Nutzung sind räumlich meist voneinander getrennt. Deshalb ist ein Ausbau der Stromnetze notwendig</li> <li>• Es treten über das Jahr gemittelt deutliche Leistungsschwankungen auf</li> <li>• Verhältnismäßig geringe Entwicklung in der Wellenenergienutzung in den letzten Jahrzehnten</li> <li>• Die Kraftwerke sind hohen Belastungen ausgesetzt</li> <li>• Uneinigkeit über zu nutzende Technologien</li> <li>• Es besteht für Wellenkraftanlagen noch keine Infrastruktur und keine Lieferketten</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Arten von Wellenkraftwandlern und die Skalierbarkeit können die Anlagen an die Anforderungen unterschiedlicher Standorte angepasst werden</li> <li>• Es besteht keine Gefahr der Umweltverschmutzung durch das Austreten von toxischen Stoffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wellenenergie ist nur für einige Länder interessant, weshalb kein globales Interesse besteht</li> <li>• Uneinigkeit über vorhandenes Potential und erreichbare Wirkungsgrade</li> </ul>
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> <li>• EU- und länderspezifische Ausbauziele für erneuerbare Energieträger können die Entwicklung der Wellenkraft begünstigen</li> <li>• Durch den Ausbau kann ein neuer Wirtschaftszweig erschlossen, das wirtschaftliche Wachstum gefördert und neue Arbeitsplätze geschaffen werden</li> <li>• Es existiert eine Vielzahl an (finanziellen) EU-Maßnahmen zur Förderung der erneuerbaren Energien</li> <li>• Wellenkraft kann eine gute Ergänzung zu Windkraft und Photovoltaik darstellen. Alle produzieren dargebotsabhängig, haben allerdings ihre Leistungsspitzen zu unterschiedlichen Zeiten</li> <li>• Kann teilweise in bestehende Bauwerke integriert werden</li> <li>• Einige Länder in Europa verfügen über große Potentiale. Durch die Entwicklung einer kommerziellen Wellenenergietechnologie könnte eine globale Führungsposition eingenommen werden. Neben der Energiegewinnung für den heimischen Markt könnte stark von Exporten in andere Regionen profitiert werden.</li> <li>• Gegenüber zahlreichen anderen erneuerbaren Energieträgern besteht in Teilen der Bevölkerung eine gewisse Skepsis, Wellenkraft kann hier als Alternative aufgezeigt werden. Beispiele hierfür sind die optische Umweltbelastung durch Windkraftanlagen, die umweltschädliche Produktion von Photovoltaikanlagen oder geringe Zubaumöglichkeiten für Wasserkraftwerke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufgrund zahlreicher Fehlschläge innerhalb der Branche in der Vergangenheit herrscht eine gewisse Skepsis gegenüber Wellenkraftwandlern, welche Investitionen ausbremst</li> <li>• Es existieren international keine Rahmenrichtlinien, Entwicklungsziele und Fahrpläne für die Entwicklung der Wellenkraft</li> <li>• Es fehlen langfristige Fördermaßnahmen, wie die Implementierung von Einspeisevergütungen oder die Ausweisung von Eignungsgebieten</li> <li>• Die Umweltauswirkungen von Wellenkraftwerken sind noch unzureichend erforscht</li> <li>• Geldgeber suchen nach Investments mit hohen Renditen in möglichst kurzer Zeit. Wellenkraftwerke erfüllen diese Anforderungen mit ihrem jetzigen Entwicklungsstand jedoch noch nicht und weisen zusätzlich ein hohes Risiko auf. Kostenreduktionen und Renditesteigerungen treten erfahrungsgemäß erst ab einer gewissen kritischen Masse an installierter Leistung auf.</li> <li>• Der hohe Zeit- und Kostendruck, welcher durch den Wettbewerb zum Finden einer marktreifen Technologie verursacht wird, könnte die Qualität der Entwicklung negativ beeinflussen</li> <li>• Die Genehmigungsverfahren für Wellenkraftprojekte sind oft zeit- und kostenintensiv</li> <li>• Sehr große Preisschwankungen in Abhängigkeit von Standort, Technologie, Anlagenmenge etc.</li> <li>• Durch den Ausbau der Wellenkraft könnten andere Nutzungen der Meere, wie Fischfang oder Schifffahrt eingeschränkt werden</li> </ul>



<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahlreiche Verfahren und Komponenten aus anderen marinen Industrien, wie der Öl- oder Gasindustrie können als Grundlage für die Weiterentwicklung der Wellenkraft verwendet werden (MacGillivra, et al. 2013).</li> <li>• Wellenkraft profitiert vom Ausbau der Offshore-Windenergie, da diese den Netzausbau in Küstennähe vorantreibt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Typische Entwicklungen anderer regenerativer Energieträger (z.B. Kostenreduktion) sind bisher bei der Wellenkraft nicht zu beobachten</li> <li>• Es existieren an vielen Standorten hohe Barrieren für den Netzanschluss (Europäische Kommission 2017)</li> <li>• Technologisches „Wettrennen“ mit anderen Kontinenten um das Entwickeln einer Marktreifen Technologie</li> <li>• Der EU-Austritt Großbritanniens könnte die Kooperation zwischen den Staaten beeinträchtigen.</li> </ul>
---	--

Die Strategiefindung mithilfe der SWOT-Analyse lässt sich nach (Fleig 2017) in vier Teilbereiche unterteilen. Hierbei setzt man je ein Element der internen Analyse (Stärken und Schwächen) mit einem Element der externen Analyse (Chancen und Risiken) in Zusammenhang. Das Vorgehen ist in Tabelle 15 erläutert.

Tabelle 15 Grundstrategien einer SWOT-Analyse, eigene Darstellung nach (Fleig 2017)

		Interne Analyse	
		Stärken	Schwächen
Externe Analyse	Chancen	Ausbauen: „Wie können Stärken eingesetzt werden, um Chancen zu nutzen?“	Aufholen: „Wo können Schwächen abgebaut werden, um dadurch Chancen besser zu nutzen?“
	Risiken	Absichern: „Wie können Stärken genutzt werden, um Risiken zu entschärfen?“	Meiden: „Wo können Schwächen abgebaut werden, um Risiken zu reduzieren?“

Im Folgenden werden die vier Abschnitte „Ausbauen“, „Aufholen“, „Absichern“ und „Meiden“ für den europäischen Wellenkraftsektor untersucht.

#### 7.4.1. Strategie „Ausbauen“

Die Europäische Union und zahlreiche Einzelstaaten haben sich für die Zukunft ambitionierte Klimaziele gesetzt. Die Ziele der EU sehen vor, die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Bezugsjahr 1990 bis 2020 um 20%, bis 2030 um 40% und bis 2050 um mindestens 80% zu reduzieren. Zusätzlich dazu soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch bis 2020 auf 20% und bis 2030 auf mindestens 27% erhöht werden (Umweltbundesamt 2018). Um diese Ziele zu erreichen, ist ein weiterer Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig. Der Ausbau einiger bereits etablierter regenerativer Energieträger wird jedoch aus unterschiedlichen Gründen vielerorts ausgebremst. Zu

