



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Marvin Gessner

# **Nutzung von Wellenenergie zum Antrieb von Schiffen**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Marvin Gessner**

**Nutzung von Wellenenergie zum Antrieb von  
Schiffen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/ Entwicklung und Konstruktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Udo Pulm  
Zweitprüferin: Prof. Vera Schorbach

Abgabedatum: 24.06.2022

# Zusammenfassung

## Name des Studierenden

Marvin Gessner

## Thema der Bachelorthesis

Nutzung von Wellenenergie zum Antrieb von Schiffen

## Stichworte

Energie, klimaneutrale Antriebe, Schifffahrt, Wellenenergie, Wellenkraft, Wellenkraftwerke, Schiffbau, WEC, Wellenenergiesysteme

## Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit den Möglichkeiten der Nutzung von Wellenenergie auf Schiffen. Gesucht sind Konzepte, die genug Energie bereitstellen, um ein Schiff anzutreiben. Dabei werden, neben bekannten Konzepten, auch eigene Ideen, teilweise abgeleitet von stationären Energiegewinnungssystemen, vorgestellt und anschaulich erklärt. Anhand von festgelegten Anforderungen wird jedes Konzept bewertet. Ebenfalls werden Ideen für Optimierungen festgehalten. Aus den gewonnenen Erkenntnissen folgt eine Einschätzung der Zukunftsfähigkeit und die Empfehlung eines Konzeptes zur weiteren Forschung.

## Name of Student

Marvin Gessner

## Title of the paper

The use of wave energy to propel ships

## Keywords

Energy, carbon neutral propulsion, shipping, ships, wave energy, wave forces, wave powerplant, ship building, WEC, wave energy systems

## Abstract

This thesis deals with the possibilities of harnessing wave energy on ships. In best case, a concept produces enough energy to propel the ship. Next to existing concepts, new concept ideas partially derived from stationary wave energy systems are also considered. Each concept gets an evaluation based on defined requirements. Any Ideas for optimization get explained and thoughts about the future viability get documented. With the gained knowledge a concept is recommended for further research.

# Aufgabenstellung

## für die Bachelorthesis

### von Herrn Marvin Gessner

Matrikel-Nummer: ██████████

#### Thema:

Nutzung von Wellenenergie zum Antrieb von Schiffen

#### Hintergrund:

Aufgrund von Klimawandel und Umweltverschmutzung werden derzeit Alternativen zu den fossilen Brennstoffen gesucht. Dabei beinhalten die Wellen auf den Weltmeeren theoretisch genug Energie, um jedes Schiff anzutreiben. Die Erforschung und Entwicklung von Konzepten, zur Nutzung der Wellen für den Vortrieb von Schiffen, steht derzeit noch in den Anfängen und bietet viel Potential für die Zukunft.

#### Ziel:

Ziel der Arbeit ist es, Konzepte zur Nutzung von Wellenenergie auf Schiffen zu analysieren und zu bewerten.

#### **Arbeitspakete:**

1. Recherche:  
Es wird das Themengebiet (Nutzung von Wellenenergie) recherchiert und sich in die Sachverhalte eingearbeitet. Dabei wird ein Überblick über den Entwicklungsstand und derzeitigen Einsatz solcher Technologien gegeben.
2. Analyse:  
Die Funktionsweise jedes Konzeptes soll anschaulich erklärt werden. Neben bekannten Konzepten sollen auch Konzepte zur stationären Energiegewinnung aus Wellen auf ihre Übertragbarkeit geprüft werden. Es können auch eigene Konzeptideen vorgestellt und analysiert werden.
3. Ermittlung von Bewertungskriterien:  
Zum Umfang der Arbeit gehört die Suche nach Aspekten zur Einordnung und Bewertung. Mögliche Aspekte sind zum Beispiel:
  - Leistungsgewinn
  - Wie kann die Energie auf dem Schiff genutzt/ umgewandelt werden?
  - Nutzung als Hauptantrieb, Hilfsantrieb oder zur Energieversorgung
  - Einfluss auf den Strömungswiderstand
  - Aufwand der Installation eines solchen Systems
  - Betriebssicherheit in Bezug auf Stürme, Eis, Grundkontakt, etc.
  - Einschätzung der Betriebs-/ Wartungskosten
  - Optimierungspotential des Konzeptes
4. Bewertung bezüglich der Bewertungskriterien:  
Gefundene Aspekte sollen analysiert und beurteilt werden. Anschließend werden die verschiedenen Konzepte anhand der Aspekte bewertet und eingeordnet.
5. Ausblick:  
Am Ende stehen die Einschätzung und Empfehlung möglicher, zukünftiger Anwendungen. Im Ausblick können auch weitere Ideen ergänzt werden.

Für die Arbeit soll viel Wert auf eine methodische Arbeitsweise und saubere Dokumentation gelegt werden.

18.03.2022  
Datum



Erstprüfer/in

# Inhaltsverzeichnis

<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>III</b>
<b>AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>IV</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1. HISTORISCHER HINTERGRUND DER NUTZUNG VON WELLENENERGIE.....	1
1.2. ZIEL DER ARBEIT .....	2
1.3. AUFBAU DER ARBEIT .....	2
<b>2. GRUNDLAGEN .....</b>	<b>2</b>
2.1. ENTSTEHUNG VON MEERESWELLEN.....	2
2.2. EIGENSCHAFTEN VON MEERESWELLEN.....	3
2.3. LEISTUNGSPOTENTIAL EINER WELLE.....	5
2.4. BEWEGUNGSGLEICHUNG VON SCHIFFEN.....	7
2.5. EINFLUSS DER SCHIFFSGRÖÙE AUF DAS VERHALTEN BEI WELLEN.....	8
<b>3. ANFORDERUNGEN .....</b>	<b>9</b>
3.1. WELLENRICHTUNG.....	9
3.2. REIBUNG MIT WASSER UND LUFT .....	9
3.3. GESCHWINDIGKEIT.....	10
3.4. ENERGIEGEWINN UND ENERGIEBILANZ.....	10
3.5. DIE SCHIFFSBEWEGUNG UNTER DEM EINFLUSS VON WELLEN .....	10
3.6. NUTZUNG DER ERZEUGTEN ENERGIE.....	10
3.7. EINSATZGEBIETE .....	14
3.8. WIRTSCHAFTLICHKEIT .....	14
3.9. SICHERHEIT.....	15
3.10. MÖGLICHE UMWELTEINFLÜÙE .....	15
3.11. OPTIMIERUNGSPOTENTIAL.....	15
<b>4. AKTUELL GENUTZTE KONZEPTE ZUR NUTZUNG VON WELLENENERGIE .....</b>	<b>16</b>
4.1. SURFEN / WELLENREITEN.....	16
4.1.1. Voraussetzungen an die Wellen.....	16
4.1.2. Anforderungen an das Surfbrett / Boot .....	17
4.1.3. Gefahren beim Wellenreiten .....	18
4.1.4. Nutzung auf Flüssen.....	18
4.1.5. Nutzung auf dem Meer .....	19
4.1.6. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen.....	19
4.1.7. Optimierungspotential.....	19
4.1.8. Zukunftspotential.....	19
4.2. ANTRIEB DURCH BEWEGLICHE FINNEN .....	20
4.2.1. Aufbau.....	20
4.2.2. Entstehung der Antriebskraft.....	21
4.2.3. Wirkung der Finnen auf das Wellenverhalten eines Schiffes .....	23
4.2.4. Verwendung an einem Katamaran .....	23
4.2.5. Forschungsboote mit Finnenantrieb .....	24
4.2.6. Vortrieb durch eine zweiteilige Konstruktion .....	24
4.2.7. Bewertung anhand der Anforderungen .....	25

4.2.8.	Zusammenfassung der Stärken und Schwächen .....	27
4.2.9.	Optimierungspotential .....	27
4.2.10.	Zukunftspotential .....	27
4.3.	ANTRIEB DURCH BEWEGLICHE RUMPFTEILE .....	28
4.3.1.	Aufbau .....	28
4.3.2.	Funktionsweise .....	28
4.3.3.	Bewertung anhand der Anforderungen .....	29
4.3.4.	Zusammenfassung der Stärken und Schwächen .....	32
4.3.5.	Optimierungspotential .....	33
4.3.6.	Zukunftschancen .....	33
<b>5.</b>	<b>EIGENE KONZEPTIDEEN ZUR NUTZUNG VON WELLENENERGIE .....</b>	<b>33</b>
5.1.	MEHRTEILIGE RÜMPFE .....	33
5.1.1.	Aufbau von Varianten zur stationären Energiegewinnung .....	34
5.1.2.	Funktionsweise .....	35
5.1.3.	Bewertung anhand der Anforderungen .....	38
5.1.4.	Zusammenfassung der Stärken und Schwächen .....	40
5.1.5.	Optimierungspotential .....	40
5.1.6.	Zukunftspotential .....	40
5.2.	NUTZUNG VON OSZILLIERENDEN WASSERSÄULEN .....	41
5.2.1.	Aufbau .....	41
5.2.2.	Funktionsweise eines stationären Systems .....	42
5.2.3.	Adaption für die Verwendung an einem Schiff .....	43
5.2.4.	Stand der Technik .....	44
5.2.5.	Bewertung anhand der Anforderungen .....	45
5.2.6.	Zusammenfassung der Stärken und Schwächen .....	48
5.2.7.	Optimierungspotential .....	48
5.2.8.	Zukunftschancen .....	49
5.3.	NUTZUNG EINER SCHWUNGMASSE .....	49
5.3.1.	Aufbau .....	50
5.3.2.	Funktionsweise .....	51
5.3.3.	Veranschaulichung des Bewegungsablaufes .....	51
5.3.4.	Idee zur Erweiterung des Systems um einen Antrieb .....	53
5.3.5.	Stand der Technik .....	53
5.3.6.	Bewertung Anhand der Anforderungen .....	53
5.3.7.	Zusammenfassung der Stärken und Schwächen .....	54
5.3.8.	Optimierungspotential .....	54
5.3.9.	Zukunftspotential .....	57
5.4.	NUTZUNG VON SCHWIMMKÖRPERN AN AUSLEGERN .....	57
5.4.1.	Aufbau .....	57
5.4.2.	Funktionsweise des stationären Systems .....	58
5.4.3.	Adaption zur Verwendung auf einem Schiff .....	58
5.4.4.	Stand der Technik .....	58
5.4.5.	Bewertung anhand der Anforderungen .....	59
5.4.6.	Zusammenfassung der Stärken und Schwächen .....	60
5.4.7.	Optimierungspotential .....	60
5.4.8.	Zukunftspotential .....	61
5.5.	NUTZUNG DES PIEZOELEKTRISCHEN EFFEKTS .....	61
5.5.1.	Vorstellung .....	61
5.5.2.	Anwendungen .....	62
5.5.3.	Anwendung auf Schiffen .....	62
5.5.4.	Stand der Technik .....	63
5.5.5.	Bewertung anhand der Anforderungen .....	64

5.5.6.	<i>Zusammenfassung der Stärken und Schwächen</i> .....	65
5.5.7.	<i>Optimierungspotential</i> .....	65
5.5.8.	<i>Zukunftspotential</i> .....	66
<b>6.</b>	<b>EMPFEHLUNG EINER KONZEPTIDEE</b> .....	<b>66</b>
<b>7.</b>	<b>ERKENNTNISSE UND FAZIT ZUR WELLENENERGIENUTZUNG AUF SCHIFFEN</b> .....	<b>67</b>
<b>8.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>69</b>
<b>9.</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>74</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die "Autonaut" von 1895 [71].....	1
Abbildung 2: Wellen-Entstehung durch Windeinwirkung.....	2
Abbildung 3: Bezeichnung der Wellenbereiche [56].....	3
Abbildung 4: Bezeichnung der Welleneigenschaften [5] .....	3
Abbildung 5: Bewegung der Wassermoleküle in einer Welle [6].....	4
Abbildung 6: Bewegung der Wassermoleküle in verschiedenen Wassertiefen [7] .....	4
Abbildung 7: Verhalten von Wellen bei ansteigendem Grund [9] .....	5
Abbildung 8: Leistung einer Welle in Abhängigkeit von der Wellenhöhe.....	6
Abbildung 9: Leistung einer Welle in Abhängigkeit von der Wellenperiode .....	6
Abbildung 10: Kräfte an einem Boot [11].....	7
Abbildung 11: Einfluss von langen Wellen [11].....	8
Abbildung 12: Einfluss von kurzen Wellen [11].....	8
Abbildung 13: Die „Sirius Star“ im unbeladenen Zustand [62] .....	9
Abbildung 14: Die „Sirius Star“ im beladenen Zustand [49].....	9
Abbildung 15: Ein Schwesterschiff der „Peking“, die „Kruzenshtern“ unter Segeln [14] .....	11
Abbildung 16: Darstellung eines möglichen Rumpfseglers [15] .....	12
Abbildung 17: Darstellung des Magnus-Effekts [16].....	12
Abbildung 18: Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise von Flettnerrotoren auf einem Schiff [60] .....	12
Abbildung 19: Der Katamaran "Tûranor PlanetSolar" [17] .....	13
Abbildung 20: Ein Schiff mit Kitedrachen beim Setzen/ Einholen [18] .....	13
Abbildung 22: Ein Surfer beim Wellenreiten [47] .....	16
Abbildung 23: Ein Surfboat beim Wellenreiten [67] .....	16
Abbildung 24: Einfluss verschiedener Trimmwinkel auf das Boot [57].....	18
Abbildung 25: Surfen der Gezeitenwelle auf dem Fluss Severn in England [50] .....	18
Abbildung 26: Die „Suntory Mermaid II beim kranen [58].....	20
Abbildung 27: Prinzipdarstellung einer Finne .....	20
Abbildung 27: Auftriebskraft an einem Flugzeugflügel [24] .....	21
Abbildung 28: Vorgänge an einer sich aufwärts bewegenden Finne.....	22
Abbildung 29: Vorgänge an einer sich abwärts bewegenden Finne .....	23
Abbildung 31: Schnittansicht eines Bootes von „Autonaut“ [28] .....	24
Abbildung 31: Darstellung der Funktionsweise des „wave-gliders“ [29].....	25
Abbildung 32: Aufbau einer aktiven Steuerung der Finnen.....	27
Abbildung 33: Der Trimaran im Bau [30].....	28
Abbildung 34: Anbindung der Ausleger an den Hauptrumpf.....	29
Abbildung 35: Hydrauliksteuerung.....	29
Abbildung 36: Auswirkung von Segeln an einem Trimaran .....	31
Abbildung 37: Ein Containerschiff mit mittig gebrochenem Rumpf [51].....	34
Abbildung 38: Darstellung des „Pelamis-System“ [32] .....	34
Abbildung 39: Das „Pelamis-System“ im Betrieb [70].....	34
Abbildung 40: Das „Seacat- System im Wellenbecken [69] .....	35
Abbildung 41: Kräfte auf einen konventionellen Rumpf, während sich das Schiff auf dem Wellenberg befindet .....	35
Abbildung 42: Kräfte auf einen konventionellen Rumpf, während sich das Schiff im Wellental befindet .....	36
Abbildung 43: Zweiteiliger Rumpf, Verhalten auf einem Wellenberg .....	36

Abbildung 44: Zweiteiliger Rumpf, Verhalten in einem Wellental.....	36
Abbildung 45: Prinzipskizze rein hydraulisch .....	37
Abbildung 46: Prinzipskizze elektrisch .....	37
Abbildung 47: Prinzipskizze mechanisch.....	37
Abbildung 48: Prinzipskizze mechanisch-hydraulisch .....	38
Abbildung 49: Prinzipskizze hydraulisch-elektrisch.....	38
Abbildung 50: Ein schwimmendes OWC-Wellenkraftwerk [63] .....	41
Abbildung 51: Schnittdarstellung eines OWC-Systems an einer Küste [59] .....	41
Abbildung 52: In grau der Anbau um den ursprünglichen Rumpf [34] .....	43
Abbildung 53: Querschnitt eines Rumpfs mit OWC-System .....	43
Abbildung 54: Der umgebaute Fischtrawler mit den vier QWC-Kammern am Bug [35] .....	44
Abbildung 55: Mögliche Verwirbelungen an der OWC-Kammer .....	45
Abbildung 56: Das WEC-Kraftwerk: "Mutriku Wave Energy Plant" [37] .....	46
Abbildung 57: Mehrere Kammern versorgen eine Turbine .....	48
Abbildung 58: Ventilsteuerung für eine gleichbleibende Anströmrichtung der Turbine .....	49
Abbildung 59: Ein „Wello-Pinguin“ im Betrieb. Ansicht auf die breite Rumpfseite [38] .....	50
Abbildung 60: Ansicht auf die breite Rumpfseite ( [38] .....	50
Abbildung 61: Die Draufsicht zeigt den asymmetrischen Rumpf deutlich [38] .....	50
Abbildung 62: Einfahrt in die Welle [38] .....	51
Abbildung 63: Der Wellenkamm steht unter dem Bug [38].....	52
Abbildung 64: Der Wellenkamm befindet sich mittig unter dem Schiff [38].....	52
Abbildung 65: Der Wellenkamm befindet sich unter dem Heck [38] .....	53
Abbildung 66: Das schräggestellte Ruder sorgt für Geradeausfahrt.....	55
Abbildung 67: Der versetzte Antrieb sorgt für Geradeausfahrt.....	55
Abbildung 68: Der schräggestellte Antrieb sorgt für Geradeausfahrt .....	56
Abbildung 69: Mit 4m Durchmesser an den Schwimmkörpern, der aktuell größte Prototyp von „Wavestar“ [39].....	57
Abbildung 70: Klassisches Verwendungsbeispiel für einen Ausleger [65] .....	58
Abbildung 71: Das 1:10 Modell [40].....	59
Abbildung 72: Zukünftige Leistung des finalen Systems [41].....	59
Abbildung 73: Darstellung des Piezoelektrischen Effekts [42].....	61
Abbildung 74: Piezoelemente für unter anderem den Einsatz auf den Flügeln von Windkraftanlagen [43] .....	62
Abbildung 75: Der Bug "stampft" in einen Wellenberg [44] .....	63
Abbildung 76: Anordnung der Piezoelemente auf Höhe der Wasserlinie am Rumpf.....	63
Abbildung 77: Prinzipdarstellung der Sensortechnik zur Ermittlung von Materialfehlern in Faserverbundwerkstoffen [45].....	64
Abbildung 78: Technische Daten der verschiedenen Piezoelemente [43] .....	64
Abbildung 79: Leistungsabgabe bei Belastung mit einem variablen Widerstand [43] .....	64
Abbildung 80: Erhöhung der Dehnungsmöglichkeiten durch Abstandshalter am Rumpf .....	66
Abbildung 81: Draufsicht, es ist nur die steuerbord-Seite dargestellt .....	67
Abbildung 82: Vorderansicht (nur Steuerbordseite dargestellt) und Seitenansicht von steuerbord ...	67

## Abkürzungsverzeichnis

**Abkürzung:**

WEC

PCM

OWC

**Bedeutung:**

Wave Energy Converter

Power Conversion Module

Oszillierende Wassersäule

# 1. Einleitung

Der Klimawandel und seine Folgen gewinnen seit Jahren immer mehr an Bedeutung. In allen Bereichen der Technik werden Konzepte und Lösungen gesucht, um den Ausstoß von treibhausfördernden Gasen zu vermeiden. Im öffentlichen Leben bemerkt man diesen Umschwung besonders im Bereich des Verkehrs. Oft stehen die Emissionen des Straßenverkehrs zur Debatte. Auch Flugzeugemissionen werden häufig diskutiert.