---

diesen Gründen zählen Widerstand innerhalb der Bevölkerung oder geringere wirtschaftliche Anreize aufgrund wegfallender Subventionen (Witsch 2018). Hinzu kommt, dass ein ungebremsster Zubau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen wenig sinnvoll ist. Dies soll am Beispiel von Deutschland erläutert werden. Zu Spitzenproduktionszeiten liegt die Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik bereits heute oberhalb des Bedarfs (Pietroni 2018). Zu Zeiten geringer Produktion (keine Sonneneinstrahlung und Windstille), fällt sie jedoch nahezu auf null ab. Auch ein weiterer Zubau an Wind und Photovoltaik verringert demnach nicht die Abhängigkeit von konventionellen Kraftwerken, kann jedoch während der Spitzenzeiten zu einem Überangebot führen, was wirtschaftliche Einbußen, wie negative Strompreise zur Folge hat. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, den Energiemix möglichst vielseitig zu gestalten und den Ausbau von regenerativen Energieträgern zu fördern, deren Produktionsspitzen zu anderen Tages- bzw. Jahreszeiten auftreten. Hieraus entsteht eine hervorragende Chance für Wellenenergie und andere marine Energieträger, da diese den bisherigen Energiemix deutlich ausweiten könnten. Hinzu kommt die große Bandbreite an (finanziellen) Fördermaßnahmen, welche von der EU und von diversen Einzelstaaten für die Entwicklung regenerativer Energieträger vergeben werden (Lutz und Ammann 2016). Diese umfassenden Fördermaßnahmen bieten in Europa einen großen Standortvorteil gegenüber anderen Regionen der Welt. Somit sind hier für Entwickler deutlich bessere Bedingungen gegeben, als an vielen anderen Standorten. Dadurch besteht die Chance, eine globale Führungsposition bei der Entwicklung von Wellenkraftwandlern einzunehmen. Zusätzlich ist die Möglichkeit gegeben, einen völlig neuen Wirtschaftszweig zu erschließen und Arbeitsplätze zu schaffen. Mit Spanien (15,3%), Frankreich (9,2%), Schweden (6,2%) und Portugal (6,7%) (Statista 2018), verfügen einige europäische Staaten mit relativ hoher Arbeitslosenquote über die sehr große Potentiale.

#### **7.4.2. Strategie „Aufholen“**

Untersuchungen von (Karagjozi und Parker 2016) haben ergeben, dass zahlreiche Entwickler von Wellenkraftwandlern Schwierigkeiten mit der Weiterentwicklung ihrer Anlagen vom Prototyp zur Marktreife haben. Gründe hierfür sind u.a. mangelnde Testmöglichkeiten und Finanzierung. Innerhalb Europas sind durch die Europäische Union und in den letzten Jahren auch zunehmend durch Einzelstaaten zahlreiche Fördermöglichkeiten aufgebaut worden. Ein Beispiel hierfür ist Schottland, welches durch die Einrichtung des WES (Wave Energy Scotland) eine Infrastruktur für Forschung & Entwicklung, Finanzierung sowie Informationsaustausch zur Verfügung stellt. Der Ausbau dieser Förderprogramme kann maßgeblichen Anteil daran haben, die oben genannten Schwächen zukünftig zu beseitigen. Von zahlreichen Entwicklern wurde außerdem bemängelt, dass sich Genehmigungsverfahren für Wellenkraftprojekte oft sehr aufwändig gestalten. Durch eine gemeinsame Entwicklung unter staatlicher, bzw. internationaler Führung können hier Barrieren abgebaut und Verfahren beschleunigt und maßgeblich vereinfacht werden. Durch den kooperativen Ansatz könnten weiterhin die allgemeine Skepsis gegenüber Wellenkraftwerken sowie die Zurückhaltung bei Investitionen abgebaut werden, da das finanzielle Risiko des Entwicklers deutlich sinken würde.

Vielfach wird bemängelt, dass Erzeugung und Verbrauch bei marinen Kraftwerken räumlich voneinander getrennt sind. Somit entstehen weite Übertragungswege und ein zusätzlicher Netzausbau wird



---

notwendig. Aufgrund des fortschreitenden Ausbaus der erneuerbaren Energien findet diese Dezentralisierung der Stromerzeugung allerdings schon heute in vielen Staaten statt. Hinzu kommt, dass marine Kraftwerke die gleiche Infrastruktur nutzen können, die durch den Ausbau von Offshore-Windkraftanlagen ohnehin notwendig ist. Wellenkraftwerke können somit stark von der Förderung anderer regenerativer Energieträger profitieren.

#### **7.4.3. Strategie „Absichern“**

Die größten Risiken der Wellenkraftnutzung bestehen in der allgemeinen Zurückhaltung privater Investoren sowie dem Mangel an einem klaren Konzept zur Weiterentwicklung der Wellenenergie. Die in der SWOT-Analyse ermittelten Stärken der Wellenkraft treten erst ab einer gewissen Größenordnung an installierter Leistung nennenswert in Erscheinung, jedoch noch nicht beim bisherigen Entwicklungsstadium. Dementsprechend gestaltet sich momentan die Ausnutzung von Stärken zur Beseitigung der genannten Risiken und somit die Strategiefindung im Bereich „Absichern“ sehr schwierig. Vielmehr ist es zunächst notwendig, die Risiken zu beseitigen, um anschließend die Stärken auch entsprechend für die Weiterentwicklung nutzen zu können. Die genannten Risiken lassen sich jedoch vermutlich nur über externe Einflüsse beseitigen und nicht durch Maßnahmen aus der eigentlichen Wellenenergiebranche.

Eine Möglichkeit, um zumindest das Interesse von Politik und Investoren an der Wellenkraft zu steigern, bestünde möglicherweise in der Herausarbeitung der Vorteile von Wellenenergie gegenüber anderen erneuerbaren Energien, verbunden mit einer gezielten Bewusstseinsbildung in der Öffentlichkeit.

#### **7.4.4. Strategie „Meiden“**

Ähnliches gilt für das Strategiefeld „Meiden“. Einige der in der SWOT-Analyse ermittelten Schwächen, wie die Standortgebundenheit, die übers Jahr schwankende Erzeugung oder die große Entfernung zum Verbraucher können grundsätzlich nicht vermieden werden. Die meisten anderen Aspekte, wie die hohen Kosten oder der niedrige technologische Entwicklungsgrad können von der Branche allein ohne externe Einflüsse voraussichtlich nicht bewältigt werden. Auch in diesem Bereich ist somit die Strategiefindung sehr schwierig.

#### **7.4.5. Fazit der SWOT-Analyse**

Die Durchführung der SWOT-Analyse hat sehr deutlich gezeigt, dass der Wellenkraftsektor zum jetzigen Zeitpunkt nicht in der Lage ist, die notwendigen Entwicklungen alleine voranzutreiben. Vielmehr ist er auf externe Unterstützung durch die Politik und andere Interessensgruppen angewiesen. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass der Großteil der ermittelten Schwächen und Risiken nicht systemimmanent sind und prinzipiell zukünftig abgebaut, bzw. vermieden werden könnten. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass zunächst ein gewisser Entwicklungsstandard und Ausbaugrad erreicht wird, was voraussichtlich nur durch umfassende staatliche oder internationale Unterstützung möglich sein wird.

---

## 7.5. Beteiligte Akteure

Anhand der oben ermittelten Ergebnisse sollen nun in einem letzten Schritt Akteure und Maßnahmen identifiziert werden, welche für eine positive Weiterentwicklung des europäischen Wellenkraftsektors maßgeblich sein können. Zu erwähnen sei hierbei noch, dass die jeweilige Motivation zur Beteiligung durchaus unterschiedlich ausfällt. So dürfte das Interesse der EU sowie deren Mitgliedsstaaten in der Förderung einer zuverlässigen, umweltverträglichen Energieversorgung liegen, während die Finanzbranche, die Entwickler und die Industrie hauptsächlich wirtschaftliche Ziele verfolgen.