Ein Thema, welches bislang jedoch nur wenig Beachtung findet, ist der Schadstoffausstoß der Schifffahrt. Etwa 90% des weltweiten Warenhandels erfolgt über den Seeweg. Dabei werden Schiffe fast ausschließlich mit Schweröl betrieben. Schweröl ist ein Abfallprodukt, das bei der Verarbeitung von Erdöl entsteht [1].

Bei der Ölverbrennung im Schiffsmotor entstehen neben dem Treibhausgas CO<sub>2</sub> vor allem Schadstoffe wie Schwefeloxide, Schwermetalle, Ruß und Feinstaub [2]. Der Anteil des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ist im Vergleich zum Transport auf der Straße und in der Luft eher gering. Allerdings ist der Anteil am weltweiten Ausstoß von Schwefeloxid und Stickstoffoxid mit 30% ein wesentlicher Faktor [3].

An Land erfolgt schon seit Jahren ein Umschwung zu den erneuerbaren Energiequellen. Um auch in der Schifffahrt die Nutzung von fossilen Brennstoffen und somit den Schadstoffausstoß zu verringern und letzten Endes zu vermeiden, werden derzeit Ideen und Konzepte für alternative Schiffsantriebe erarbeitet.

## 1.1. Historischer Hintergrund der Nutzung von Wellenenergie

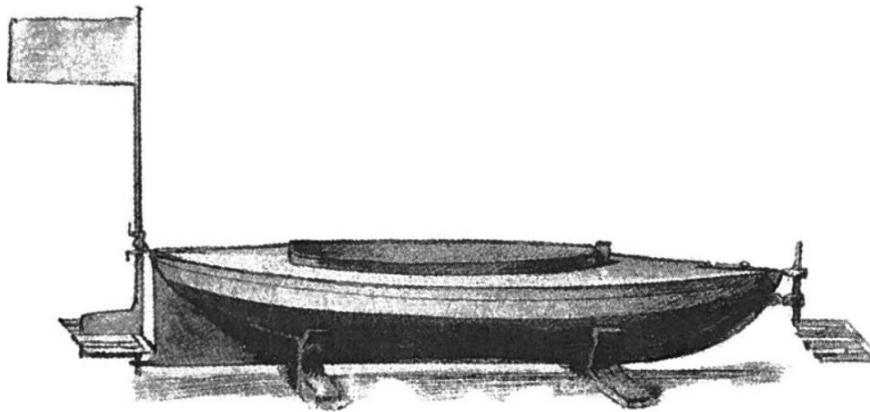


Abbildung 1: Die "Autonaut" von 1895 [71]

Eine Energieform, die auf den Weltmeeren in nahezu unbegrenzter Menge vorliegt, ist die Wellenenergie. Diese zum Vortrieb von Schiffen zu nutzen ist keine neue Idee. Bereits Ende des 19ten Jahrhunderts beschäftigten sich etliche Erfinder mit Konzepten zur Nutzung der Wellenenergie. Einer der ersten Prototypen ist die „Autonaut“ aus dem Jahr 1895 (vgl. Abb. 1). Dabei konnte sich diese Form der Energiegewinnung jedoch in den Zeiten der Dampfmaschine nie durchsetzen. Erst in den letzten Jahren entstand, angetrieben durch die Handlungsnotwendigkeit aufgrund des Klimawandels, ein Interesse die Wellenenergie vermehrt zu nutzen.

### 1.2. Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es unter anderem, einen Überblick über den derzeitigen Entwicklungsstand von Konzepten zur Nutzung von Wellenenergie auf Schiffen zu geben. Gleichzeitig bildet diese Arbeit einen Einstieg in das Thema der Wellenenergiesysteme. Weiterführend sollen diverse Ideen zur Optimierung und Weiterentwicklung festgehalten werden. Anschließend wird eine Grundlage für Forschungsprojekte, die sich detaillierter mit einzelnen Aspekten dieser Arbeit befassen, erarbeitet.

### 1.3. Aufbau der Arbeit

Zunächst werden die Grundlagen von Wellen und Wellenenergie erläutert. Anschließend werden Anforderungen an ein Schiff mit einem System zur Nutzung von Wellenenergie aufgestellt. Es folgt ein Überblick über bekannte und abgeleitete Konzepte, welche die Wellenenergie auf Schiffen nutzen. Die Funktionsweise jedes Konzeptes wird dabei anschaulich erklärt. Gleichzeitig erfolgt eine Bewertung im Hinblick auf die Anforderungen. Folgend werden für alle Konzepte Ideen zur Optimierung und Weiterentwicklung erklärt und dargestellt. Anschließend werden in einem Überblick Stärken und Schwächen festgehalten, die wiederum eine Einschätzung zur Zukunftsfähigkeit ermöglichen. Es wird ein Konzept gewählt, welches im Anbetracht der Ergebnisse am ehesten für die weitere Forschung in Betracht gezogen werden sollte. Am Ende steht ein Fazit, welches die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfasst.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Entstehung von Meereswellen

Es gibt viele Möglichkeiten, wie Wasserwellen erzeugt werden können: Vom Regentropfen, der ins Wasser fällt, bis hin zum Unterwassererdbeben. Für die auf dem Meer üblichen Wellen ist allerdings der Wind ausschlaggebend (vgl. Abb. 2). Die Energie des Windes regt Wassermoleküle zum Schwingen an. Dabei stößt ein in Bewegung geratenes Molekül das nächste an. Es wird also Energie von Molekül zu Molekül weitergegeben. So entstehen zunächst Kapillarwellen mit Wellenbergen von bis zu 4 Millimetern Höhe. Wirkt der Wind für längere Zeit auf ein Gebiet ein, so steigt auch die Wellenhöhe mit der Zeit. Gleichzeitig bedeutet eine höhere Windgeschwindigkeit einen höheren Energieeintrag auf die Wasseroberfläche. Bei stärkeren Winden entstehen somit schneller höhere Wellen. Sind in einem Gebiet Wellen entstanden, können diese tausende Kilometer zurücklegen, bis die transportierte Energie sich beispielsweise an einer Küste entlädt.



Abbildung 2: Wellen-Entstehung durch Windeinwirkung

## 2.2. Eigenschaften von Meereswellen

Eine Welle ist im Wesentlichen Energie, die durch das Wasser transportiert wird. Trifft die Welle auf Land oder andere Hindernisse, welche die ungestörte Ausbreitung verhindern, wird die transportierte Energie in Form von Wellenbrechen freigegeben. Aus der Physik bekannte Phänomene wie die Reflexion, Brechung und Beugung sind ebenfalls möglich [4].

Die Wellenbereiche

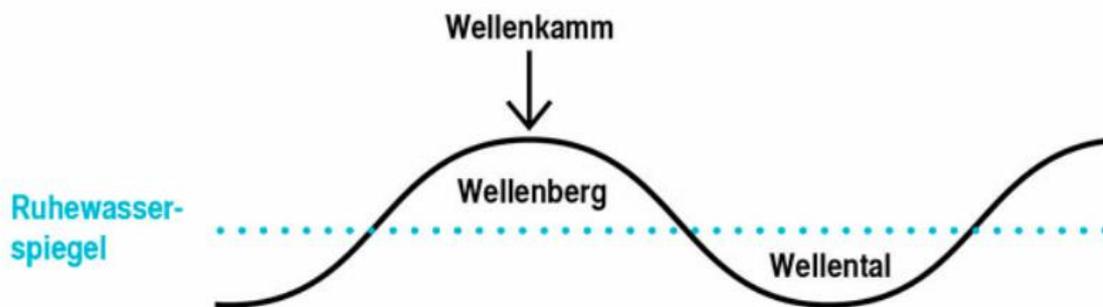


Abbildung 3: Bezeichnung der Wellenbereiche [56]

Die einzelnen Bereiche einer Welle werden wie folgt bezeichnet (vgl. Abb. 3):

- **Ruhewasserspiegel:** Ruhelage des Wassers, wenn keine Wellen vorhanden sind
- **Wellenkamm:** Der höchste Punkt einer Welle. Der Abstand von Wellenkamm und Ruhewasserspiegel entspricht der Amplitude der Welle
- **Wellenberg:** Als Wellenberg wird das Wasservolumen bezeichnet, welches sich oberhalb des Ruhewasserspiegels befindet
- **Wellental:** Bezeichnet das Luftvolumen, welches sich unterhalb des Ruhewasserspiegels befindet

Die Wellenform

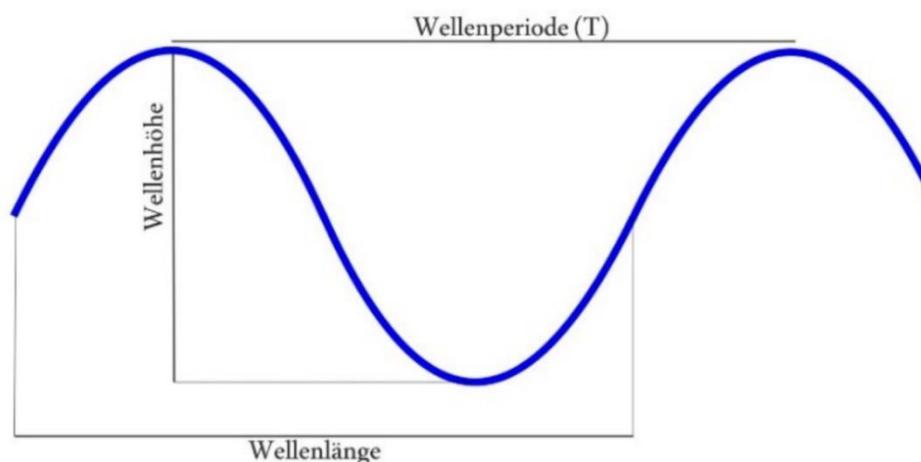


Abbildung 4: Bezeichnung der Welleneigenschaften [5]

Die Form einer Welle lässt sich durch folgende Eigenschaften beschreiben (vgl. Abb. 4):

- **Wellenhöhe:** Die Höhe zwischen Wellental und Wellenkamm
- **Wellenlänge:** Die Länge einer vollen Wellenbewegung
- **Wellenperiode:** Die Zeit für eine volle Wellenbewegung

## Grundlagen

- **Wellenfrequenz:** Diese lässt sich aus der Wellenperiode berechnen:

$$f = \frac{1}{T}$$

### Betrachtung der Wellenbewegung auf Molekularer Ebene

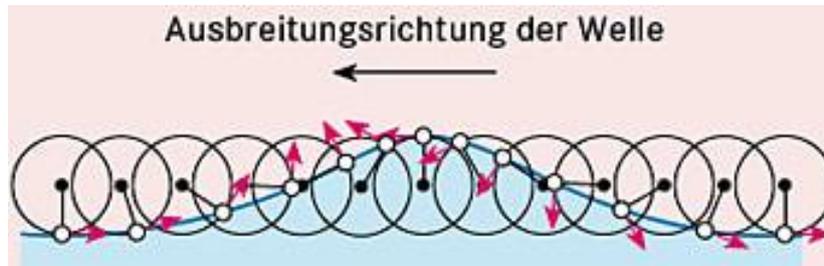


Abbildung 5: Bewegung der Wassermoleküle in einer Welle [6]

Wie erwähnt, transportiert eine Welle nur Energie. Die einzelnen Wassermoleküle führen in einer Welle eine kreisförmige Bewegung aus (vgl. Abb. 5). Die Höhenänderung des Wassermoleküls sorgt für eine stetige Änderung der potenziellen Energie. Die Geschwindigkeit, mit der das Wassermolekül sich bewegt, entspricht der kinetischen Energie. Diese Bewegung findet auch unterhalb der Wasseroberfläche statt. Dabei gilt: Mit zunehmender Wassertiefe wird die Kreisbewegung im Durchmesser immer kleiner (vgl. Abb. 6).

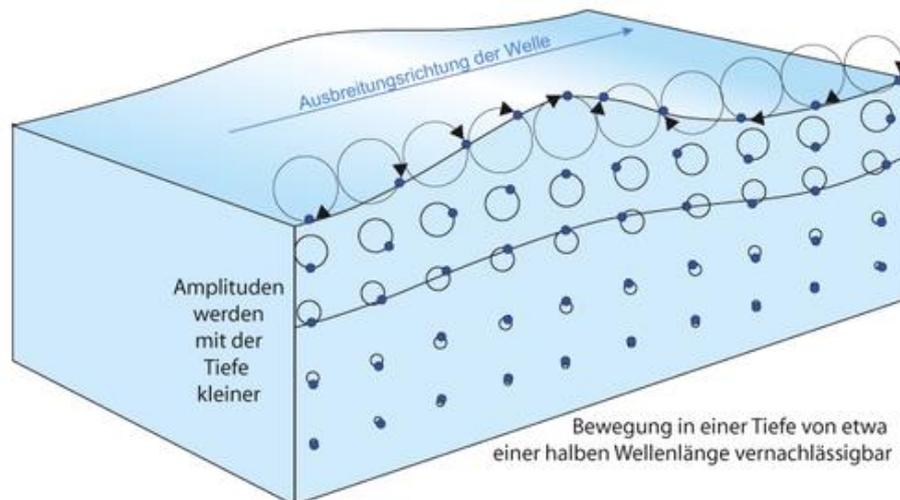


Abbildung 6: Bewegung der Wassermoleküle in verschiedenen Wassertiefen [7]

### Verhalten von Wellen bei ansteigendem Grund

Wenn Wellen auf Küstenbereiche treffen, werden diese durch den ansteigenden Meeresgrund beeinflusst. Die Verringerung der Wassertiefe bewirkt ein Abbremsen der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Dadurch verdichtet sich die transportierte Energie und sorgt somit für höhere Wellenberge. Entspricht die Wellenhöhe mehr als 14% der Wellenlänge, beginnt der Wellenkamm sich schneller fortzubewegen als der Rest der Welle. Es kommt zum Wellenbrechen (vgl. Abb. 7) [8].