### Die Europäische Union sowie deren Mitgliedsstaaten:

- *Formulierung klarer Entwicklungsziele, Rahmenrichtlinien und Meilensteine* auf EU-Ebene. Umsetzung der EU-Richtlinien in nationales Recht.
- *Implementierung von finanziellen Fördermaßnahmen*, wie der Einführung flächendeckender und langfristiger Einspeisevergütungen, wie sie bereits für andere regenerative Energieträger bestehen.
- *Einigung auf Innovationsziele* und Identifizierung von Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele.
- *Festlegen von einheitlichen Leistungsindikatoren*. Diese sollten sämtliche Faktoren abdecken, welche für den technologischen Erfolg der Anlage maßgeblich sind. Hierzu zählen beispielsweise das Produktionsverhalten, die Beständigkeit oder die Kosten. Das Erreichen aller festgelegten Kennzahlen ist jeweils die Bedingung für die Förderung der nächsten Projektstufe, wie beispielsweise eines großskaligen Prototypen. Durch die Vereinheitlichung der Untersuchungsstandards und die bessere Vergleichbarkeit einzelner Projekte kann somit außerdem die Zurückhaltung von Investoren bekämpft werden.
- Gezielte staatliche *Förderung einiger vielversprechender Pilotprojekte*, um das Vertrauen von Investoren zu gewinnen. Daraus können zusätzlich Leitlinien für die Entwicklung zukünftiger Projekte abgeleitet werden. Wellenkraftwerke werden für private Investoren, wie Venture Capital vermutlich erst ab einer unbekannt kritischen Masse an installierter Leistung interessant werden, da dadurch wie gezeigt die Kosten gesenkt werden können. Diese kritische Masse muss voraussichtlich zunächst zu großen Teilen über öffentliche Gelder finanziert werden. Als Voraussetzung für eine Förderung könnten Entwickler im Gegenzug dazu verpflichtet werden, ihre Forschungsergebnisse zu veröffentlichen. (Ocean Energy Forum 2016) schlägt hierfür die *Einrichtung zweier Fonds* ein, welche durch die EU sowie nationale Regierungen finanziert werden. Genannt werden Zahlen von 250 Mio. € für einen Entwicklungsfond, sowie 50 – 70 Mio. für einen Fond zur Risikobewältigung.
- *Schaffen von wirtschaftlichen Anreizen* für Investitionen in Wellenkraftprojekte in einer frühen Entwicklungsphase.

- 
- *Überarbeitung der europäischen Förderprogramme*, wie des NER300<sup>2</sup>. Diese legen häufig *Förderbedingungen* fest, welche sich in der Vergangenheit als nicht zielführend erwiesen haben. Das NER300 setzt beispielsweise die Umsetzung einer Anlage von mindestens 5 MW voraus (MacGillivray, et al. 2013). In Kapitel 7.3 wurde jedoch bereits gezeigt, dass viele Projekte daran scheiterten, dass bereits zu früh zu große Anlagen installiert wurden.
  - *Ausweisung von Gebieten*, welche für die Nutzung durch Wellenkraftanlagen geeignet und erlaubt sind. Gründliche *Untersuchung der vorhandenen Ressourcen* an den ausgewiesenen Standorten.
  - *Förderung des kooperativen Ansatzes* zwischen Unternehmen und Behörden. Dieser sollte ggf. unter staatlicher Führung stattfinden. Zusätzlich dazu sollte der Wissensaustausch zwischen den Europäischen Staaten verstärkt werden. Eine Möglichkeit hierfür besteht in der Einrichtung staatlich geförderter Testzentren. Dadurch wird den Entwicklern eine sichere und kostengünstige Möglichkeit zur Weiterentwicklung, Präsentation und Finanzierung ihrer Projekte gegeben. Im Gegenzug könnten Entwickler verpflichtet werden, die gewonnen Erkenntnisse zu veröffentlichen.
  - *Europaweite Standardisierung der Testverfahren für Wellenkraftwandler*, um Ergebnisse vergleichbar zu machen. Durch die bessere Vergleichbarkeit könnten Zweifel von Investoren abgebaut werden.

#### **Behörden:**

- *Vereinfachung, Beschleunigung Vereinheitlichung und Kostensenkung der Genehmigungsverfahren*. Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Behörden oder Einrichtung einer Behörde, welche für den kompletten Genehmigungsprozess zuständig ist.
- *Anpassung und Vereinfachung der Genehmigungsverfahren für kleinere Projekte*, wie Tests von einzelnen Prototypen. Diese müssen momentan die gleichen Auflagen erfüllen, wie großflächige Projekte (Ocean Energy Forum 2016).

#### **Umweltschutzverbände:**

- *Ausführliche Untersuchung der Umweltbeeinflussung* und darauf basierende Erarbeitung und *Überwachung der Einhaltung von Umweltstandards*, in Zusammenarbeit mit der EU und deren Mitgliedsstaaten

---

<sup>2</sup> Das NER 300 ist ein EU-weites finanzielles Förderprogramm für innovative, CO<sub>2</sub>-neutrale Pilotprojekte im Energiesektor.

---

## Öffentlichkeit:

- *Aufklärung der Öffentlichkeit* über Chancen und Potentiale der Wellenkraft, um Skepsis abzubauen.
- *Beteiligung der Öffentlichkeit* am Planungsprozess für den Ausbau mariner Energieträger.

## Netzbetreiber:

- *Anpassung der Stromnetze an eine dezentrale Erzeugung.* Ausbau von Übertragungsnetzen und Verteilernetzen in Küstennähe
- *Identifizierung und Beseitigung von finanziellen und regulatorischen Barrieren,* welche den Netzanschluss von Gezeitenkraftwerken erschweren oder verhindern können. Integrierung von Wellen- und Gezeitenenergie in die langfristige europäische Stromnetzplanung.

## Technologieentwickler:

- *Austausch von Fachwissen* und gewonnenen Erkenntnissen zwischen den Entwicklern.
- *Einigung auf einige wenige zu nutzende Technologien.*
- *Ausnutzen von Gemeinsamkeiten mit anderen maritimen Technologien,* wie Offshore-Windenergie oder mariner Ölförderung. Zahlreiche Komponenten und Verfahren könnten vermutlich übernommen werden und müssten nicht neu entwickelt werden. Dadurch wird die Einrichtung von Lieferketten maßgeblich vereinfacht.
- *Priorisierung der Untersuchung und Weiterentwicklung von Teilsystemen* und kleinskaligen Prototypen, anstatt von Anlagen in Originalgröße.
- *Aufarbeitung fehlgeschlagener Projekte* und Identifizierung der Ursachen.

## Finanzbranche:

- *Identifizierung von risikomindernden Finanzierungsmethoden.* Hierzu zählen beispielsweise Kofinanzierung oder staatliche Garantien.
- *Gewinnung von großen Technologiekonzernen als Sponsoren.* Diese bringen im Gegensatz zu privaten Investoren zusätzlich ingenieurtechnische Expertisen mit und haben ein gesteigertes Interesse an der Erschließung neuer Technologien.

---

### **Fertigungsindustrie:**

- *Anpassung der in Öl- und Gasförderung verwendeten Technologien an die Anforderungen der Wellenkraftbranche.*
- *Identifizierung von Gemeinsamkeiten und Anforderungen der Entwickler, um darauf aufbauend die Massenproduktion und Einrichtung von Lieferketten zu fördern.*

### **Universitäten und Forschungsinstitute:**

- *Leistung von Grundlagenforschung und experimentellen Entwicklungen, auch in Zusammenarbeit mit der Industrie.*

---

## 8. Fazit

---

Die Ausarbeitung hat ergeben, dass Wellenergie grundsätzlich geeignet ist, zukünftig einen nennenswerten Beitrag zur europäischen Stromversorgung zu leisten. Sie ist in der Lage, den bisherigen Energiemix sinnvoll zu erweitern und dazu beizutragen, nationale und internationale Klimaziele zu erreichen. Allerdings ist die bisherige Entwicklung eher schleppend verlaufen. Weder beim Ausbau, noch bei der Preisentwicklung konnten typische Muster für die Einführung neuer regenerativer Energieträger bestätigt werden. Im Gegenzug existieren zahlreiche Hemmnisse, welche vor einer Marktreife der Technologie noch abgebaut werden müssten. Dabei handelt es sich jedoch nicht um rein technologische Hindernisse. Vielmehr stehen politische und wirtschaftliche Problematiken, wie der Mangel an klaren Rahmenrichtlinien oder sicheren Finanzierungsmöglichkeiten im Vordergrund.

Voraussichtlich wird die europäische Wellenenergiebranche nicht in der Lage sein, diese Hürden alleine zu meistern, sondern wird nach wie vor noch auf politische und wirtschaftliche Unterstützung angewiesen sein. Ein kooperativer Ansatz zwischen zahlreichen Interessensgruppen ist notwendig, um Bedingungen zu schaffen, die eine Weiterentwicklung der Wellenkraft bis hin zur Marktreife ermöglichen. Die Voraussetzungen für diese Zusammenarbeit sind in Europa grundsätzlich gegeben, wodurch ein großer Standortvorteil gegenüber anderen Regionen geschaffen wird. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, eine internationale Führungsrolle im Bereich der marinen Energieträger zu übernehmen.

Ein weiterer wesentlicher Schritt wird in der Konsensfindung über die zu nutzenden Technologien liegen. Die Untersuchungen haben ergeben, dass der Entwicklungsstand der einzelnen Arten von Wellenkraftwandlern sehr unterschiedlich ausfällt. Submerged Pressure Differentials, Overtopping Devices, Bulge Wave Devices und Anlagen, welche unter dem Begriff "Sonstige" zusammengefasst sind, werden aller Voraussicht nach zukünftig keine nennenswerte Rolle spielen. Hierfür spricht, dass diese Anlagen nur einen verschwindend geringen Anteil an den bekannten Wellenkraftprojekten ausmachen und nur sehr wenige Firmen die Entwicklung dieser Technologien vorantreiben. Auch die aufgebrachten Finanzmittel fallen für diese Anlagentypen eher gering aus. Bestätigt wird diese Aussage auch durch den durchschnittlich eher niedrigen Technologie-Reifegrad, den die genannten Technologien aufweisen. Somit schneiden sie in allen untersuchten Bereichen unterdurchschnittlich ab.

Attenuators verfügen zwar über einen verhältnismäßig hohen Anteil an der Finanzierung und über zahlreiche Technologieentwickler, jedoch im Verhältnis dazu nur über einen geringen Anteil an den untersuchten Projekten. Auch der Technologie-Reifegrad von Attenuators fällt unterdurchschnittlich aus. Es ist deshalb fraglich, ob die Attenuator-Technologie sich gegen die anderen Arten von Wellenkraftwandlern durchsetzen kann.

Pointabsorber beherrschen momentan große Teile des Markts in Hinsicht auf Anzahl der Entwickler, Anteil an der Gesamtheit der Projekte und bereitgestellte Finanzmittel. Jedoch liegen auch sie in Bezug auf den Technologie-Reifegrad unterhalb des Durchschnitts. Kapitel 6.2 hat außerdem gezeigt, dass die

---

Stromgestehungskosten offensichtlich für Pointabsorber höher ausfallen, als beispielsweise für OWSC-Anlagen.

OWSCs, OWCs und Rotating Masses verfügen alle im Verhältnis zu ihren finanziellen Mitteln und der Anzahl der Entwickler über einen überdurchschnittlich großen Marktanteil. Auch der Technologie-Reifegrad fällt für diese drei Technologietypen am höchsten aus. Die einzigen beiden dokumentierten Anlagen, welche jemals den Reifegrad 8 erreicht haben, sind den Technologien OWSC und OWC zuzuordnen. Auch über die Hälfte der Technologien des Reifegrads 7 gehören zu den OWSCs oder OWCs. Nach Kapitel 6.2 liegen die Stromgestehungskosten für OWSCs noch einmal deutlich niedriger, als für OWC-Anlagen. OWSCs nehmen somit in allen untersuchten Bereichen die Spitzenposition ein. Die Annahme, dass eine erhöhte Konkurrenz zu einer schnelleren Entwicklung einer Technologie führt, kann im Falle von Pointabsorbern, OWCs, OWCs und Rotating Masses nicht bestätigt werden.

Die Chancen zum Erreichen der Marktreife stehen demnach für Anlagen des OWSC-Typs momentan am besten. Anlagen der Typen OWC und Rotating Masses belegen bei der Untersuchung den zweiten Platz, dicht gefolgt von Pointabsorbern. Die Chancen für Attenuators stehen momentan aufgrund der Konkurrenz durch die anderen Technologietypen eher schlecht. Auf dem letzten Platz liegen wie bereits erwähnt die Submerged Pressure Differentials, Overtopping Devices, Bulge Wave Devices und „Sonstige“ Anlagen.

---

## Literaturverzeichnis

- Alchetron. *alchetron.com*. 2018. <https://alchetron.com/Wave-Dragon#-> (Zugriff am 16. August 2018).
- Astariz, Sharay, A. Vazquez, und Gregorio Iglesias. „Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and.“ *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, September 2015.
- AW-Energy Oy. *AW-Energy Oy*. 2018. <http://aw-energy.com/waveroller/#surge> (Zugriff am 14. Mai 2018).
- Badcock-Broe, Abbie, Rob Flynn, Sian George, Remi Gruet, und Nick Medic. *Wave and Tidal Energy Market Deployment Strategy for Europe*. SI Ocean, 2014.
- Barstow, Stephen, Gunnar Mork, Lasse Lonseth, und Jan Petter Mathisen. *WorldWaves wave energy resource assessments from the deep ocean to the coast*. Trondheim, Norwegen: Fugro OCEANOR AS, 2011.
- Bilbao Exhibition Centre. *Bilbaoexhibitioncentre.com*. 2015. <http://wmw.bilbaoexhibitioncentre.com/en/exhibitor/ENERGIAREN-EUSKAL-ERAKUNDEA-ENTE-VASCO-DE-LA-ENERGIA/product/Mutriku-test-site/9490/?idioma=US> (Zugriff am 16. August 2018).
- Bömer, Jens, et al. *Nutzung der Meeresenergie in Deutschland*. Berlin, Deutschland: Ecofys, 2010.
- Bonifacio, Emmanuel. *Wave Energy*. Stanford, Kalifornien, 2010.
- Borthwick, Alistair G. L. *Marine Renewable Energy Seascape*. Edinburgh, Schottland: School of Engineering, The University of Edinburgh, 2016.
- Brito e Melo, Ana. *Ocean Energy Systems Annual Report 2016*. Ocean Energy Systems , Lissabon, Portugal: The Executive Committee of Ocean Energy Systems , 2016.
- Brito e Melo, Ana, et al. *Annual Report; An overview of ocean energy activities in 2017*. Lissabon, Portugal: The Executive Committee of Ocean Energy Systems, 2017.
- Brown, Lester R. *World On the Edge: How to Prevent Environmental and Economic Collapse*. New York, USA : W. W. Norton & Company, 2010.
- Büsching, Fritz. „Über Orbitalgeschwindigkeiten irregulärer Brandungswellen.“ Fakultät für Bauwesen, Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 1974.
- Coastal Engineering Manual. *coastalengineeringmanual.com*. 2002. <http://coastalengineeringmanual.tpub.com/Part-II-Chap1/Part-II-Chap10011.htm> (Zugriff am 16. September 2018).
- Cruz, Joao. *Ocean Wave Energy*. Briston, Vereinigtes Königreich: Springer Verlag, 2008.
- Dalton, G., R. Alcorn, und T. Lews. *Operational expenditure costs for wave energy projects; O/M, insurance and site rent*. Bilbao, Spanien: Third International Conference on Ocean Energy, 2010.
- Delphi234. *Wikipedia.org*. 30. April 2018. <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Global-Wind-Power-Cumulative-Capacity.svg> (Zugriff am 15. September 2018).
- Department of Defence. *Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance*. Department of Defence, Vereinigte Staaten von Amerika, 2011.
- Diamandis, Peter. „Forbes.“ 02. September 2014. <https://www.forbes.com/sites/peterdiamandis/2014/09/02/solar-energy-revolution-a-massive-opportunity/#4012cb876c90> (Zugriff am 22. August 2018).
- . *Forbes.com*. 2. September 2014. <https://www.forbes.com/sites/forbes-finds/2018/09/12/5-best-travel-headphones-of-2018/#1216cf3b271b> (Zugriff am 15. September 2018).