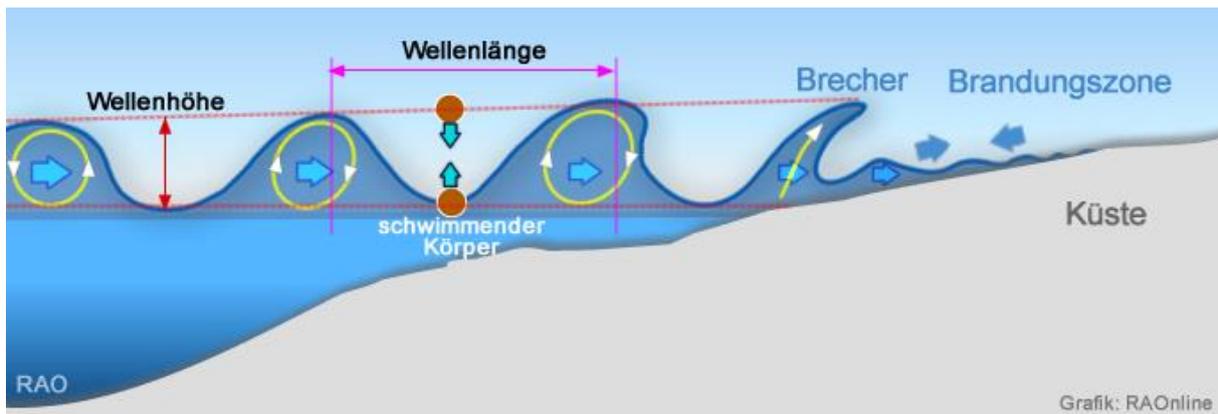


Abbildung 7: Verhalten von Wellen bei ansteigendem Grund [9]

### 2.3. Leistungspotential einer Welle

Um das Leistungspotential oder die Energie von Wellen zu bestimmen, gibt es zwei Möglichkeiten. Da die verschiedenen WEC- (Wave Energie Conversion) Systeme nur auf kleinen Flächen Energie aus Wellen beziehen, ist es sinnvoller die Leistung einer Welle pro Meter Wellenkamm zu betrachten. Erhöht sich die genutzte Fläche, kann auch die Energiedichte einer Fläche auf dem Wasser bestimmt werden.

Die Formel für die Leistung pro Meter Wellenkamm lautet [10]:

$$\frac{P}{l} = \frac{g^2 \rho}{32\pi} * H^2 * T$$

Die Erdbeschleunigung [ $g$ ] und die Dichte des Wassers [ $\rho$ ] sind ortabhängige Variablen. Wenn diese nicht bekannt sind, kann für  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$  und  $\rho = 1025 \frac{kg}{m^3}$  angenommen werden. Diese Formel bezieht sich auf die totale Wellenhöhe [ $H$ ], welche den Höhenunterschied zwischen Wellenberg und Wellental beschreibt. Bei Vorliegen der signifikanten Wellenhöhe [ $H_s$ ] muss diese erst umgerechnet werden.

$$H = \frac{H_s}{\sqrt{2}}$$

Als Beispiel wird eine typische Welle vor der Küste Schottlands betrachtet. Die Wellenhöhe [ $H$ ] beträgt durchschnittlich 2m. Die Wellenperiode [ $T$ ] beläuft sich auf 10s. Die Dichte des Meerwassers [ $\rho$ ] beträgt  $1025 \text{ kg/m}^3$  [10].

$$\frac{P}{l} = \frac{(9,81 \frac{m}{s^2})^2 * 1025 \frac{kg}{m^3}}{32\pi} * 2m^2 * 10s = 39,2 \frac{kW}{m}$$

## Grundlagen

Eine Welle mit diesen Eigenschaften besitzt also 39,4 kW Leistung pro Meter Wellenkammbreite. Erhöht sich die Wellenhöhe, so steigt die Wellenleistung quadratisch an (vgl. Abbildung 8) [10].

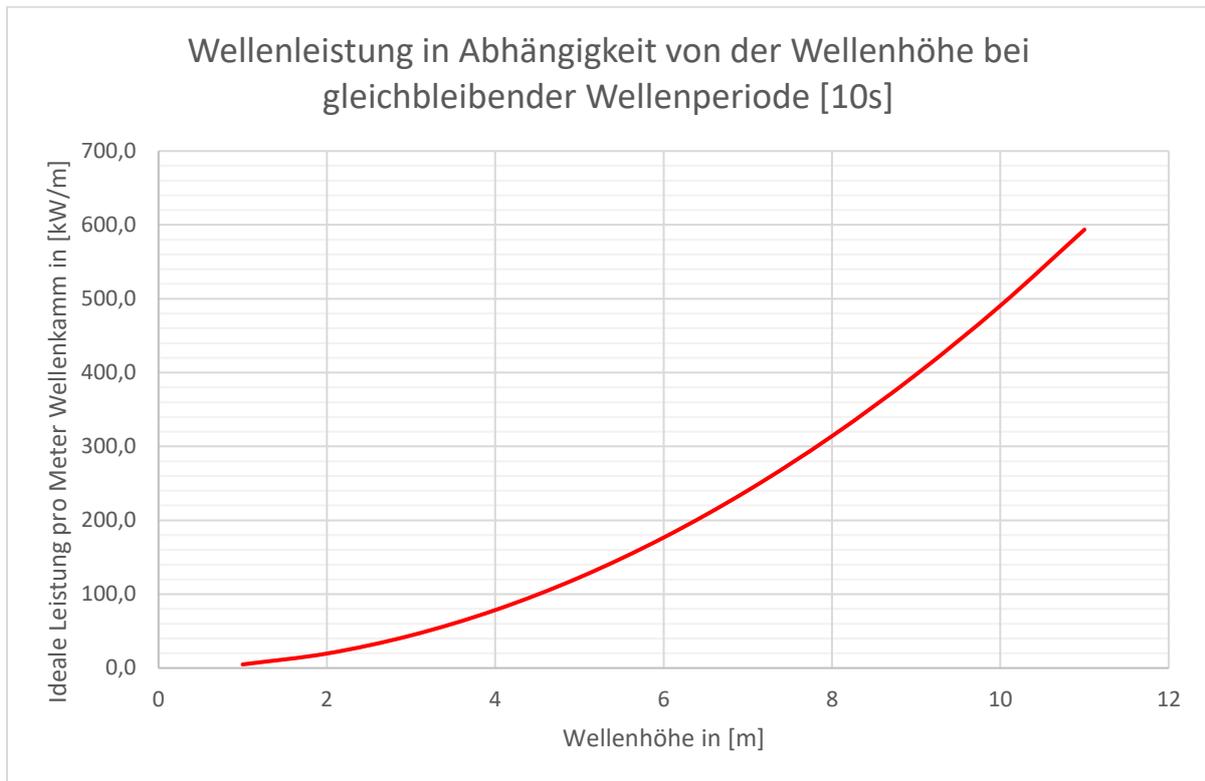


Abbildung 8: Leistung einer Welle in Abhängigkeit von der Wellenhöhe

Der Einfluss der Wellenperiode auf die Leistung verhält sich proportional (vgl. Abb. 9).

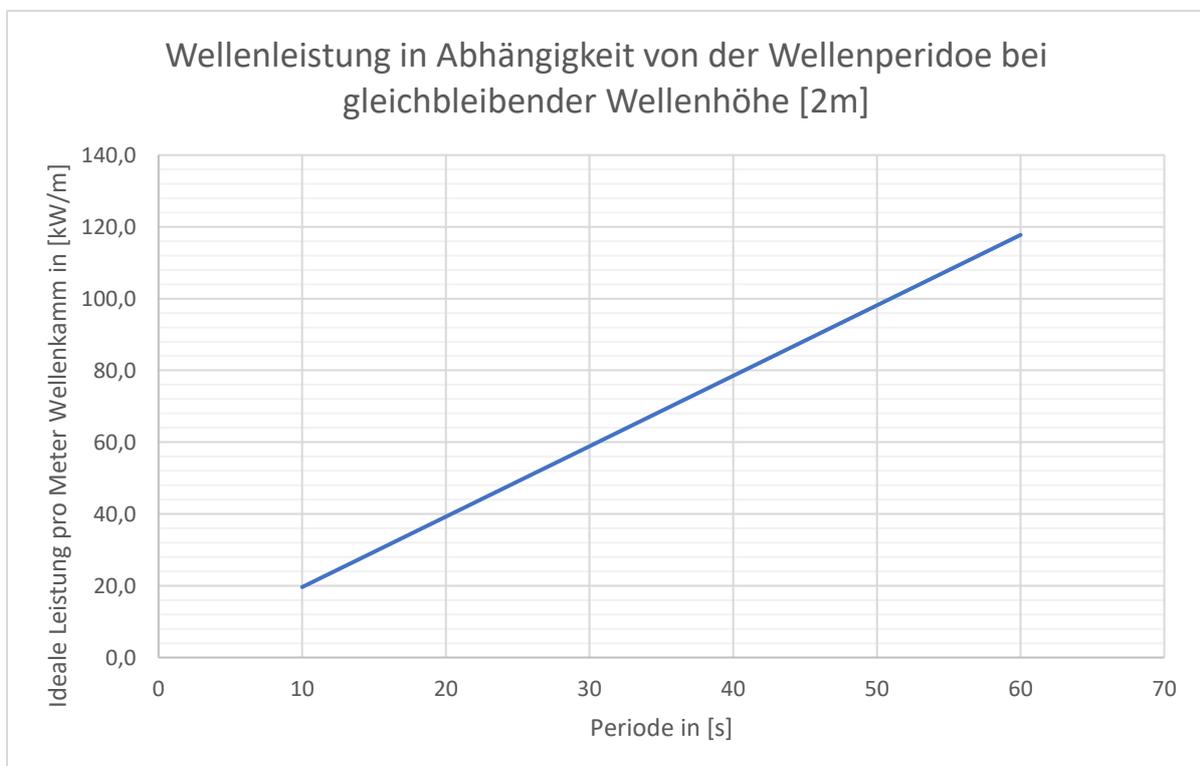


Abbildung 9: Leistung einer Welle in Abhängigkeit von der Wellenperiode

## 2.4. Bewegungsgleichung von Schiffen

Betrachtet wird ein Schiff mit einem konventionellen Antrieb über eine Schiffsschraube. Es sollen die Einflussfaktoren für die Geschwindigkeit eines Schiffes ermittelt werden.

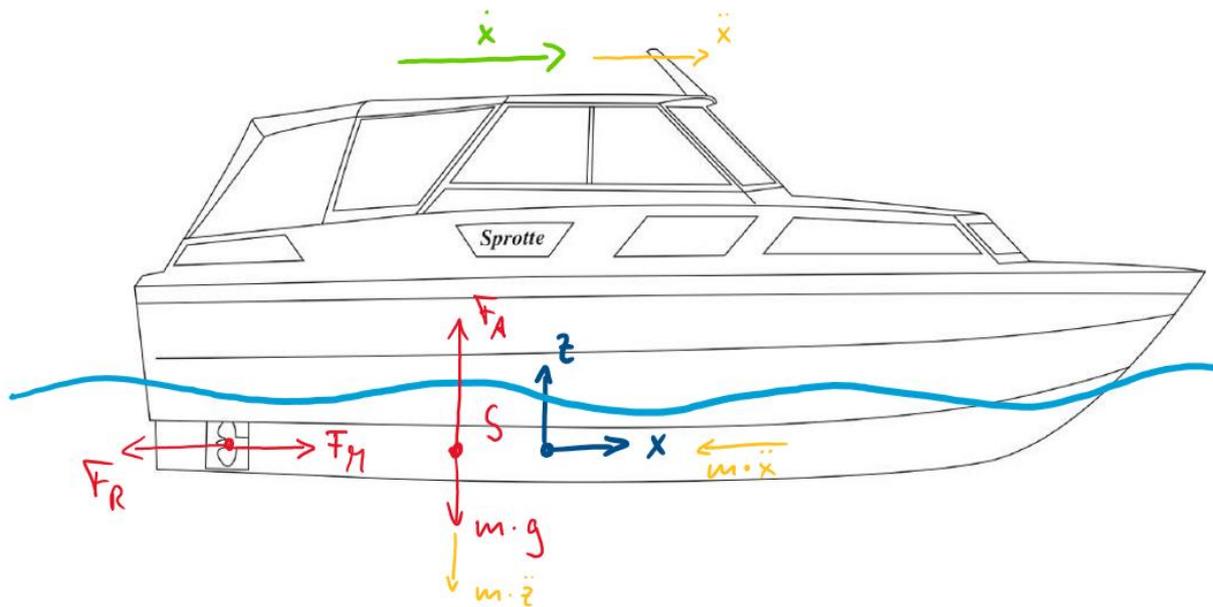


Abbildung 10: Kräfte an einem Boot [11]

Es gilt:

$$m * a = F_M - F_R$$

Die Reibkraft kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$F_R = \mu_{Rumpf} * v$$

$$m * a = F_M - \mu_{Rumpf} * v$$

Dadurch gilt bei konstanter Geschwindigkeit:

$$0 = F_M - \mu_{Rumpf} * v$$

Vereinfacht ausgedrückt ist die Geschwindigkeit eines Schiffes abhängig von der Antriebskraft und dem Reibwert des Rumpfes. In der Realität ist der Zusammenhang komplexer.

Ebenfalls müssen die mechanischen Zusammenhänge in vertikaler Richtung betrachtet werden:

Wenn das Schiff statisch im Wasser liegt (keine Wellen), gilt:

$$F_A = m * g$$

Die Auftriebskraft entspricht:

$$F_A = V_v * \rho - m_{uw}$$

Sobald Wellen auf den Schiffsrumpf wirken, ändert sich das verdrängte Wasservolumen jedoch ständig. Dadurch besteht kein Gleichgewicht der Kräfte und das Schiff beginnt sich zu bewegen:

$$V_{vs} * \rho - m_{uw} + \Delta V_v * \rho = F_A + \Delta F_A$$

$$F_A + \Delta F_A = m * g + m * \ddot{z}$$

## 2.5. Einfluss der Schiffsgröße auf das Verhalten bei Wellen

Die Maße eines Schiffes beeinflussen sein Verhalten bei Wellen. Während ein Boot mit einer Länge von 5m bereits bei kleinen Wellen in Bewegung gerät, liegt dabei ein Schiff mit einer Länge von 50m ruhig im Wasser und bewegt sich minimal. Verantwortlich für die Schiffsbewegung sind unter anderem die Wellenhöhe und die Wellenperiode. Generell wird in der Schifffahrt versucht, höhere Wellen mit dem Bug, also frontal, anzusteuern. Dadurch wirkt die Welle auf die Längsachse des Schiffes. Da Schiffe länger als breit sind, wird durch dieses Manöver die Schiffsbewegung minimiert. Treffen Wellen quer auf ein Schiff, gerät dieses deutlich mehr in Bewegung.

Es folgt ein Beispiel für das Bewegungsverhalten eines Schiffes bei verschiedenen Wellenperioden:

### Fall 1:

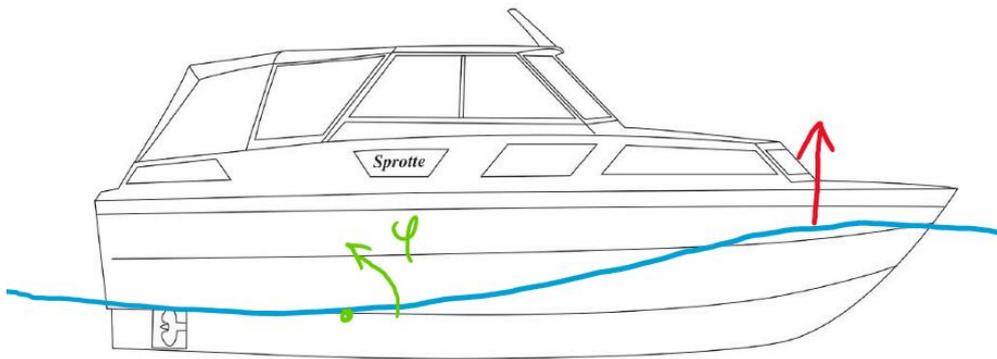


Abbildung 11: Einfluss von langen Wellen [11]

Die Wellenlänge ist länger als der Rumpf des Bootes. Dadurch entsteht, wenn das Boot in einen Wellenberg fährt, eine erhöhte Auftriebskraft am Bug. Als Reaktion auf diese Kraft entsteht ein Moment um den Schwerpunkt des Bootes, sodass der Bug nach oben gedrückt wird (vgl. Abb. 11). Wandert der Schwerpunkt des Bootes über den Kamm der Welle, kippt das Boot über den Wellenkamm und der Bug zeigt nach unten.

### Fall 2:

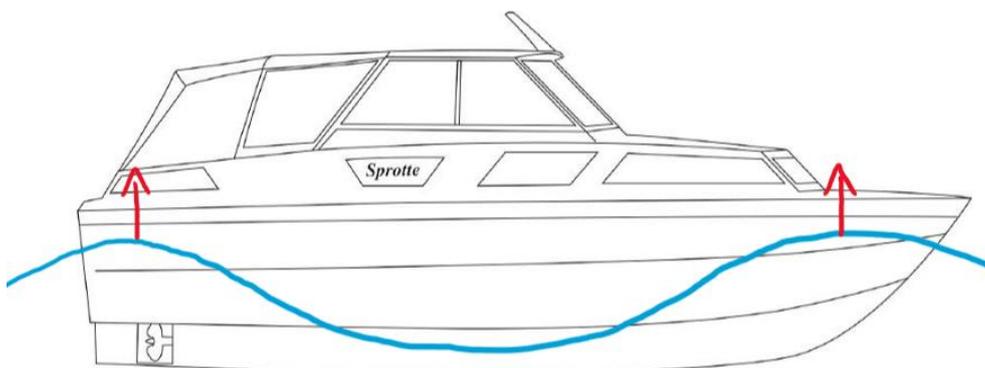


Abbildung 12: Einfluss von kurzen Wellen [11]

## Anforderungen

Die Wellenlänge ist annähernd gleich mit der Rumpflänge. Im Gegensatz zu Fall 1 durchfährt das Boot im gezeigten Zustand zwei Wellenberge gleichzeitig (vgl. Abb. 12). Das resultierende Moment um den Schwerpunkt fällt dementsprechend kleiner aus. Als Folge bewegt sich das Boot weniger als im Fall 1.