- Drew, B., A. R. Plummer, und M. N. Sahinkaya. *A review of wave energy converter Technology*. Bath, Vereinigtes Königreich: Department of Mechanical Engineering, University of Bath, 2009.
- Duquette, J., D. O. Sullivan, S. Ceballos, und R. Alcorn. *Design and Construction of an Experimental Wave Energy Device Emulator Test Rig*. Upsala, Schweden: 8th European Wave and Tidal Energy Conference, 2009.
- Dvorak, Paul. *Windpowerengineering.com*. 7. Mai 2017. <https://www.windpowerengineering.com/projects/u-s-corporations-buying-home-grown-wind-power/> (Zugriff am 15. September 2018).
- ELECTRIC VEHICLE NEWS. *ELECTRIC VEHICLE NEWS*. 20. Mai 2010. <http://www.electric-vehiclenews.com/2010/05/aquamarine-power-officially-releases.html> (Zugriff am 21. August 2018).
- EMEC. *The European Marine Energy Center Ltd*. 2018. <http://www.emec.org.uk/services/pathway-to-emec/technology-readiness-levels/> (Zugriff am 20. August 2018).
- energiezukunft.eu. *energiezukunft.eu*. 5. Dezember 2015. <https://www.energiezukunft.eu/politik/bundesregierung-beschliesst-weitere-kohle-foerderung-gn103748/> (Zugriff am 15. September 2018).
- Europäische Kommission. *Study on Lessons for Ocean Energy Development*. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2017.
- Faizal, Mohammed, Ahmed M. Rafiuddin, und Lee Young-Ho. *A Design Outline for Floating Point Absorber Wave Energy Converters*. Hindawi Publishing Corporation, 2014.
- Fleig, Dr Jürgen. *business-wissen.de*. 27. März 2017. <https://www.business-wissen.de/hb/swot-analyse-fuer-die-strategieplanung/> (Zugriff am 23. August 2018).
- Ghosh, Tushar K., und Mark A. Prelas. *Energy Resources and Systems: Volume 2: Renewable Resources*. Springer, 2011.
- Giesecke, Jürgen, Stephan Heimerl, und Emil Mosonyi. *Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb*. Berlin, Deutschland: Springer, 2014.
- Girard, R., K. Laquaine, und G. Kariniotakis. *Assessment of wind power predictability as a decision factor in the investment phase of wind farms*. Paris, Frankreich: Elsevier, 2013.
- Graw, Kai-Uwe. *Wellenenergie: eine hydromechanische Analyse*. Wuppertal: Wuppertal : IGAW, 1995.
- International Energy Agency. *Offshore Energy Outlook* . Paris, Frankreich: IEA Publications, 2018.
- International Energy Agency. *Offshore Energy Outlook*. Paris, Frankreich: IEA Publications, 2018.
- IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2017*. Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate: International Renewable Energy Agency, 2018.
- IRENA. *Wave Energy; Technology Brief*. Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate: International Renewable Energy Agency, 2014.
- Jenne, D. S., Y. -H. Yu, und V. Neary. *Levelized Cost of Energy Analysis of Marine and Hydrokinetic Reference Models*. Washington, USA: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 2015.
- Karagjozi, Francis, und Gary Parker. *Enabling factors to make Ocean Wave Power a competitive renewable energy source*. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Economics, 2016.
- Kempener, Ruud, und Frank Neumann. *Tidal Energy Technology Brief*. Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate: IRENA, 2014.

- 
- LaenderDaten. *LaenderDaten*. 21. 03 2018.  
<https://www.laenderdaten.de/energiewirtschaft/elektrische-energie/stromverbrauch.aspx>  
(Zugriff am 15. August 2018).
- Lagoun, Mouna, Atallah Benalia, und mohamed Benbouzid. *Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status*. Manama, Bahrain: International Energy Conference, 2011.
- Luoma, Jon. *YaleEnvironment360*. 01. Dezember 2008.  
<https://e360.yale.edu/features/capturing-the-oceans-energy> (Zugriff am 24. August 2018).
- Lutz, Evamaria, und Dr. Norbert Ammann. *Finanzierung der Erneuerbaren Energien in EU-Strommärkten*. München: IHK für München und Oberbayern, 2016.
- Lynn, Paul A. *Electricity from Wave and Tide*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- MacGillivra, A., H. Jeffrey, C. Hanmer, D. Magagna, A. Raventos, und A. Badcock-Broe. *Ocean Energy Technology: Gaps and Barriers*. SI Ocean, 2013.
- MacGillivray, A., H. Jeffrey, C. Hanmer, D. Magagna, A. Raventos, und A. Badcock-Broe. *Ocean Energy Technology: Gaps and Barriers*. SI Ocean, 2013.
- Magagna, Davide, Riccardo Monfardini, und Andreas Uihlein. *JRC Ocean Energy Status Report*. Joint Research Center, Petten, Niederlande: Joint Research Centre, 2016.
- Magagna, Davide, und Andreas Uihlein. *Ocean energy development in Europe: Current*. Petten, Niederlande: European Commission, DG JRC, Institute for Energy and Transport, 2015.
- Malcherek, Andreas. *Gezeiten und Wellen. Die Hydromechanik der Küstengewässer*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- Mascarenhas, P., J. Bald, I. Menchaca, A. M. O'Hagan, und T. Simas. *RiCORE Project novel technology selection*. THE RICORE PROJECT, 2015.
- McGarvey, David, Scott Savitz, Gerald Diaz, und George Thompson. *Department of Homeland Security Science and Technology Readiness Level Calculator (Ver 1.1)*. Arlington, USA: Homeland Security Studies and Analysis Institute, 2009.
- Mork, Gunnar, Stephen Barstow, Alina Kabuth, und M. Teresa Pontes. *Assessing the global wave energy potential*. Shanghai, China: 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2010.
- Mork, Gunnar, Stephen Barstow, Alina Kabuth, und Teresa Pontes. *Assessing the global wave energy potential*. Shanghai, China: American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- Neslen, Arthur. *theguardian.com*. 11. August 2017.  
<https://www.theguardian.com/environment/2017/aug/11/britain-spent-twice-as-much-on-overseas-fossil-fuels-as-renewables> (Zugriff am 23. August 2018).
- Ocean Energy Forum. *Ocean Energy Strategic Roadmap 2016, building ocean energy for Europe*. Ocean Energy Forum, 2016.
- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. *OFFICE of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY*. 2018. <https://www.energy.gov/eere/water/marine-and-hydrokinetic-technology-glossary> (Zugriff am 21. August 2018).
- Partain, Larry, und Lews Fraas. „Swasons Law; Plan to mitigate global climate change.“ 2016.
- Pecher, Arthur. *Handbook of Ocean Wave Energy*. Aalborg, Dänemark: Springer Open, 2017.
- Pelz, Prof. Dr. Waldemar. *SWOT-Analyse*. Gießen: Technische Hochschule Mittelhessen, 2018.
- Pietroni, Angela. *Energybrainpool.com*. 16. Januar 2018. <https://blog.energybrainpool.com/rekord-erneuerbare-energien-decken-erstmalig-100-prozent-der-stromnachfrage/> (Zugriff am 23. August 2018).

- 
- Pollitt, Michael. *The Guardian*. 07. August 2008.  
<https://www.theguardian.com/technology/2008/aug/07/research.waveandtidalpower> (Zugriff am 03. Mai 2018).
- PowerWeb.com. *PowerWeb.com*. 2018. <http://www.fi-powerweb.com/Renewable-Energy.html>  
(Zugriff am 15. September 2018).
- Renewable Energy UK. *Renewable Energy UK*. 2018.  
<http://www.reuk.co.uk/wordpress/wave/anaconda-bulge-wave-power-generator/> (Zugriff am 03. Mai 2018).
- Rusu, Euren, und Florin Onea. *A review of the technologies for wave energy extraction*. Galati, Rumänien: Department of Mechanical Engineering, University of Galati , 2018.
- Schlütter, Flemming, Ole Svenstrup Petersen, und Lotte Nyborg. *Resource Mapping of Wave Energy Production in Europe*. Horsholm, Dänemark: European Wave and Tidal Energy Conference 2015, 2015.
- Shehata, Ahmed S., Qing Xiao, Khalid M. Saqr, und Day Alexander. *Wells Turbine for Wave Energy Conversion: A Review*. Glasgow, Schottland: International Journal of Energy Research, 2016.
- Sigma Hellas. *Sigma Hellas*. 2018. <https://www.sigmahellas.gr/energy/wave-powered-desalination/>  
(Zugriff am 11. Juni 2018).
- Statista. *statista.com*. Juni 2018.  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/160142/umfrage/arbeitslosenquote-in-den-eu-laendern/> (Zugriff am 23. August 2018).
- Subsea world news. *Subsea world news*. 10. September 2013.  
<https://subseaworldnews.com/2013/09/10/wellos-penguin-wave-energy-converter-produces-energy-off-uk/> (Zugriff am 03. Mai 2018).
- TETHYS. *TETHYS*. 01. Oktober 2016. <https://tethys.pnnl.gov/annex-iv-sites/pelamis-wave-power-p2-demonstration-emec> (Zugriff am 22. August 2018).
- Texas A&M University. 2015. <https://waveenergyconversiontamu15.weebly.com/theory-of-wave-energy--availability.html#> (Zugriff am 14. September 2018).
- Umweltbundesamt. *umweltbundesamt.de*. 22. Februar 2018.  
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/europaeische-energie-klimaziele> (Zugriff am 23. August 2018).
- University of Southampton. *Sustainable Energy Research Group*. Mai 2012.  
<http://www.energy.soton.ac.uk/anaconda-wave-energy-converter-concept/> (Zugriff am 02. Mai 2018).
- Vasilenko, Polina. *Medium*. 11. Januar 2018. <https://medium.com/Žpolinavasilenko/the-wave-energy-converter-penguin-based-on-rotating-mass-principle-7875598428c2> (Zugriff am 03. Mai 2018).
- Vicinanza, D, p. Contestabile, und E. Di Lauro. *Overtopping Breakwater for Wave Energy Conversion: Status and Perspective*. Cork, Irland: 12th European Wave and Tidal Energy Conference, 2017.
- Wave Energy Scotland. *waveenergyscotland.co.uk*. 2018. <http://www.waveenergyscotland.co.uk/>  
(Zugriff am 23. August 2018).
- Wello. *Invesdor*. 21. Dezember 2017. <https://www.invesdor.com/en/pitches/888> (Zugriff am 03. Mai 2018).
- WestCoast Power. *WestCoast Power*. 2015. <http://syngas.ca/de/water-power/masonry-portfolio/>  
(Zugriff am 16. August 2018).
- Witsch, Katrin. *handelsblatt.com*. 18. April 2018.  
<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/erneuerbare-energien-das-ende-der->

---

oeko-subventionen-naht/21185894.html?ticket=ST-9936701-Px24hqefi7u6W3VHucjF-ap2  
(Zugriff am 16. September 2018).

World Energy Council. *World Energy Resources. Marine Energy 2016*. World Energy Council, 2016.

WTWH Media. *Windpower Engineering*. 2018.

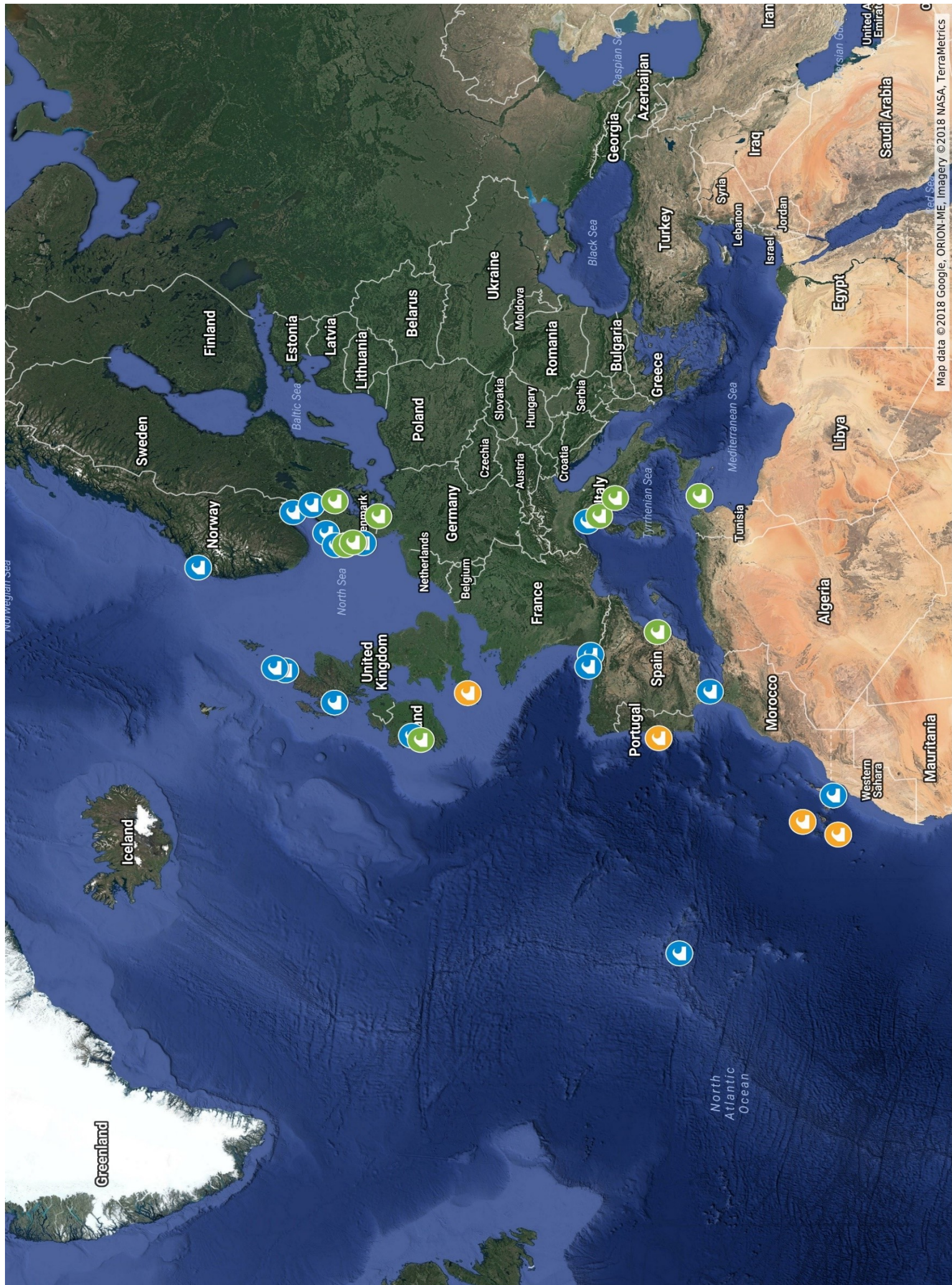
<https://www.windpowerengineering.com/projects/wind-industry-renewables-headed-near-future/> (Zugriff am 22. August 2018).