Das gezeigte Verhalten gilt nicht nur für Wellen, die in oder gegen die Fahrtrichtung verlaufen. Bei Wellen, welche seitlich oder in anderen Winkeln auf den Rumpf treffen, spielt die Breite des Schiffes ebenfalls eine Rolle.

### 3. Anforderungen

Soll ein Schiff mit einem System zur Energiegewinnung aus Wellen ausgestattet werden, gibt es bestimmte Anforderungen, die erfüllt werden müssen. Es ist zu erwarten, dass die verschiedenen Konzepte zur Energiegewinnung diesen Anforderungen in unterschiedlichem Maße erfüllen können.

#### 3.1. Wellenrichtung

Wellen können auf dem Meer grundsätzlich aus allen Richtungen kommen. Genau so kann die Fahrtrichtung von Schiffen, bezogen zur Wellenausbreitungsrichtung, variieren. Deswegen ist es von besonderer Wichtigkeit, dass Wellenenergiesysteme möglichst alle Wellenausbreitungsrichtungen zur Energieerzeugung nutzen können.

#### 3.2. Reibung mit Wasser und Luft

Die Rümpfe heutiger Schiffe sind in ihrer Rumpfform strömungsoptimiert. Dies bedeutet, dass bei der Fahrt durch das Wasser, der Energieverlust durch die Reibung so minimal wie möglich gehalten wird. Dadurch lässt sich der Kraftstoffverbrauch senken. Ähnliches gilt auch für die Aufbauten auf Schiffen. Sind diese aerodynamisch gestaltet, so wird der Luftwiderstand des Schiffes reduziert. Dies kommt heutzutage gerade bei hoch aufbauenden Schiffen wie Kreuzfahrtschiffen zum Tragen.

Wenn ein Schiff mit einem System zur Energiegewinnung aus Wellen ausgerüstet wird, bedeutet dies immer bauliche Änderungen oder Anbauten an am Schiffsrumpf. Durch die Änderungen wird der Wasserwiderstand des Rumpfs erhöht.

Es besteht die Gefahr, dass die aus wirtschaftlichen Gründen erforderlichen Zielgeschwindigkeiten durch die zusätzliche Reibung nicht erreicht werden können, da die Antriebsleistung nicht ausreichend ist. Zusätzlich muss an dieser Stelle unbedingt darauf geachtet werden, dass Schiffe durch Faktoren wie Zuladung oder auch die Nutzung von Ballasttanks, verschiedene Lagen im Wasser haben. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Reibungsverluste zum Wasser und an die Luft. Ein gutes Beispiel hierfür, sind Öltanker:



Abbildung 14: Die „Sirius Star“ im beladenen Zustand [49]



Abbildung 13: Die „Sirius Star“ im unbeladenen Zustand [62]

## Anforderungen

In Abbildung 14 ist ein beladenes Tankschiff dargestellt. Der größte Teil des Rumpfes befindet sich unter der Wasseroberfläche. In der linken Abbildung 13 ist das gleiche Tankschiff im leeren Zustand dargestellt. Hier sieht man deutlich, dass der Tiefgang des Schiffes durch sein minimiertes Gewicht deutlich geringer ist. Dadurch gibt es weniger Rumpffläche, die im Kontakt zum Wasser steht. Folglich wird die Wasserreibung geringer ausfallen als in Abbildung 14. Zwar wird bei dem unbeladenen Tanker der Wasserwiderstand durch die verringerte Kontaktfläche mit dem Wasser minimiert, im Gegenzug vergrößert sich jedoch die Angriffsfläche für Windeinwirkungen.

### 3.3. Geschwindigkeit

Wie im Kapitel 2.4 „Bewegungsgleichungen von Schiffen“ hergeleitet wurde, hat der Reibwert des Schiffsrumpfes, wie auch die Antriebskraft, einen direkten Einfluss auf die maximale Geschwindigkeit des Schiffes.

Je höher die Sollgeschwindigkeit eines Schiffes, desto höher ist auch sein Energiebedarf. Da die Konzepte aber nur begrenzt Energie zur Verfügung stellen können, werden die erreichbaren Geschwindigkeiten dementsprechend geringer ausfallen. Derzeit sind in der Schifffahrt je nach Schiffstyp Geschwindigkeiten von 15 – 25 Knoten üblich [12]. Um diese Geschwindigkeiten zu erreichen, kann es sinnvoll sein, neben einem WEC-System eine weitere Energiequelle zu nutzen.

### 3.4. Energiegewinn und Energiebilanz

Mit der Energiebilanz soll das Verhältnis von Energiegewinn durch Wellen, zu Energieverlust durch den Wasserwiderstand dargestellt werden. Es gilt:

$$b = \frac{\text{Energieproduktion}}{\text{zusätzliche Reibungsenergie}}$$

Solange  $b > 1$  ist, kann das Schiff beschleunigen und somit seine Geschwindigkeit erhöhen. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit, wird  $b = 1$  sein. In diesem Zustand hat das Schiff seine maximale Geschwindigkeit erreicht. Sollte es dazu kommen, dass  $b < 1$  ist, wird sich das Schiff verlangsamen, bis sich ein Energiegleichgewicht hergestellt hat.

### 3.5. Die Schiffsbewegung unter dem Einfluss von Wellen

Bei Systemen, die Energie aus der Relativbewegung des Schiffes zur Wasseroberfläche gewinnen, ist es erstrebenswert, dass diese Bewegung so groß wie möglich ausfällt. Da in diesem Fall die Rumpflänge und die Wellen, die im Betriebsbereich zu erwarten sind, eine entscheidende Rolle spielen, sollte dies bei der Auslegung des Rumpfes beachtet werden. So ist das Fallbeispiel 1 (Kap.2.5) für diese Art der Systeme nicht geeignet, da die Bewegung des Schiffes nahezu parallel zur Wasseroberfläche stattfindet. Im Fallbeispiel 2 (Kap.2.5) ist die Relativbewegung des Bootes zu der Wasseroberfläche größer und ein dementsprechendes System könnte die Bewegung zur Energieerzeugung nutzen.

### 3.6. Nutzung der erzeugten Energie

Es wird nicht mit allen Konzepten möglich sein, genug Energie zu erzeugen, um jedes Schiff mit der gewünschten Geschwindigkeit zu bewegen. Deswegen werden fünf Abstufungen festgelegt, inwieweit das WEC-System das Schiff beeinflusst.

#### 1. WEC-System als Hauptantrieb

Die aus Wellen gewonnene Energie ist allein für den Vortrieb des Schiffes verantwortlich. Im Regelbetrieb ist kein zusätzliches System vonnöten. Dadurch wird die Komplexität des Antriebes und die Kosten für die Installation geringgehalten.

### 2. Teilfossile Hybridsysteme mit WEC-System als Hauptantrieb

Das Schiff bewegt sich hauptsächlich durch das WEC-System. In beruhigten oder wellenarmen Situationen (ruhige See, Binnengewässer oder Anlegemanöver) greift ein konventioneller Antrieb unterstützend oder auch komplett ein. Seine Leistungsfähigkeit kann dementsprechend gering ausgelegt werden.

### 3. Teilfossile Hybridsysteme mit WEC-System als Nebenantrieb

Dieses Konzept würde vor allem auf Schiffe zutreffen, welche mit einem WEC-System nachgerüstet werden. Das Schiff besitzt einen konventionellen Hauptantrieb. Das WEC-System unterstützt dabei den Vortrieb des Schiffes und senkt somit den Treibstoffverbrauch. Eine Fahrt allein durch das WEC-System wäre zwar technisch möglich, jedoch unwirtschaftlich.

### 4. Klimaneutrale Hybridsysteme

Neben einem WEC-System nutzt das Schiff noch andere klimaneutrale Technologien. Möglich wären zum Beispiel:

#### ○ Segel

Segel waren bis in die Anfänge des 20ten Jahrhunderts noch eine der meistgenutzten Vortriebs-Möglichkeiten auf Schiffen. Das Potential von Segeln sollte auch heute nicht unterschätzt werden: Schiffe wie das Hamburger Museumsschiff „Peking“ erreichten mit einer Länge von 115 Metern und einem Verdrängungsgewicht von 6280 Tonnen, Geschwindigkeiten um die 17 Knoten (31 km/h) (vgl. Abb. 15). Durch die Ergänzung mit einem WEC-System könnte diese Geschwindigkeit weiter erhöht werden [13].



Abbildung 15: Ein Schwesterschiff der „Peking“, die „Kruzenshtern“ unter Segeln [14]

#### ○ Rumpfsegler

Rumpfsegler nutzen ihre Rumpfform, um zu segeln (vgl. Abb.16). Dabei handelt es sich um eine neue Technologie, welche noch viel Forschungspotential aufweist. Bei einem Rumpfsegler sollte, um ein Kentern zu verhindern, auf eine Bauweise als Katamaran oder Trimaran zurückgegriffen werden.



Bild: Vindskip AS

Abbildung 16: Darstellung eines möglichen Rumpfseglers [15]

○ Flettner Rotoren

Flettner Rotoren sind große, rotierende Säulen, die auf einem Schiff angebracht werden. Sie nutzen den Magnus-Effekt, um eine Vortriebskraft zu erzeugen. Der Magnus-Effekt kommt zum Tragen, wenn sich ein rotierender Körper in einer Luftströmung befindet.

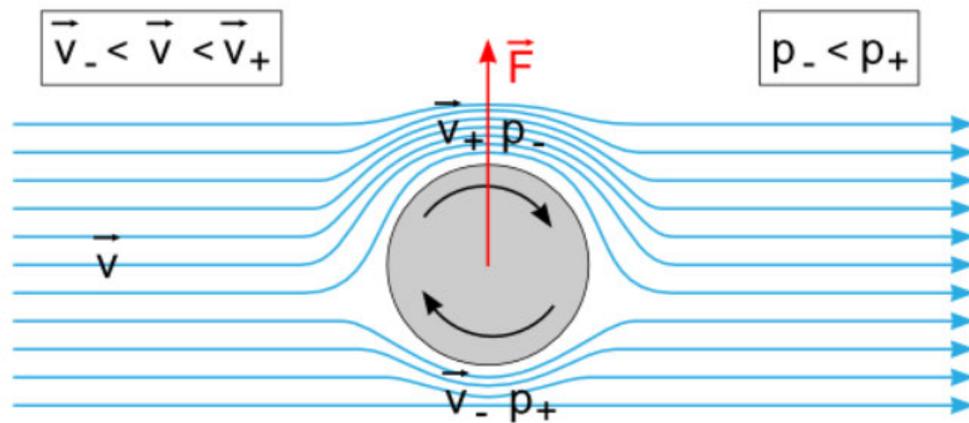


Abbildung 17: Darstellung des Magnus-Effekts [16]



Abbildung 18: Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise von Flettnerrotoren auf einem Schiff [60]

## Anforderungen

Abbildung 17 zeigt das Prinzip des Magnus-Effekts an Flettnerrotoren. Die obere Hälfte des runden Körpers dreht sich mit der Luftbewegung und beschleunigt diese. Dadurch fällt der Luftdruck über dem Körper ab. Unter dem Körper geschieht das Gegenteil. Hier ist die Drehrichtung der Strömung entgegengerichtet. Folglich wird die Strömung abgebremst und es entsteht ein Überdruck. Beide Druckänderungen zusammen sorgen für eine resultierende Kraft, die den Körper nach oben zieht. Diese Technologie wird bereits seit dem Anfang des 20ten Jahrhunderts erforscht. Einige Schiffe nutzen bereits dieses System, um ihren Treibstoffverbrauch zu senken. Die Funktion des drehenden Körpers übernehmen dabei rotierende Säulen.

### ○ Solarkollektoren

Die Verwendung von Solarkollektoren auf Schiffen ist je nach vorhandener oder nutzbarer Deckfläche und Sonnenstrahlungsintensität des Einsatzgebietes sinnvoll, um die Leistung des Gesamtsystems zu erhöhen. Die Nutzung von Solarenergie zum Antrieb von Schiffen wurde bereits mehrfach umgesetzt (vgl. Abb. 19) (vgl. Kapitel 4.2.4) [17].



Abbildung 19: Der Katamaran "Tûranor PlanetSolar" [17]

### ○ Kite Drachen

Die Verwendung von Kite Drachen zur Verringerung des Kraftstoffbedarfs durch Nutzung der Windenergie wird bereits kommerziell genutzt (vgl. Abb.20). Dieses System bietet sich auch an, um ein Schiff mit WEC-Antrieb zusätzlich zu beschleunigen. Bei der Kombination der beiden Systeme muss darauf geachtet werden, wie der Drachen die Schiffsbewegung und somit eventuell das WEC-System, beeinflusst.



Abbildung 20: Ein Schiff mit Kitedrachen beim Setzen/ Einholen [18]

## Anforderungen

- **Brennstoffzellen**  
Brennstoffzellen können die Energieproduktion auf einem Schiff ergänzen. Wird Wasserstoff verwendet, der aus erneuerbaren Energiequellen produziert wurde, bleibt das Gesamtsystem klimaneutral.
- **Batteriebetrieb**  
Auf kurzen bis mittleren Strecken ist es möglich, ein Schiff über Batterien zusätzlich mit Energie zu versorgen.

Je nach Nutzung und Aufbau eines Schiffes können auch mehr als zwei Systeme in einem Schiff integriert werden [19].

### 5. WEC-System zur Energieversorgung

Das System liefert in diesem Fall keine Energie für den Vortrieb des Schiffes. Moderne Schiffe und Boote nutzen viel elektrisches Equipment, um den Betrieb so sicher, wirtschaftlich und komfortabel wie möglich zu gestalten. Bei Containerschiffen oder Kreuzfahrtschiffen kann der Energiebedarf für die Bordsysteme einen Großteil des Gesamtenergiebedarfs ausmachen. Bei einem Kreuzfahrtschiff beträgt der Energiebedarf der Bordsysteme beispielsweise 40-60% des Gesamtenergiebedarfs [20]. Ebenfalls verbraucht ein Kreuzfahrtschiff mit 2000 Passagieren bei einer 10-stündigen Liegezeit rund 40000 kWh Energie [21]. Hauptstromverbraucher bei diesen Schiffen ist die Klimatisierung der Kühlcontainer bzw. der Passagierräume. Die dafür benötigte Energie kann durch Generatoren mit dem Hauptantriebsmotor erzeugt werden. Üblich ist auch die Verwendung von vorgesehenen Dieselgeneratoren. Diese sind deutlich kleiner als der Hauptantriebsmotor. Je nach Strombedarf werden die Dieselgeneratoren zu- und abgeschaltet.

Wenn ein WEC-System installiert ist, kann dieses auch rein für die Energieversorgung der Bordsysteme genutzt werden. Dadurch würde sich der Verbrauch von fossilen Brennstoffen senken und folglich auch weniger Schadstoffe ausgestoßen werden.

## 3.7. Einsatzgebiete

Schiffe werden immer für einen gezielten Einsatz konstruiert. Dementsprechend variieren auch die Anforderungen an den Antrieb und die Energieversorgung eines Schiffes. Wie in Kap 2.3 gezeigt, ist die Wellenhöhe entscheidend für die mögliche Energieproduktion. Dadurch ist ein Einsatz auf Binnengewässern, bis auf wenige Ausnahmen, nicht möglich. Beim Einsatz in Küstennähe muss damit gerechnet werden, dass beispielsweise bei ablandigem Wind nur kleine Wellen entstehen. Andersherum können sich bei auflandigem Wind die Wellen durch den ansteigenden Grund höher auftürmen als auf dem offenen Meer (Kap 2.2). Da Wellen in Küstennähe für stationäre Wellenenergiesysteme genutzt werden, gibt es von den jeweiligen Betreibern Karten, welche die effektivsten Nutzungsgebiete zeigen.

Auch auf den offenen Meeren herrschen nicht überall dieselben Bedingungen. Da Wellen durch Wind entstehen, sind Meeresbereiche, die unter dem Einfluss von erhöhtem Windaufkommen stehen, besser für WEC-Systeme geeignet. Analog zu den Küstenregionen gibt es auch Meeresgebiete, in denen die Wellen beispielsweise durch die Untiefen höher ausfallen. Dementsprechend muss ein WEC-System auf einem Schiff für die zu erwartenden Wellenhöhen angepasst sein.

## 3.8. Wirtschaftlichkeit

In die Wirtschaftlichkeit eines Systems fließen mehrere Faktoren ein. Um ein WEC-System wirtschaftlich zu gestalten, muss es neben dem fehlenden Schadstoffausstoß weitere Vorteile geben.

## Anforderungen

### Installation

Der Aufwand und die Kosten für die Installation eines WEC Systems sind zu minimieren. Ein Schiff kann direkt mit einem WEC System geplant und gebaut werden. Da Nachhaltigkeit auch auf Recycling und Wiederverwertung bestehender Produkte aufbaut, sollte das Nachrüsten von WEC-Systemen auf Schiffen von besonderer Priorität sein.