---

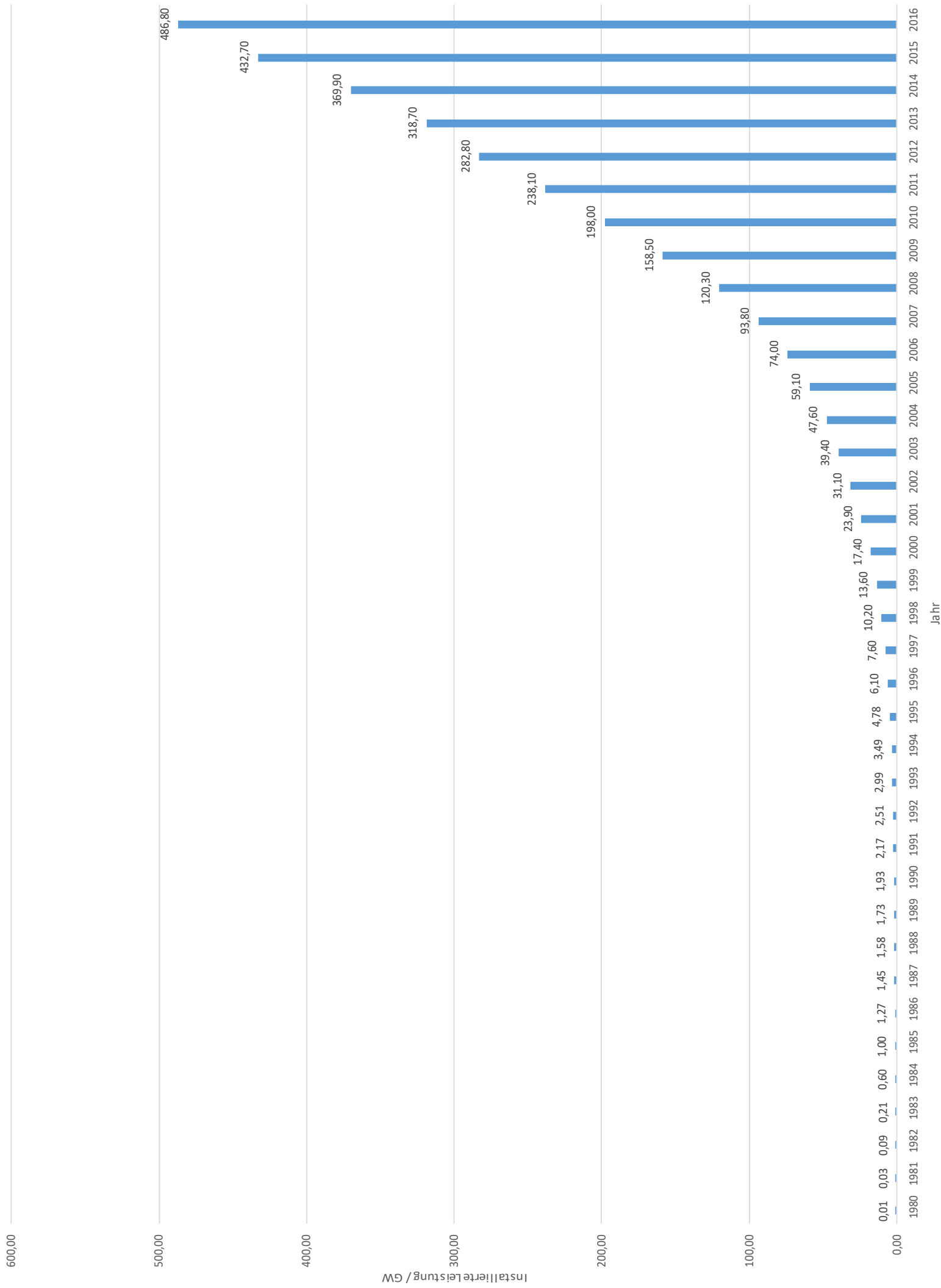
## 9. Anhang

---

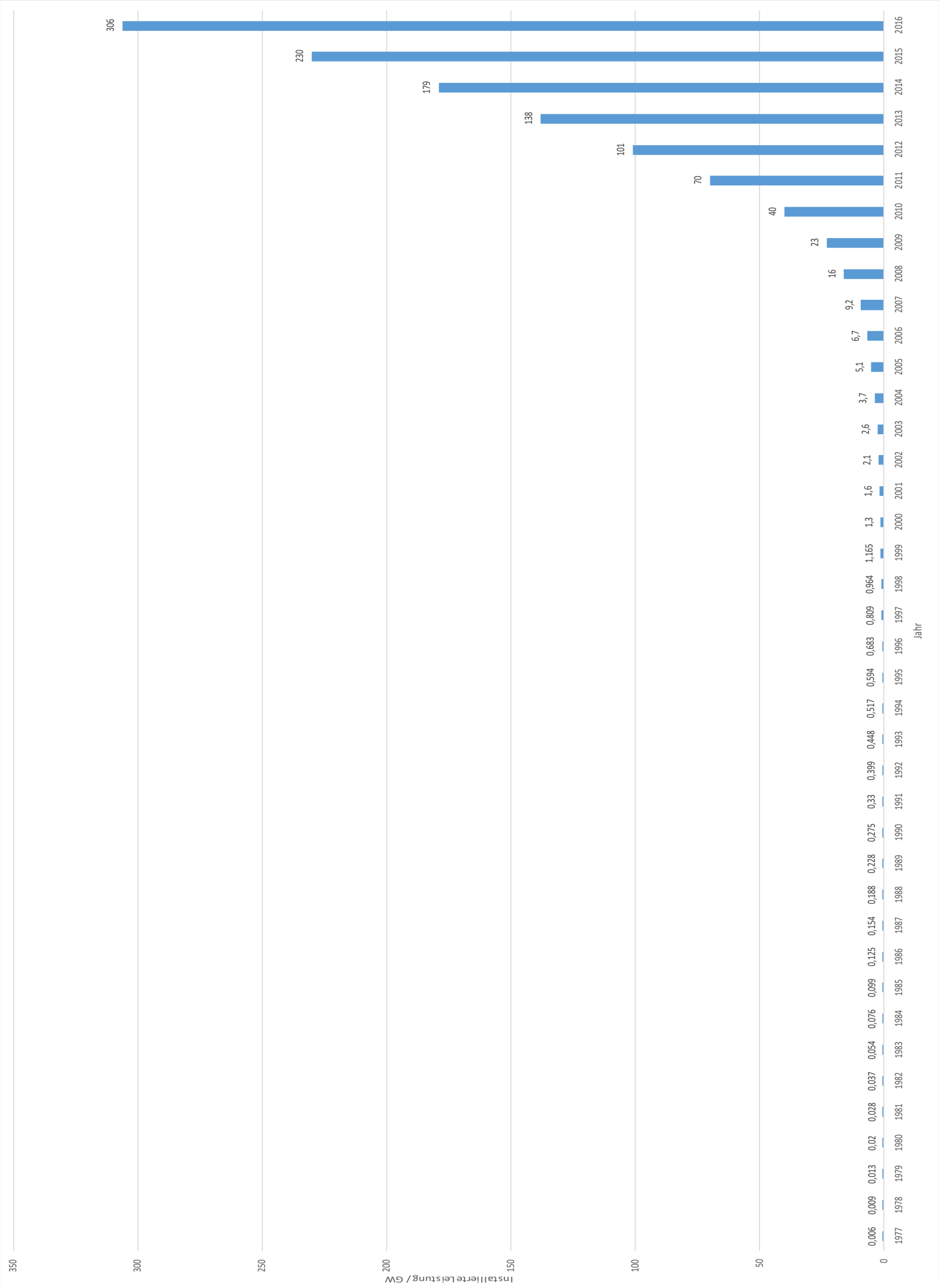
Anhang 1 : Verteilung der gebauten- (blau), im Bau befindlichen- (gelb) und geplanten (grün) Wellenkraftanlagen ©2018 Google, ORION-ME, Imagery © 2018 NASA, TerraMetrics	68
Anhang 2 Kumulierte Leistung an Windkraftanlagen von 1980 - 2016, eigene Darstellung nach (Brown 2010) & (Delphi234 2018)	69
Anhang 3 Kumulierte Leistung an Photovoltaikanlagen von 1977 - 2016, eigene Darstellung nach (Brown 2010) & (PowerWeb.com 2018)	70
Anhang 4 Preisentwicklung im Photovoltaiksektor von 1977 - 2016, (Diamandis, Forbes.com 2014)	71
Anhang 5 Preisentwicklung im Windkraftsektor von 1980 - 2015, (Dvorak 2017)	71