### Betriebskosten

Da die Energie von Wellen genutzt wird, entstehen keine Kosten für Treibstoff. Bei hybriden Systemen, die in Kombination mit einem konventionellen Antrieb arbeiten, bleiben Kosten für Treibstoffe bestehen. Es kommen ebenfalls Kostenfaktoren wie zusätzliches Betriebspersonal für das WEC-System, erhöhte Liegeplatzkosten durch geänderte Schiffsmaße, etc. dazu.

### Wartungskosten

Wartungskosten sind minimal zu halten. Üblicherweise wird für die Wartung entsprechend geschultes Personal benötigt. Bei Systemen mit mechanischen, hydraulischen und elektrischen Komponenten müssen Verschleißteile getauscht werden. Aspekte wie die Korrosionsbeständigkeit, mögliche Sturmschäden und der Wechsel von Flüssigkeiten müssen regelmäßig kontrolliert werden.

### Lebenserwartung

WEC-Systeme sollten stabil und langlebig sein. Um wirtschaftlich zu sein, muss ein System mindestens funktionieren, bis sich die Investition für den (Um-)Bau refinanziert hat.

## 3.9. Sicherheit

Das WEC-System darf die Sicherheit des Schiffes nicht negativ beeinflussen. Neben dem Schutz des Personals vor der Anlage selbst, ist diese Anforderung hauptsächlich auf das Verhalten des Schiffes bei Stürmen mit sehr hohen Wellen bezogen. Auch andere Gefahren wie Grundkontakt, Eis oder Kollisionen müssen berücksichtigt werden.

## 3.10. Mögliche Umwelteinflüsse

Ein WEC-System sollte im besten Fall die Umwelt nicht negativ beeinflussen. Zu den Gefahren für die Umwelt gehören zum Beispiel:

- Austretende Betriebsflüssigkeiten wie Hydrauliköl
- Verlust von Schiffsbauteilen
- Gefahren für Meereslebewesen
- Erhöhte Geräuschemissionen innerhalb und außerhalb vom Wasser

## 3.11. Optimierungspotential

Derzeitig befinden sich viele Konzepte zur Nutzung von Wellenenergie noch in der Entwicklung. Wenn Unternehmen aktuell einen Prototypen testen, entspricht dessen Energieproduktion dabei nur einem Teil der später angedachten Leistung.

Für die Zukunftschancen eines Konzeptes ist es von Vorteil, wenn es ausreichend Leistung produziert und gleichzeitig ausreichend Möglichkeiten bietet, um es weiter zu optimieren und an die entsprechenden Schiffseigenschaften anzupassen.

## 4. Aktuell genutzte Konzepte zur Nutzung von Wellenenergie

### 4.1. Surfen / Wellenreiten



Abbildung 21: Ein Surfer beim Wellenreiten [47]

Das Surfen von Wellen ist wohl das bekannteste Konzept zur Fortbewegung durch die Energie von Wellen (vgl. Abb. 21). Dabei wird ein Surfbrett genutzt, um mit Hilfe der Hangabtriebskraft an der steigenden Flanke eines Wellenbergs auf dem Wasser zu gleiten.

Weniger bekannt ist die Sportart „Surf-Boat-Rowing“. Dabei wird ein Ruderboot mit mehreren Personen genutzt, um Wellen zu reiten (vgl. Abb. 22). Generell geht es bei dieser Sportart darum, so schnell wie möglich vom Strand aus durch die Brandung zu einer Markierung zu paddeln, dort umzukehren, um dann mit einer Welle zurück zum Strand zu surfen [22].



Abbildung 22: Ein Surfboat beim Wellenreiten [67]

#### 4.1.1. Voraussetzungen an die Wellen

Um Wellen surfen zu können, müssen diese dafür geeignet sein. Gesurft werden Wellen nur im Küstenbereich, wenn diese auf den ansteigenden Meeresspiegel stoßen. Dabei werden sie abgebremst und der Wellenberg erhöht sich. (Kap.2.2) Faktoren für die Form und das Brechen der Wellen sind:

##### - Der Ursprung der Welle:

Auf dem offenen Meer nehmen größere Wellen die Energie von kleineren Wellen auf und lösen diese somit auf. Je weiter Wellen auf dem Meer wandern desto gleichmäßiger bilden sich Wellenmuster. Zusätzlich gilt: je länger eine Welle auf dem Meer wandert, desto mehr Energie

ist in ihr gespeichert. Für das Surfen ist eine klare Wellenform mit ausreichend Abstand zur nächsten Welle ideal.

- **Die Meerestiefe:**  
Gesucht ist ein gleichmäßig ansteigender Grund. In manchen Fällen werden auch Wellen durch den Meeresgrund umgelenkt und konzentrieren sich auf ein kleines Gebiet
- **Art und Oberfläche des Untergrundes:**  
Ein gleichmäßiger Untergrund sorgt für ein gleichmäßiges Abbremsen und damit für einen vorhersehbaren Verlauf der Welle.
- **Gezeiten und Strömungen:**  
Diese können Wellen in ihren Eigenschaften beeinflussen oder auch eigene Wellen erzeugen. Ist die Strömungsrichtung der Ausbreitungsrichtung der Welle entgegengerichtet, sind auch relativ zum Grund stehende Wellen möglich
- **Wind:**  
Ist der Wind der Welle entgegengerichtet (ablandiger Wind) kann sich der Wellenberg höher aufbauen, bevor er bricht. Dies kann aber nur in seltenen Fällen genutzt werden, da der ablandige Wind im Normalfall für eine ablandige Ausbreitungsrichtung der Wellen sorgt.  
[23]

### 4.1.2. Anforderungen an das Surfbrett / Boot

#### **Einstieg in die Welle:**

Um das Surfen einzuleiten, muss sich das Surfbrett / Boot mit annähernder Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der steigenden Flanke des Wellenberges positionieren. Diese Geschwindigkeit wird im Fall des Surfbrettes durch ein Paddeln mit den Armen erreicht. Bei den Surfbooten werden Ruder benutzt. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle zu schnell, werden Surfer auch oft mit der Hilfe eines Jetskis auf die richtige Geschwindigkeit und Position gezogen.

#### **Gleiteigenschaften:**

Beim Surfen einer Welle mit einem Surfbrett werden Geschwindigkeiten erreicht, die mindestens der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle entsprechen. Bei diesen Geschwindigkeiten gleitet das Surfbrett oder auch das Boot über die Wasseroberfläche. Grund hierfür ist die Trägheitskraft des Wassers, welche bei der Verdrängung auftritt. Diese drückt das Brett aus dem Wasser heraus und sorgt somit für das Aufschwimmen. Als Folge dessen verkleinert sich die Kontaktfläche zum Wasser, und somit die Reibung, erheblich. Dabei spielt die Formgebung des Brettes / Rumpfes eine wichtige Rolle. Sie ist entscheidend dafür, ob ein Schwimmkörper überhaupt Gleitfahrt erreichen kann.

#### **Gewichtsverlagerung:**

Sowohl beim Surfen als auch beim „Surf-Boat-Rowing“ ist es wichtig, die Gewichtsverteilung beim Surfen zu kontrollieren. Während es bei der reinen Verdrängungsfahrt durch das Wasser optimal ist, den Schwerpunkt des Bootes mittig zu halten, muss für den Übergang zur Gleitfahrt der Schwerpunkt in Richtung des Hecks verlagert werden, um ein Aufschwimmen des Bugs zu erleichtern. Während der Gleitfahrt kann der Schwerpunkt des Bootes wieder weiter nach vorne verlagert werden. Surfer ändern ihren Schwerpunkt über die Positionierung des Körpers auf dem Surfboard. Beim „Surf-Boat-Rowing“ sorgt ebenfalls die Positionierung der Besatzung für die nötige Gewichtsverlagerung. Bei Sportbooten, die für die Gleitfahrt ausgelegt sind, wird die Verlagerung des Schwerpunktes über die Änderung des Propellerwinkels oder über Trimmplatten erzeugt.

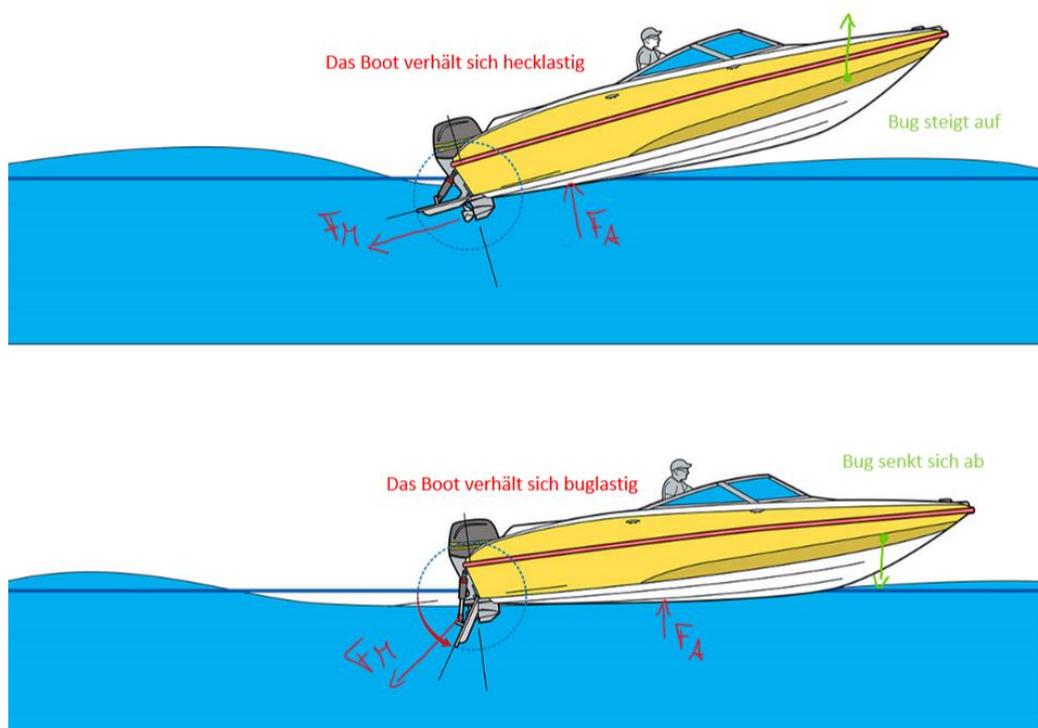


Abbildung 23: Einfluss verschiedener Trimmwinkel auf das Boot [57]

#### 4.1.3. Gefahren beim Wellenreiten

Das Surfen von Wellen gilt im Allgemeinen als Extremsportart. Es besteht unter anderem die Gefahr der Kollision mit Objekten unter Wasser oder auch dem eigenen Surfbrett. Im Fall von Booten besteht die Gefahr, dass der Bug des Bootes in das Wasser eintaucht. Durch den Wasserwiderstand wird der Bug abgebremst. Als Folge kann das Heck des Bootes außer Kontrolle geraten, das Boot sich quer zur Welle stellen und letztendlich kentern. Bekannte Beispiele hierfür passieren häufig in Flussmündungen. Hier entstehen durch das Aufeinandertreffen von Flusströmung und Ozean große Wellen, bei der Boote ins Surfen geraten können.

Außerdem muss sich das Boot auch entgegen der Wellenausbreitungsrichtung bewegen können. Das Überqueren einer Brandungszone gegen die Wellen ist ebenfalls gefährlich. Es ist nicht unüblich, dass Personen oder Objekte durch starke vertikale Beschleunigungen von Bord geworfen werden.

#### 4.1.4. Nutzung auf Flüssen



Abbildung 24: Surfen der Gezeitenwelle auf dem Fluss Severn in England [50]

Auf manchen Flüssen entstehen beim Einsetzen der Flut sogenannte Flutwellen, welche sich kilometerweit den Flussverlauf hinauf ausbreiten können. Unter den richtigen Bedingungen ist es möglich, diese Wellen zu Surfen und somit längere Strecken zurückzulegen (vgl. Abb. 24). Dieses Phänomen ist allerdings von mehreren Faktoren abhängig. Dazu zählen:

- Die Position des Mondes und die damit zusammenhängende Stärke der Tide
- Der Wasserstand des Flusses
- Die Strömungsgeschwindigkeit des Flusses
- Das Flussgefälle
- Die Wahrscheinlichkeit der Kollision mit Fremdkörpern im Wasser wie Baumstämmen etc.
- Gewässertypische Hindernisse wie Schleusen, Wehre, Wasserfälle etc.

### 4.1.5. Nutzung auf dem Meer

Auch auf dem Meer kann es in der Theorie sinnvoll sein, mit einem Schiff Wellen zu reiten, um mit der Hangabtriebskraft Energie zu sparen. Dafür müssen jedoch folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Definierte, homogene oder gleichförmige Wellen/Muster. Dadurch könnte sich ein Schiff kontrolliert auf der steigenden Flanke einer Welle positionieren. Dabei dürfen sich Wellen nicht gegenseitig kreuzen.
- Die Wellen sollten sich möglichst lange klar getrennt voneinander ausbreiten. Wenn Wellen sich gegenseitig überholen oder sich zusammenfassen, wird das Surfen unterbrochen.
- Die Fahrrichtung des Schiffes muss in etwa der Ausbreitungsrichtung der Wellen entsprechen
- Die steigende Wellenflanke muss steil genug sein, um eine ausreichend große Hangabtriebskraft entstehen zu lassen
- Der Schwerpunkt des Schiffes muss aktiv getrimmt werden

**Eine Bewertung anhand der gestellten Anforderungen befindet sich im Anhang A.**

### 4.1.6. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen

#### **Stärken:**

- Hohe Geschwindigkeiten in Gleitfahrt
- Auf bestimmten Flüssen können auf den Gezeitenwellen längere Strecken zurückgelegt werden

#### **Schwächen:**

- Es wird ein zusätzlicher Antrieb benötigt
- Aktives Trimmen des Bootschwerpunktes benötigt
- Explizite Anforderungen an die Wellen
- Auf dem offenen Meer nicht getestet
- Derzeit eingestuft als Extremsportart

### 4.1.7. Optimierungspotential

Es sollte in Zukunft möglich sein, Boote zu konstruieren, die extra für das Surfen von Wellen optimiert sind. Diese sind größter Wahrscheinlichkeit nach wie bisher nur als Sportgeräte nutzbar. Um dieses Konzept für wirtschaftliche Zwecke nutzen zu können, müssen Wege gefunden werden, das Surfen von Wellen sicherer zu gestalten. Das Risiko von Verletzungen und dem Überschlagen des Bootes sind derzeit zu hoch. Des Weiteren sollte die Erforschung von Wellen auf dem offenen Meer hinsichtlich ihrer Eignung zum Surfen vorangetrieben werden.

### 4.1.8. Zukunftspotential

Das Wellenreiten wird derzeit nur als Sportart genutzt. Es ist nicht absehbar, inwieweit diese Art der Fortbewegung in Brandungsbereichen wirtschaftlich genutzt werden kann. Für die Nutzung auf dem Meer müssen die dort herrschenden Wellenbedingungen bekannt und erforscht und vorhersehbar bzw. kalkulierbar sein. Erst dann ist eine Aussage möglich, ob diese Wellen effizient gesurft werden

## Aktuell genutzte Konzepte zur Nutzung von Wellenenergie

können. Vorstellbar ist, dass Wellen unter Sturmbedingungen ein klares Muster zeigen. Wellenhöhen von 5 Meter und mehr könnten eventuell auch von größeren Booten (~20m Länge) zum Surfen genutzt werden. Das erhöhte Risiko des Kenterns bleibt jedoch bestehen.

### 4.2. Antrieb durch bewegliche Finnen

Konzepte, die Finnen Unterwasser nutzen, um die kinetische Energie einer Welle für den Vortrieb zu nutzen, gibt es schon seit dem 19ten Jahrhundert. Als Inspiration dieser Technik dienten Wale, die sich mit ihrer horizontal zur Wasseroberfläche liegenden Schwanzflosse fortbewegen (vgl. Abb. 25).

#### 4.2.1. Aufbau

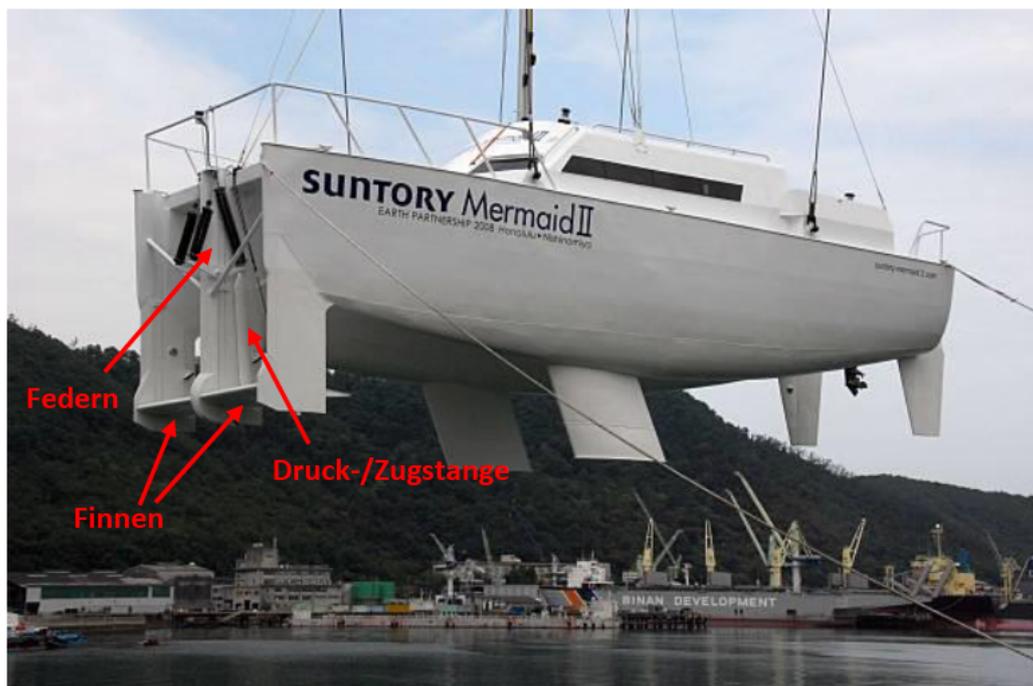


Abbildung 25: Die „Suntory Mermaid II beim kranen [58]

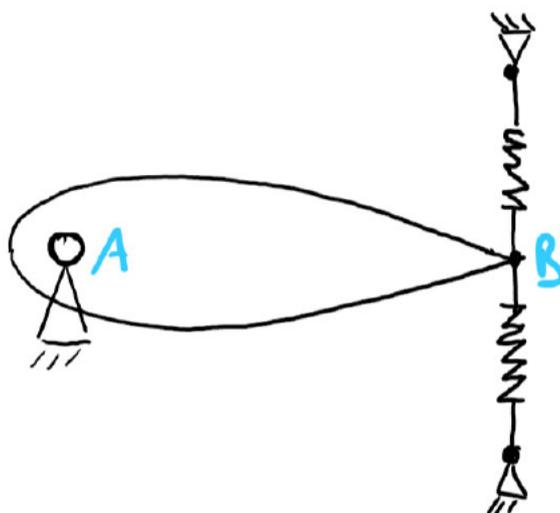


Abbildung 26: Prinzipdarstellung einer Finne

Die Finnen werden Unterwasser am Rumpf des Schiffes montiert. Ihre Form ist ähnlich der einer Flugzeugtragfläche (vgl. Abb. 26). Die Finne ist üblicherweise an ihrem vorderen Ende (A) gelagert und mit

dem Rumpf verbunden. Dabei ist eine Drehbewegung der Finne um dieses Lager möglich. Am hinteren Ende der Finne sind in diesem einfachen Beispiel Federn angebracht (B), die bei einer Verdrehung eine Gegenkraft erzeugen, um die Finne in ihre horizontale Ruhelage zu bringen. Zur Reduzierung der Wasserreibung können die Federn sich auch im Inneren des Rumpfes befinden, oder über Druck-/Zugstangen verlagert werden (vgl. Abb. 25). Die Finnen können generell an jeder Stelle des Unterwasserschiffes montiert sein. Am Bug und Heck ist jedoch die Bewegung des Rumpfs am größten und die Wirkung der Finnen am effektivsten.

### 4.2.2. Entstehung der Antriebskraft

Das System nutzt die Relativbewegung des Schiffes zum Wasser. Durch die steigenden und fallenden Flanken von Wellen, bewegt sich der Rumpf auf und ab. Die Finnen sind in der Lage, bei einer Vertikalen Bewegung durch das Wasser, eine Vortriebskraft zu erzeugen. Die Physik hinter diesem Vorgang entspricht der Strömungsmechanik des Bernoulli-Prinzips und weist Ähnlichkeiten zu einem Flugzeugflügel auf (vgl. Abb. 27 und Abb. 28).

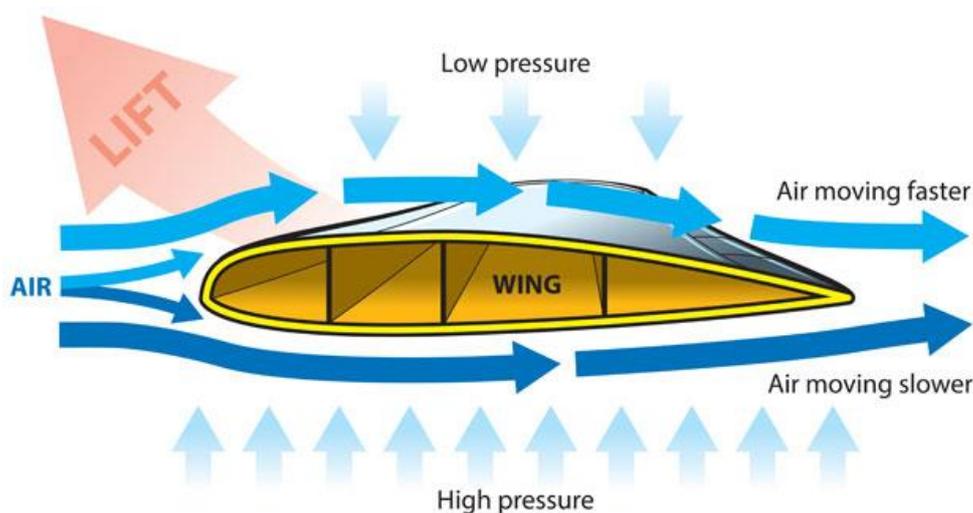


Abbildung 27: Auftriebskraft an einem Flugzeugflügel [24]

Nur wird die Wirkweise umgekehrt: Ein Flugzeug nutzt die Luftgeschwindigkeit, um eine Auftriebskraft zu erzeugen. An Schiffen kann die Auftriebskraft als Folge von Wellen genutzt werden, um eine Vortriebskraft zu erzeugen. Im folgenden Beispiel ist eine Finne am Bug eines Schiffes montiert:



**Situation 2:** Das Schiff kippt über den Wellenkamm. Der Bug bewegt sich abwärts und zieht die Finne nach unten.

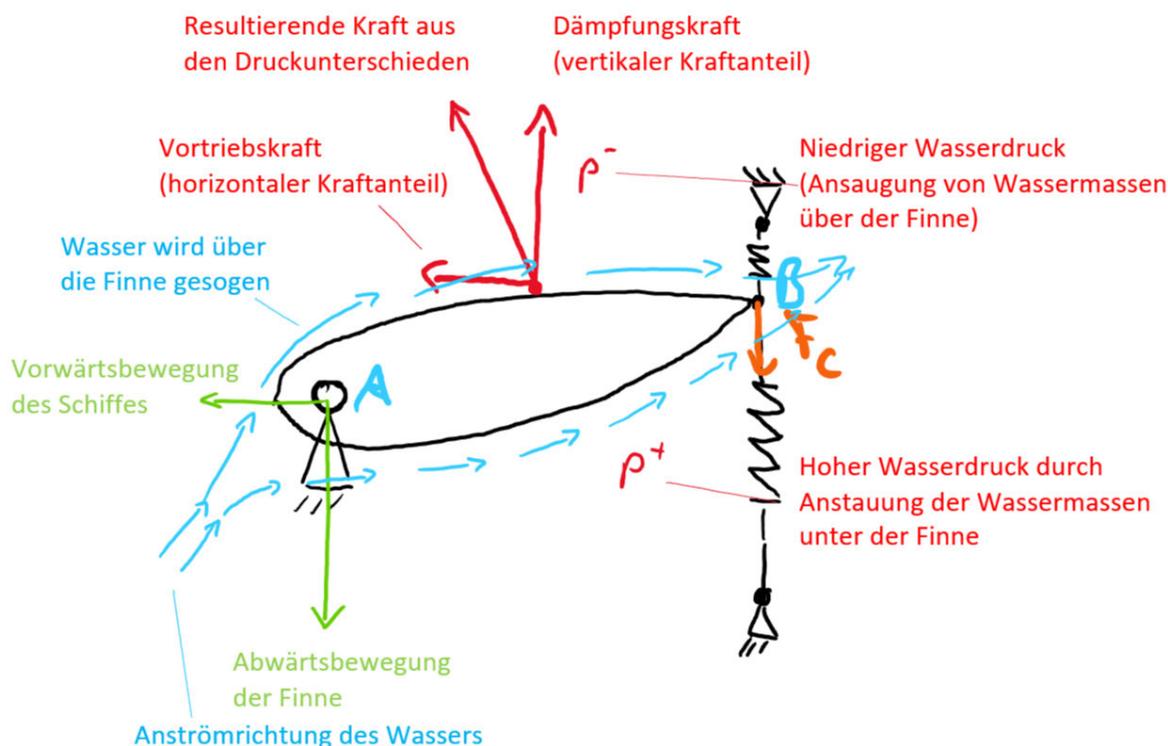


Abbildung 29: Vorgänge an einer sich abwärts bewegenden Finne

**Verhalten der Finne:** Das Ende der Finne (B) wandert nach oben und spannt die untere Feder.

**Folge:** Die Aufwärtsbewegung der Finne bewirkt einen Druckunterschied über- und unterhalb der Finne. Unter der Finne staut sich das Wasser an. Dadurch erhöht sich der Druck ( $p^+$ ). Oberhalb der Finne entsteht ein Unterdruck ( $p^-$ ), der Wasser ansaugt. Dies sorgt für die Verdrehung der Finne um das Lager A. Aus den Druckunterschieden resultiert eine Kraft, die durch die Schrägstellung der Finne sowohl einen Vertikalen als auch einen Horizontalen Anteil besitzt. Der Vertikale Anteil sorgt für eine Dämpfung der Aufwärtsbewegung des Schiffes. Der Horizontale Anteil ergibt die Vortriebskraft.

#### 4.2.3. Wirkung der Finnen auf das Wellenverhalten eines Schiffes

Da die Finnen bei Wellenbewegungen eine dämpfende Kraft entwickeln, sorgen sie dafür, dass das Schiff stabiler im Wasser liegt und sich im Vergleich weniger auf und ab bewegt als ein vergleichbares Schiff ohne Finnen.

#### 4.2.4. Verwendung an einem Katamaran

Eines der bekanntesten Beispiele für das Finnen-Konzept ist die „Suntory Mermaid II“. Entwickelt wurde sie von dem Japanischem Forscher Dr. Yutaka Terao. Der Katamaran besitzt zwei Finnen unter dem Bug des Bootes. Da die Finnen voneinander entkoppelt sind, kann der Katamaran auch aus Rollbewegungen Vortriebskräfte erzeugen. Das Schiff ist 9,5 m lang, wiegt 3000 kg und erreicht allein aus Wellenenergie eine mittlere Geschwindigkeit von 1,5 Knoten ( $\sim 2,8$  km/h) [25]. Die höchste erreichte Geschwindigkeit liegt bei 5 Knoten  $\sim 9,3$  km/h [26]. Ein Katamaran ähnlicher Bauart würde unter Segeln Geschwindigkeiten um die 10 Knoten erreichen [27].

## Aktuell genutzte Konzepte zur Nutzung von Wellenenergie

Kenichi Horie fuhr allein durch Wellenenergie mit dem Schiff innerhalb von 79 Tagen, 7800 km von Hawaii bis Japan. Da die Finnen außer für den Vortrieb keine Möglichkeit der Energiegewinnung besitzen, wurden auf dem Dach der Kabine Solarzellen installiert. Diese liefern die Energie, die für das sonstige Equipment benötigt wird.

### 4.2.5. Forschungsboote mit Finnenantrieb

Derzeit wird das Konzept der Finnen vor allem für autonome Forschungsboote verwendet. Das Unternehmen „Autonaut“ nutzt das beschriebene Prinzip an Booten mit Finnen an Bug und Heck. Die Boote von „Autonaut“ sind 3,5 oder 5 Meter lang und bewegen sich mit Geschwindigkeiten zwischen 1-3 Knoten ( $\sim 1,9 - 5,6$  km/h).

Ausgelegt sind die Boote für unbemannte Forschungsprojekte auf dem Meer. Dort fahren die Boote, ausgestattet mit Sensoren und Equipment, festgelegte Strecken ab. Der Antrieb durch die Finnen erzeugt im Vergleich zu anderen Antriebstechniken nur sehr wenig Geräuschemissionen. Dadurch sind die autonomen Boote für Geräuschemessungen besonders gut geeignet [28].

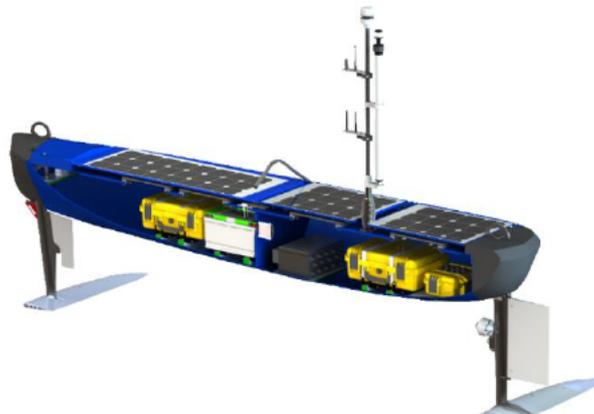


Abbildung 30: Schnittansicht eines Bootes von „Autonaut“ [28]

### 4.2.6. Vortrieb durch eine zweiteilige Konstruktion

Das Unternehmen „Liquid Robotics“ bietet ebenfalls autonome Boote an, die für Forschungszwecke eingesetzt werden. Diese Boote nutzen eine zweiteilige Konstruktion. Ein Boot schwimmt auf der Wasseroberfläche und ist durch ein Seil mit einem Gleiter unter Wasser verbunden (vgl. Abb. 31). Durch die Wellen und die Seilverbindung bewegt sich der Gleiter auf und ab, was durch die an ihm montierten Finnen zu einer Vorwärtsbewegung führt. Der Gleiter zieht durch die mechanische Kraft der Finnen das Boot durch das Wasser [29].

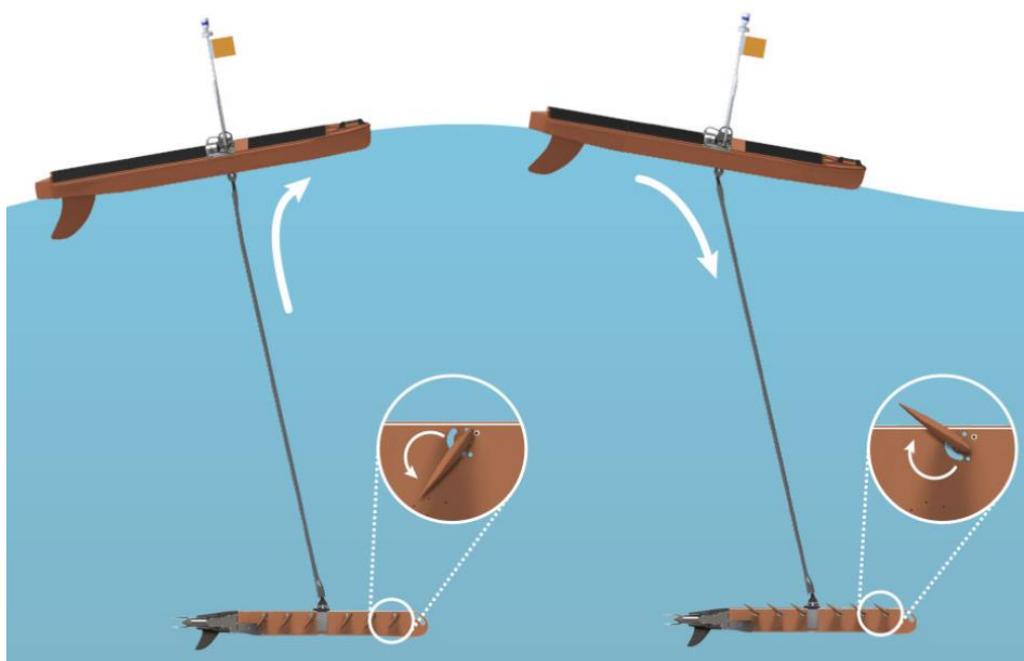


Abbildung 31: Darstellung der Funktionsweise des „wave-gliders“ [29]

#### 4.2.7. Bewertung anhand der Anforderungen

Eine erweiterte Bewertung anhand der gestellten Anforderungen befindet sich im Anhang A.

##### Einschätzung der Reibung

Die Finnen und deren Lagerung befinden sich bei diesen Systemen unter Wasser. Dementsprechend erzeugen diese Bauteile während der Fahrt Reibungsverluste. Da die Finnen eine hydrodynamisch optimierte Form besitzen, werden die Reibungsverluste möglichst gering gehalten. Wenn an einem Rumpf mehrere Finnen montiert sind, vervielfacht sich die Fluidreibung entsprechend.

##### Erreichbare Geschwindigkeiten

Bisherige Praxistests, wie beispielsweise die „Suntory Mermaid II“, zeigten, dass dieses System bisher nur Geschwindigkeiten unter 10 Knoten erreichen kann. Im Schnitt lag die erreichte Geschwindigkeit meist unter 5 Knoten. Die heutige Berufsschiffsfahrt bewegt sich auf den Meeren mit 15 bis 25 Knoten. Zum Erreichen dieser Geschwindigkeiten wird bei diesem Konzept aktuell ein Hilfsantrieb benötigt.