Anhang 1 : Verteilung der gebauten- (blau), im Bau befindlichen- (gelb) und geplanten (grün) Wellenkraftanlagen ©2018 Google, ORION-ME, Imagery © 2018 NASA, TerraMetrics

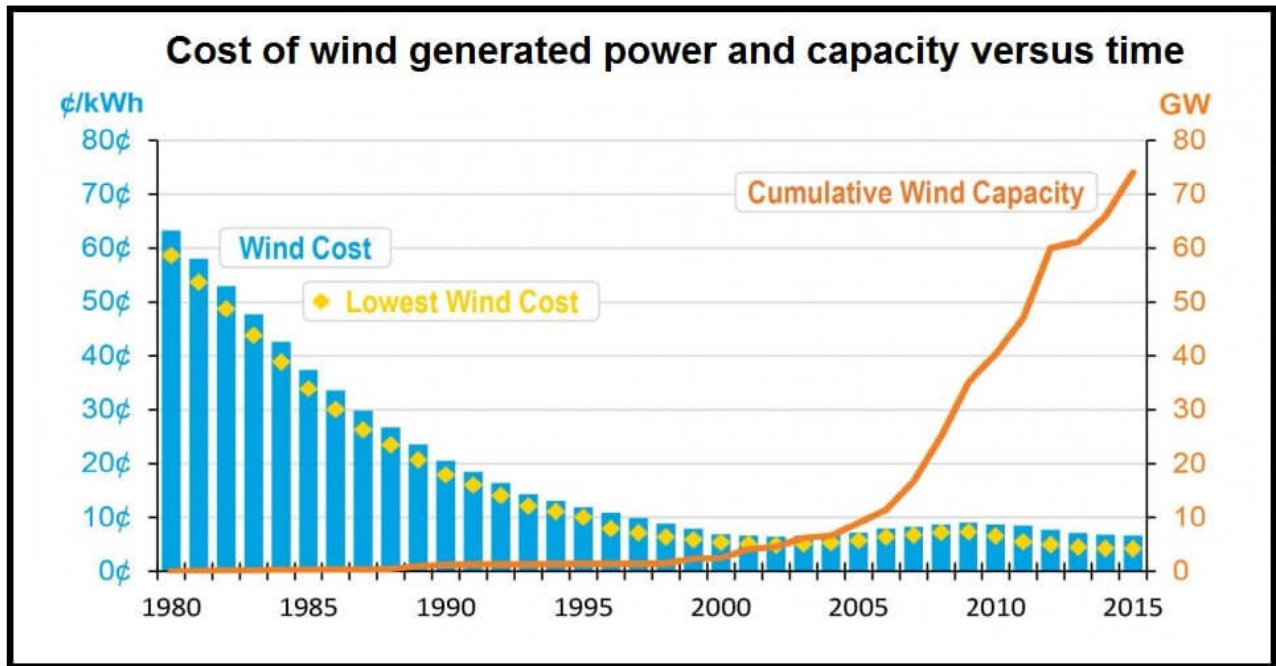


Anhang 2 Kumulierte Leistung an Windkraftanlagen von 1980 - 2016, eigene Darstellung nach (Brown 2010) & (Delphi234 2018)

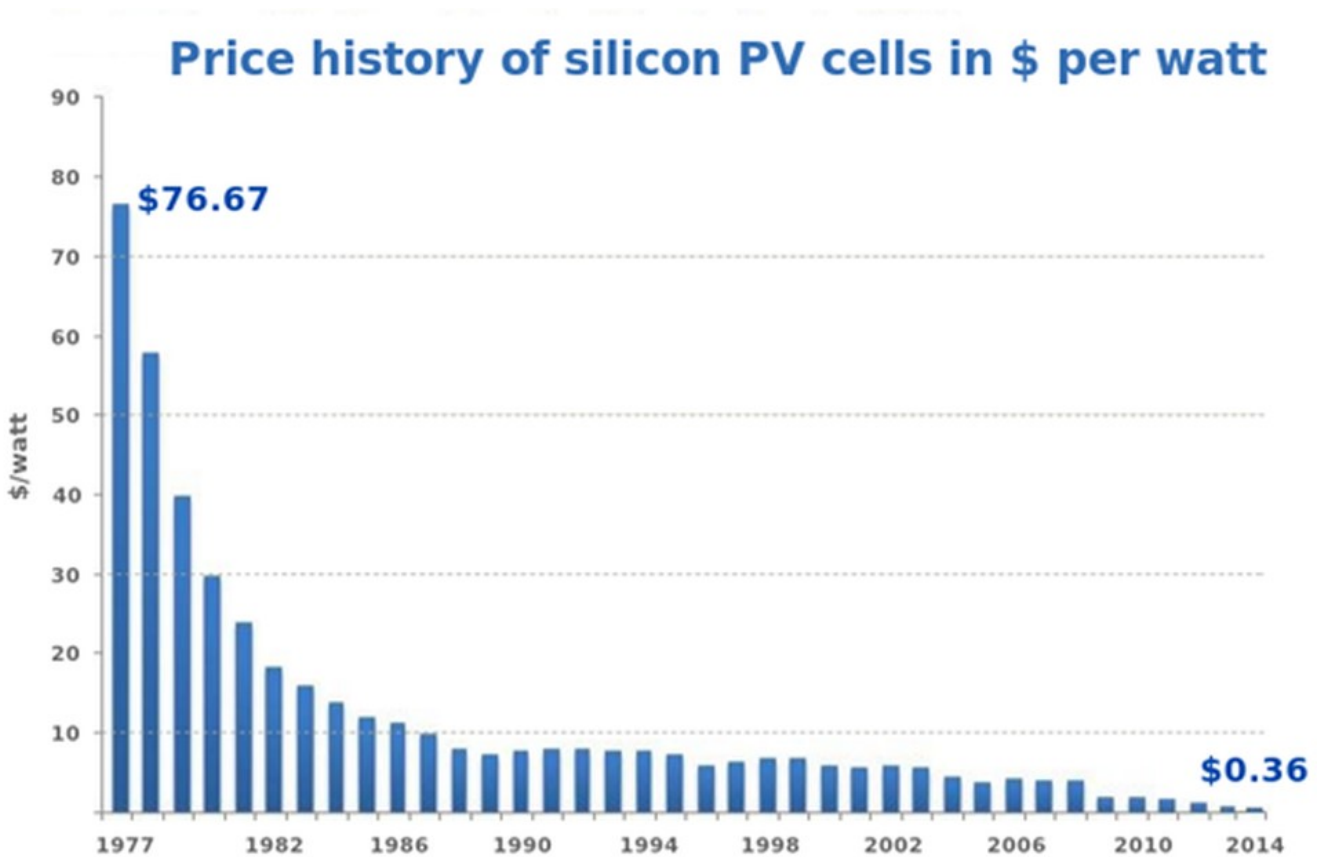


Anhang 3 Kumulierte Leistung an Photovoltaikanlagen von 1977 - 2016, eigene Darstellung nach (Brown 2010) & (PowerWeb.com 2018)





Anhang 5 Preisentwicklung im Windkraftsektor von 1980 - 2015, (Dvorak 2017)



Source: Bloomberg, New Energy Finance & pv.energytrend.com

Anhang 4 Preisentwicklung im Photovoltaiksektor von 1977 - 2016, (Diamandis, Forbes.com 2014)

---

## 10. Eidesstattliche Erklärung

---

Abschlussarbeit von:

Herrn Robin Ruff

### Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 und § 23 Abs. 7 APB TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Robin Ruff, die vorliegende Master-Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung gemäß § 23 Abs. 7 APB überein.

Datum:

21.09.2018

---

Unterschrift:

Robin Ruff

---