##### Energiegewinn bzw. Energieersparnis

Dieses System erzeugt in seiner Grundform nur Vortriebsenergie. Zusätzlich wird das Schiff durch die Finnen stabiler im Wasser gehalten. Der Energiegewinn des Schiffes lässt sich dementsprechend schwer messen. Aus persönlichen Erfahrungswerten mit verschiedenen Booten, entspricht eine Geschwindigkeit von 3 Knoten bei einem 9,5 m langen Katamaran wie die „Suntory Mermaid 2“, der Antriebsleistung eines konventionellen Antriebes von ca. 4-10 kW.

##### Mögliche Schiffsgrößen für die Anwendung

Das System wurde zum jetzigen Stand nur auf Schiffen bis ca. 50 m Länge getestet. Da das System den Vortrieb aus der Relativbewegung des Schiffes zur Wasseroberfläche generiert, ist es vorteilhaft, wenn das Schiff auch bei kleinen Wellen schon zu Bewegungen im Wasser neigt. Wie in Kapitel 2.5 erklärt, sind größere Schiffe, die auch bei mittelgroßen Wellen noch stabil im Wasser liegen, weniger für dieses System geeignet.

## Wie kann dieses Konzept wirtschaftlich genutzt werden?

Da in der heutigen Zeit die Geschwindigkeit, um von A nach B zu kommen, die Wirtschaftlichkeit eines Transportmittels maßgeblich beeinflusst, ist die Verwendung des Finnen-Konzeptes aktuell nicht ausreichend. Die Vorteile der Finnen können jedoch wie folgt in hybriden Konzepten genutzt werden:

- **Nutzung in Kombination mit einem konventionellen, fossilen Antrieb:**

In diesem Fall würde die Hauptantriebsleistung vom konventionellen Antrieb über eine Schiffschraube aufgebracht werden. Die Finnen würden zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch verhelfen. Dabei gilt: Je geringer die Geschwindigkeit, desto größer die Kraftstoffersparnis gegenüber einem vergleichbaren Schiff ohne WEC-System.

- **Nutzung in Kombination mit klimaneutralen Antrieben:**

Von den möglichen klimaneutralen Antrieben bietet sich der Betrieb in Kombination mit einem Elektroantrieb an. Für die Stromerzeugung könnten Solarzellen oder auch Brennstoffzellen genutzt werden.

Segel, Rumpfsegler und auch Flettnerrotoren sind für diese Anwendung weniger geeignet, da diese bei Windeinwirkung das Schiff wesentlich stabiler im Wasser halten und somit die Bewegung des Schiffes reduzieren würden, was wiederum zu einer geringeren Antriebsleistung der Finnen führt. Auch ein Batteriebetrieb könnte das Schiff ähnlich beeinflussen. Schwere Batterien erhöhen die Trägheit des Schiffes und sorgen somit für mehr Stabilität

## Kann ein Schiff mit diesem System nachträglich ausgerüstet werden?

Durch den simplen Aufbau des Systems gestaltet sich die nachträgliche Ausrüstung von Schiffen mit Finnen unkompliziert. Vor der Installation müssen die Komponenten auf den Schiffstyp und die Zielgeschwindigkeiten optimiert werden.

Die Finnen erzeugen eine direkte Vortriebskraft ohne weitere Energieumwandlungssysteme an Bord. Dadurch wird das System nahezu gänzlich von außen an den Rumpf montiert. Entsprechende Lagerstellen für Finnen, Umlenkstangen und Führungen müssen vorab installiert werden. Generell gilt jedoch, dass ein eigens für dieses Konzept entwickeltes Schiff, mit optimierter Rumpfform, effizienter funktioniert.

## Wartungsaufwand und Schwachstellen

Durch die geringe Anzahl an Funktionsteilen fallen die Wartungskosten eines solchen Systems vergleichsweise gering aus. Mögliche Wartungs- und Inspektionsaufgaben wären:

- Inspektion und Austausch von Lagerungen
- Inspektion der Finnen auf Beschädigungen, Verformungen sowie Verunreinigung der Oberflächen durch beispielsweise Seepocken. Gegebenenfalls Reparatur, Austausch oder Reinigung.
- Inspektion der Federn
- Wenn die Option genutzt sein sollte: Inspektion und Wartung des Hydraulischen Systems

Da die Bauteile des Systems sich teilweise unter Wasser befinden, muss ein Schiff für Wartungsarbeiten trockengelegt werden. Kritisch für die Lebenserwartung werden die Lagerungen der Finnen sein. Diese sind dem Salzwasser ausgesetzt. Einen guten Vergleichswert könnten die Lagerungen von Rudern und Antriebswellen liefern.

#### 4.2.8. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen

##### **Stärken:**

- Dieses Konzept hat sich bereits bewährt und wird genutzt
- Die Vortriebskraft wird ohne aufwendige Energieumwandlungen direkt produziert
- Das System arbeitet passiv
- Durch die Position außerhalb vom Rumpf wird nur wenig bis kein Platz an Bord für dieses System benötigt
- Das Schiff verhält sich stabiler und der Fahrkomfort wird erhöht. Das System arbeitet nahezu geräuschlos

##### **Schwächen:**

- Es werden nur geringe Geschwindigkeiten erreicht
- Das System produziert keine elektrische Energie
- Für die Wartung der Finnen muss das Schiff aus dem Wasser gehoben oder Unterwasserarbeiten durchgeführt werden

#### 4.2.9. Optimierungspotential

Dieses System ist zusammen mit dem Surfen das älteste Konzept zur Nutzung von Wellenenergie. Es wurden viele Praxistests durchgeführt und Prototypen entwickelt. Trotzdem weist dieses System nach wie vor Optimierungspotential hinsichtlich der Effizienz auf. Möglichkeiten liegen vor allem in der aktiven Steuerung der Finnenneigung. Diese wurde in den bisherigen Systemen nur über passive Bauelemente gesteuert (vgl. Abb. 32).

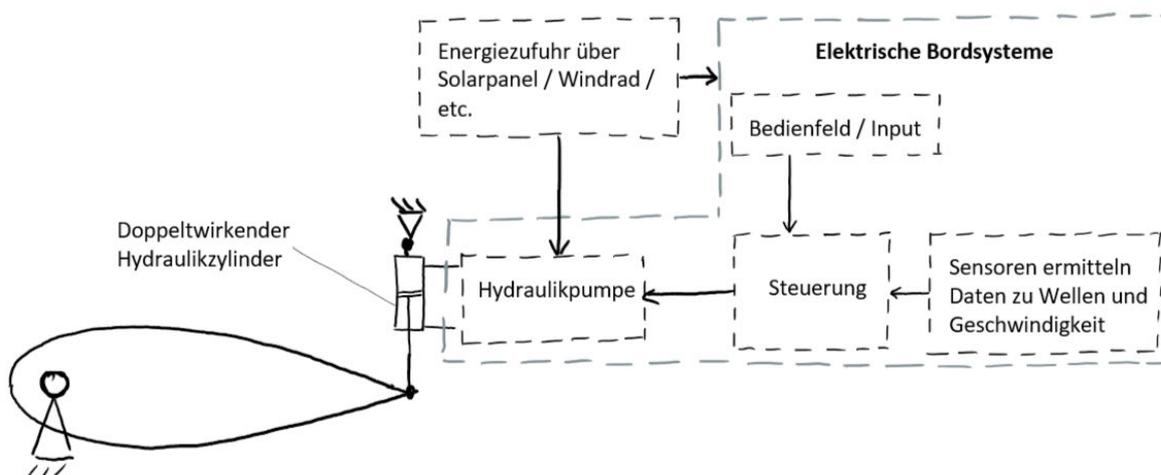


Abbildung 32: Aufbau einer aktiven Steuerung der Finnen

#### 4.2.10. Zukunftspotential

Dieses Konzept sollte weiter erforscht und genutzt werden. Vor allem für die Nutzung auf Schiffen zum Senken des Kraftstoffverbrauches sind Finnen hilfreich. Zur Nutzung als reinem Wellenantrieb sollte sich die Forschung auf eine aktive Steuerung der Finnenneigung konzentrieren. Hier könnte die Effizienz und damit die erreichbare Geschwindigkeit erhöht werden.

### 4.3. Antrieb durch bewegliche Rumpfteile

Es gibt Möglichkeiten Energie zu gewinnen, wenn ein Schiff mehrere Rümpfe besitzt. Der genutzte Effekt lässt sich an einem stürmischen Tag in Yachthäfen beobachten, wenn Wellen von ca. 30 – 40cm Wellenhöhe auf Bootsanleger treffen. Angeregt durch die Wellen fangen die Boote an, sich relativ zueinander zu bewegen. Die relative Bewegung von zwei oder mehr Rümpfen zueinander bietet die Möglichkeit, Energie zu erzeugen.



Abbildung 33: Der Trimaran im Bau [30]

#### 4.3.1. Aufbau

Ein Projekt des Schiffsbau-Ingenieurs Jonathan Salvador zeigt seit 2018, wie dieses Konzept in die Realität umgesetzt werden kann. Die sich im Bau befindliche Fähre besitzt drei parallel angeordnete Rümpfe. Dabei sind die beiden äußeren Rümpfe beweglich zum mittleren Rumpf gelagert. Dadurch können sich diese bei Welleneinwirkung unabhängig vom Hauptrumpf bewegen. Dieses System kann den Kraftstoffverbrauch des Schiffes um ein Drittel gesenkt werden [30].

#### 4.3.2. Funktionsweise

Durch die Einwirkung der Wellen wirken auf die drei Rümpfe dynamische Auftriebskräfte. Dies sorgt dafür, dass sich die Rümpfe bewegen. Dabei ist der mittlere Hauptrumpf deutlich länger und verdrängt größere Wassermassen als die seitlichen Rümpfe. Die Masse sorgt dafür, dass sich der Hauptrumpf deutlich träger bewegt. Gleichzeitig liegt der Hauptrumpf durch seine Länge stabiler im Wasser (vgl. Kapitel 2.5).

Das Rumpfdesign des Trimarans ist also darauf ausgelegt, möglichst große Relativbewegungen zwischen dem Hauptrumpf und den Seitenrümpfen zu erzeugen.

#### Umwandlung der Bewegungsenergie in nutzbare Energieformen

Zwischen den Seitenrümpfen und dem überkragenden Deck des Hauptrumpfes sind Hydraulikzylinder angebracht.

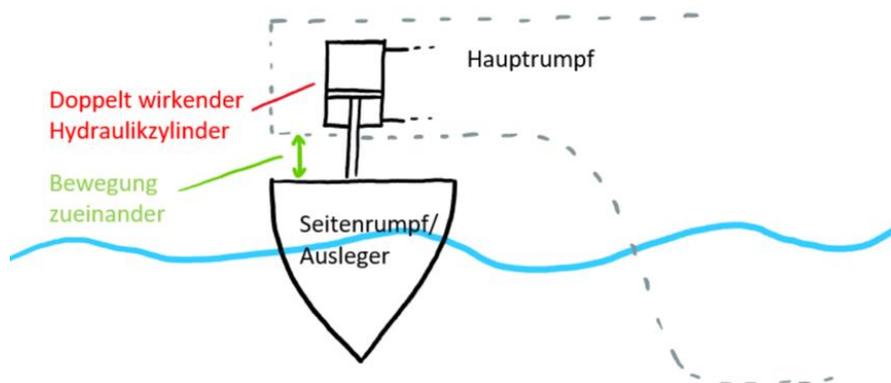


Abbildung 34: Anbindung der Ausleger an den Haupttrumpf

Im Fall des gezeigten Trimarans sind pro Seitenrumpf 15 Hydraulikzylinder installiert, die bei einer Relativbewegung der Rumpfteile zueinander bewegt werden (vgl. Abb. 34). Das Auf und Ab der Wellen sorgt für eine oszillierende Verdrängung von Hydrauliköl. Durch Steuerblöcke mit Rückschlagventilen kann die oszillierende Verdrängung in einen richtungsgleichen Fließprozess umgewandelt werden (vgl. Abb. 35). Der Ölfluss wird durch einen Hydraulikmotor in eine Drehbewegung umgewandelt [30].

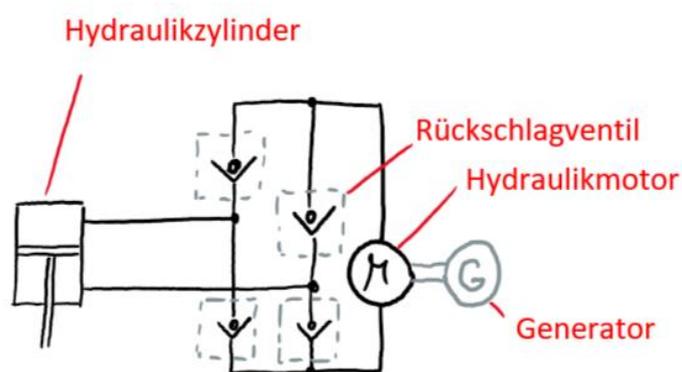


Abbildung 35: Hydrauliksteuerung

Theoretisch könnte die Drehbewegung des Hydraulikmotors direkt für den Antrieb genutzt werden. Im Falle des Trimarans von Jonathan Salvador ist an der Ausgangswelle des Hydraulikmotors ein Generator angeschlossen, der das Schiff mit elektrischer Energie versorgt. Im Antriebsstrang sitzt ein Elektromotor. Da die Zielgeschwindigkeit der Fähre 40 km/h beträgt, wird zusätzlich ein Dieselmotor benötigt. Dabei kann der Diesel entweder die Schiffsschraube direkt oder einen Generator antreiben, der wiederum den elektrischen Antriebsmotor mit Strom versorgt.

### Aktueller Stand

Der Trimaran von Jonathan Salvador befindet sich aktuell noch im Bau. Durch die Coronapandemie verzögert sich die Fertigstellung.

#### 4.3.3. Bewertung anhand der Anforderungen

Eine erweiterte Bewertung anhand der gestellten Anforderungen befindet sich im Anhang A.

#### Reibungsverluste und geeignete Geschwindigkeit

Durch die schmalen Rümpfe sind Trimarane hydrodynamisch effizienter als ein vergleichbares einrumpfiges Schiff. Die beiden beweglichen Rumpfteile stellen keine signifikante Erhöhung der Reibungsverluste dar. Durch diesen geringen Strömungswiderstand eignen sich Schiffe mit diesen Rümpfen gut

für hohe Geschwindigkeiten. Ausschlaggebend für die praktisch erreichbare Geschwindigkeit ist daher vor allem die Leistung des Antriebes.

### Leistung des WEC-Systems

Die sich zu Zeit im Bau befindliche Fähre soll in der Lage sein, bis zu 300 kW Antriebsleistung aus dem WEC-System generieren zu können. Für den Betrieb des Schiffes mit einer Geschwindigkeit von 22 Knoten wird zusätzlich zum WEC-System noch ein konventioneller Antrieb benötigt. Aufgrund der baulichen Ähnlichkeiten zum Schwimmkörper WEC-System lassen sich dort erzielte Energiegewinne auf dieses System überschlägig übertragen. (vgl. Kapitel 5.4)

### Schiffsgröße für Anwendung

Generell gibt es für die Schiffsgröße keine baulich beschränkenden Faktoren. Da die Energieproduktion von der Relativbewegung der Seitenrümpfe zum Haupttrumpf abhängig ist, sollten die Seitenrümpfe schon bei kleinen Wellen in Bewegung versetzt werden, während der Haupttrumpf möglichst lange stabil im Wasser liegt. Wenn ein längeres Schiff gebaut werden soll, gilt wieder die Regel, dass je länger ein Schiff ist, es stabiler im Wasser liegt und weniger Bewegung erfährt. Die längeren Seitenrümpfe würden also erst bei höheren Wellen effizient Energie produziert werden. Aus genannten Gründen könnte es sich ergeben, dass dieses Konzept ab einer bestimmten Schiffsgröße nicht mehr effizient ist. Eine mögliche Lösung wird in Kapitel 6 erläutert.

### Mögliche Gesamtkonzepte der Energieversorgung

Das Trimaran-System ist je nach Aufbau in der Lage, verschiedene Energieformen zu produzieren. Mögliche Formen sind:

1. Mechanische Bewegungsenergie
2. Hydraulische Energie
3. Elektrische Energie

Dadurch ist es möglich, die produzierte Energie für mehr als nur den Antrieb zu nutzen. Beispiele sind:

- Stromversorgung an Bord
- Bereitstellen von hydraulischem Druck für die Ruderanlage, Ankerwinden etc.
- Laden von Batterien, um eine Energiereserve für den Antrieb zu haben (Flache See, Binnengewässer, Anlegemanöver etc.).

Ob eine Nutzung des Systems als alleiniger Antrieb eines Schiffes wirtschaftlich ist, wurde bisher nicht getestet. Es ist zu erwarten, dass im Schnitt nur geringe Geschwindigkeiten realisiert werden können. Die Verwendung in Verbindung mit anderen Antrieben ist unproblematisch und kann die erzielbaren Geschwindigkeiten des Schiffes deutlich erhöhen:

#### **1. Kombination mit einem fossilen Antriebssystem**

Der sich im Bau befindende Trimaran von Jonathan Salvador soll in der Kombination mit einem konventionellen Dieselantrieb fahren. Dadurch ergibt sich eine geplante Geschwindigkeit von 22 Knoten. Dabei wird durch das WEC-System und die Rumpfform der Kraftstoffverbrauch um ein Drittel gesenkt.

#### **2. Kombination mit Segeln**

Trimarane sind bisher vor allem als Segelboote bekannt. Die seitlichen Rümpfe sorgen mit ihrem Hebel zur Mittellinie des Haupttrumpfes und der Auftriebskraft für das Ausgleichsmoment, welches die Kraft von den Segeln aufnimmt. Auf einen Ballastkiel kann somit bei einem

Trimaran verzichtet werden. Trimarane sind in der Lage, im Schnitt 25-30% schneller zu segeln als einrumpfige Segelboote [31].

Wenn das WEC-System durch Segel ergänzt wird, wird das Schiff folgendermaßen beeinflusst:

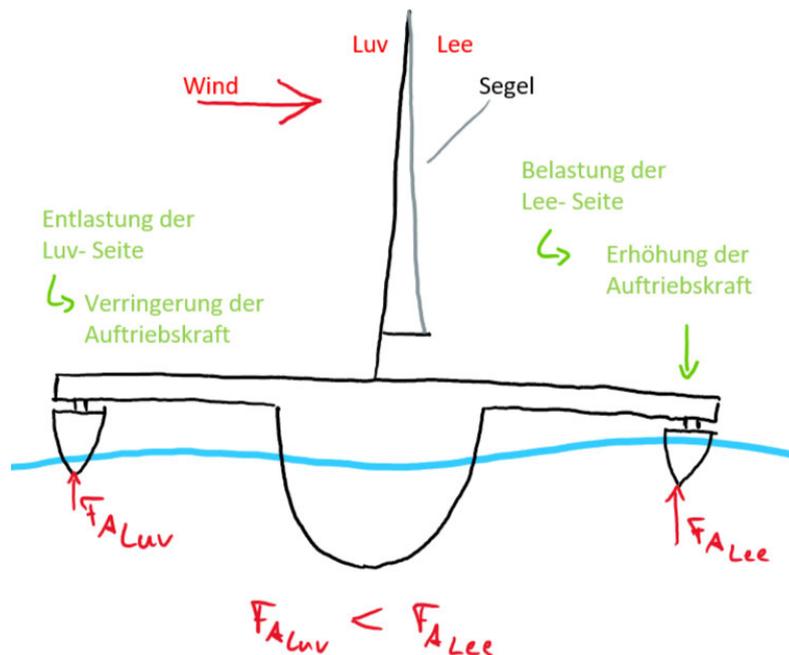


Abbildung 36: Auswirkung von Segeln an einem Trimaran

- Luv-seitiger Seitenrumpf (Rumpf welcher sich auf der dem Wind zugewandten Seite befindet):  
Die Kraft des Segels sorgt dafür, dass der Rumpf angehoben wird. Die benötigte Auftriebskraft sinkt. Wellen können dadurch diesen Rumpf leichter in Bewegung versetzen. Im Extremfall kann der Rumpf auch aus dem Wasser gehoben werden. In diesem Fall würde der Rumpf seine untere Endlage erreichen und keine Energie erzeugen.
- Lee-seitiger Seitenrumpf (Rumpf welcher sich auf der dem Wind abgewandten Seite befindet):  
Der Rumpf wird durch das Segeln stärker belastet. Die resultierende Auftriebskraft erhöht sich dementsprechend. Bei einer passiven Steuerung würde der Rumpf in seine obere Endlage gedrückt werden und somit keine Energie mehr produzieren.

Um unter Segeln trotzdem effizient Energie zu produzieren, bedarf es einer aktiven Steuerung des Systems. Diese ist im Kapitel 4.3.5 erklärt.

### 3. Kombination mit Flettnerrotoren

Ähnlich zur Kombination mit Segeln müsste bei Flettnerrotoren, aufgrund des durch den Wind entstehenden Momentes, auf ein aktiv gesteuertes System zurückgegriffen werden. Von Vorteil ist, dass die Energie, um die Rotoren anzutreiben, direkt von dem WEC-System kommen könnte.

#### **4. Kombination mit Solarzellen**

Mehrrumpfige Schiffe sind oft breiter als vergleichbare einrumpfige Schiffe. Es ergibt sich zusammen mit der Länge eine große Fläche, die für Solarzellen genutzt werden kann.

Dafür muss die hydraulische Energie des WEC-Systems über Hydraulikmotoren und Generatoren in elektrische Energie umgewandelt werden. In Kombination mit den Solarzellen kann dann der elektrische Antriebsmotor versorgt werden.

#### **5. Kombination mit anderen Klimaneutralen Antrieben**

Eine Kombination mit Brennstoffzellen oder einem Batteriebetrieb ist möglich. Es könnte für die Effizienz des WEC-Systems von Vorteil sein, wenn der Hauptrumpf, durch das Gewicht von beispielsweise Batterien, schwerer wird und somit stabiler im Wasser liegt.

### **Installation**

Eine nachträgliche Installation auf einem bestehenden Schiff kommt bei diesem System nicht in Frage. Die Rümpfe und deren Belastung sind ausschlaggebende Faktoren für das Design des Systems. Schiffe müssen dementsprechend um dieses System herum entwickelt werden. Da dieses System bisher noch nicht ausreichend getestet wurde, werden Entwicklungs- und Produktionskosten entsprechend hoch sein.

### **Wartung**

Insgesamt besitzt ein Schiff mit dem Trimaran-System viele Komponenten, die für die Energiegewinnung und den Antrieb vonnöten sind. Besonders wartungsintensiv sind die Hydraulikzylinder, die zwischen den Auslegern und den Seitenrümpfen die Bewegungen aufnehmen. Ohne eine entsprechende Abschirmung sind diese während der Fahrt durchgehend dem Meerwasser ausgesetzt. Auch die Lagerungen an Rumpf und Ausleger werden stark beansprucht. Des Weiteren müssen die Hydraulikmotoren, die Hydrauliksteuerung, und die elektrischen Komponenten im Inneren des Hauptrumpfes gewartet werden. Die Wartung kann je nach Verschleißerscheinungen sehr intensiv ausfallen.

### **Lebenserwartung**

Da das Trimaran-System mechanische und hydraulische Komponenten besitzt, welche außerhalb des Rumpfes montiert werden, ist dort ein entsprechender Verschleiß zu erwarten. Dies könnte die Lebenserwartung eines solchen Systems negativ beeinflussen.

#### **4.3.4. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen**

##### **Stärken:**

- Gut geeignet, um hohe Geschwindigkeiten zu erreichen
- Stabile Lage im Wasser
- Das System kann als alleinige Energiequelle genutzt werden
- Das System kann passiv arbeiten

##### **Schwächen:**

- Das System kann nicht nachgerüstet werden
- Verluste durch mehrfache Energieumformung
- Wenig Volumen im Rumpf für Ladung vorhanden
- Seitenrümpfe sind durch das WEC-System nicht zugänglich
- Aufwendige Hydraulik
- Erhöhter Wartungsaufwand durch die zum Seewasser offene Mechanik

### 4.3.5. Optimierungspotential

Dieses System steht noch am Anfang seiner Entwicklung. Der momentan auf den Philippinen hergestellte Trimaran wird nach seiner Fertigstellung weitere Erkenntnisse über die Effektivität dieses Systems liefern. Da dieser Trimaran das erste funktionsfähige Schiff mit diesem System sein wird, wird es dementsprechend viele Möglichkeiten geben, das System zu optimieren und zu erweitern. Entsprechende Möglichkeiten sind beispielsweise:

- Ausarbeitung einer aktiven Steuerung des Systems zur Optimierung der Energieproduktion
- Erforschung der optimalen Rumpfform und deren Belastung
- Erforschung der Kombination mit Segeln oder Flettnerrotoren
- Verkleidung der außenliegenden Kolbenpumpen und der Scharniere, um den Verschleiß durch Salzwasser gering zu halten

#### **Lösungsvorschlag für die Kombination mit Segeln:**

Der Lee-seitige Rumpf wird über die hydraulischen Zylinder oder auch über verstellbare Federn in Richtung seiner unteren Endlage vorgespannt. Dadurch erhöht sich in Kombination mit dem Moment aus den Segeln die Belastung des Rumpfes. Die Auftriebskraft steigt entsprechend an. Mit dieser Vorspannung wird verhindert, dass der Rumpf seine obere Endlage erreicht. Er kann folglich noch von den Wellen bewegt werden und somit Energie produzieren. Ebenfalls wird durch die Vorspannung der Neigung des Schiffes entgegengewirkt und somit ein Erreichen der unteren Endlage beim Luv-seitigem Rumpf verhindert (vgl. Abb. 36).

### 4.3.6. Zukunftschancen

Wenn der Trimaran von Jonathan Salvador in der Lage ist, die angegebenen Werte zu erreichen, könnte dieses Konzept eine effiziente Möglichkeit sein, den Kraftstoffverbrauch von Schiffen um ein Drittel zu senken. Der Einsatz als schnelle Fähre ist hierbei ideal. Die große Deckfläche bietet die Möglichkeit für die Unterbringung von Fahrzeugen. Für die Nutzung als Frachtschiff ist dieses Konzept nur bedingt geeignet. Die schmalen Rümpfe bieten nur wenig Volumen, welches für Ladung genutzt werden könnte. Zudem sind die äußeren Rümpfe durch die mechanischen Komponenten des WEC-Systems nicht zugänglich. Für diese Anwendung ist das Konzept der Schwimmkörper besser geeignet. Die Nutzung in Kombination mit Solarflächen könnte in Zukunft auch ein komplett emissionsfreies Gesamtsystem ergeben. Beobachtet werden sollte das Verhalten der Seitenrümpfe bei stürmischer See. Wenn diese zu stark in die Endanschlüge gehoben werden, kann das System beschädigt werden.

## **5. Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie**

### **5.1. Mehrteilige Rümpfe**

Bei diesen Konzepten wird der Rumpf des Schiffes geteilt und über ein Scharnier verbunden. Ursprünglich stammt die Idee aus der stationären Nutzung von Wellenenergie. Bisher gibt es kein offizielles Konzept, welches die Bewegungen zweier oder mehrerer Schwimmkörper für den Vortrieb nutzt.

Es ist bekannt, dass bei rauer See auf Schiffsrümpfe große Kräfte wirken können. In der Geschichte ist es nicht selten vorgekommen, dass Schiffsrümpfe der Belastung nicht standhalten konnten und durchgebrochen sind (vgl. Abb. 37). Genau diese Kräfte im Schiffsrumpf könnten für die Energieerzeugung genutzt werden.



Abbildung 37: Ein Containerschiff mit mittig gebrochenem Rumpf [51]

### 5.1.1. Aufbau von Varianten zur stationären Energiegewinnung

#### Pelamis Wave Energy Converter

In der stationären Variante werden mehrere Schwimmkörper wie eine Kette miteinander verbunden. Die Verbindungen zwischen den Körpern bestehen aus Gelenken, die einen Winkelversatz in horizontaler und vertikaler Richtung zulassen. Um das Konzept für ein Schiff zu nutzen, wird anstatt eines zweiachsigen Gelenkes ein Scharnier benutzt, welches nur vertikale Winkelversätze zulässt. Während bei stationären Systemen mit bis zu 5 Schwimmkörpern in reihe Energie erzeugt wird (vgl. Abb. 38), sollte sich ein Schiff aufgrund der Komplexität zunächst auf zwei Körper beschränken.

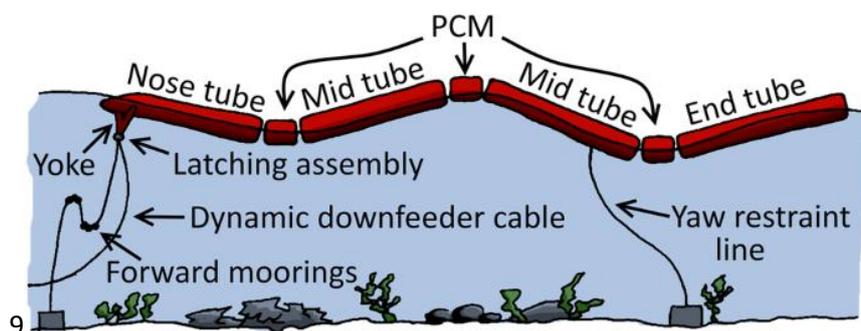


Abbildung 38: Darstellung des „Pelamis-System“ [32]



Abbildung 39: Das „Pelamis-System“ im Betrieb [70]

Abbildung 38 zeigt eine Skizze des Pelamis Wave Energy Converters (Pelamis WEC). Damit das System nicht abtreibt, ist am vordersten Schwimmkörper eine Festmacherleine mit Verankerung im Seegrund angebracht. An dieser Stelle wird ebenfalls die erzeugte Energie mittels Unterseekabel abgeführt. Eine

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

weitere Festmacherleine am hinteren Ende sorgt dafür, dass sich das System nur um einen bestimmten Winkel um die vordere Verankerung drehen kann. Zwischen den einzelnen Schwimmkörpern sitzen die „*power conversion modules*“ (PCM). In ihnen wird die Bewegungsenergie mit Hilfe von Hydraulikzylindern und Generatoren in elektrische Energie umgewandelt [32].

### Seacatt Wave Energy Converter

Ein anderes System, dessen Form der eines Schiffs mehr ähnelt, ist der „Seacatt Wave Energy Converter“ (Seacatt WEC). Dieser besitzt im Gegensatz zu dem Pelamis WEC nur ein Scharnier, welches nur vertikale Winkelversätze zwischen den zwei Schwimmkörpern zulässt [33].



Abbildung 40: Das „Seacatt“- System im Wellenbecken [69]

#### 5.1.2. Funktionsweise

Wenn ein Schiff eine Welle durchfährt, wirken auf verschiedene Bereiche des Schiffes unterschiedliche Auftriebskräfte. Dadurch kommt das Verhältnis aus Auftriebs- und Gewichtskraft aus dem Gleichgewicht. Je tiefer ein Teil des Rumpfes im Wasser eingetaucht ist, desto höher ist die Auftriebskraft. Im Rumpf entsteht ein Biegemoment. Abhängig von Höhe, Länge, Steigung und Periode der Wellen, steigt das Moment. Bei der Konstruktion von Rümpfen wird aus diesen Gründen auf die Steifigkeit geachtet. Übersteigt das wechselnde Moment die Aufnahmefähigkeit des Rumpfes, bildet sich ein Riss, der bei wechselnder Belastung zum Nachgeben des Systems führen kann. Im Folgenden wird der Rumpf vereinfacht als Balken dargestellt:

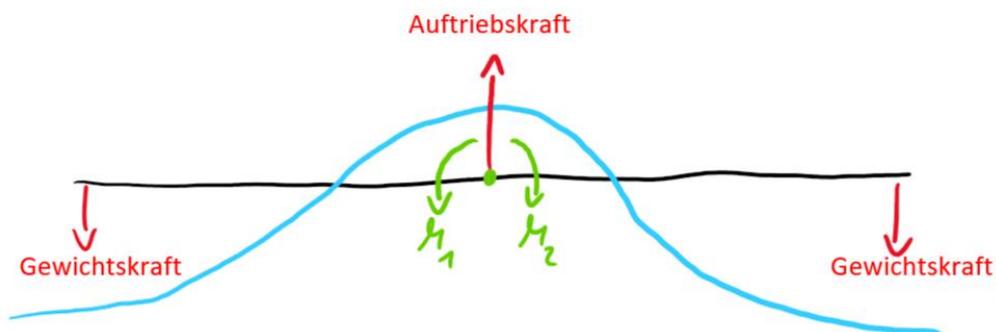


Abbildung 41: Kräfte auf einen konventionellen Rumpf, während sich das Schiff auf dem Wellenberg befindet

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

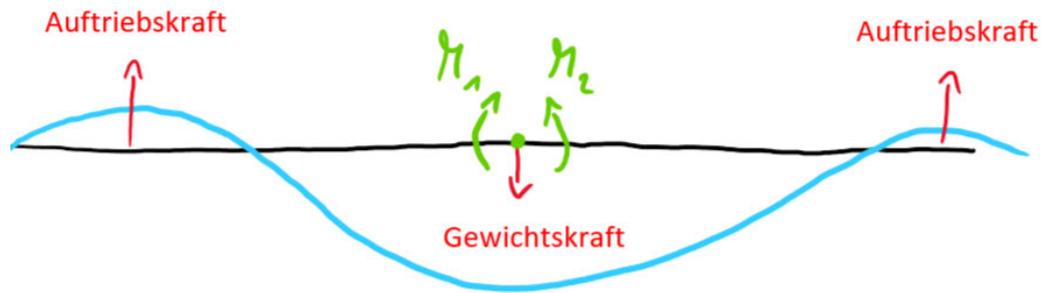


Abbildung 42: Kräfte auf einen konventionellen Rumpf, während sich das Schiff im Wellental befindet

Um das Moment nutzen zu können, muss ein Schiff einen zweiteiligen Rumpf besitzen. Ein Scharnier, welches ungefähr in der Mitte des Schiffes sitzt, erlaubt ein „Durchknicken“. Die Bewegung der beiden Schiffsteile zueinander bietet dann die Möglichkeit, die kinetische Energie in nutzbare Energieformen umzuwandeln.

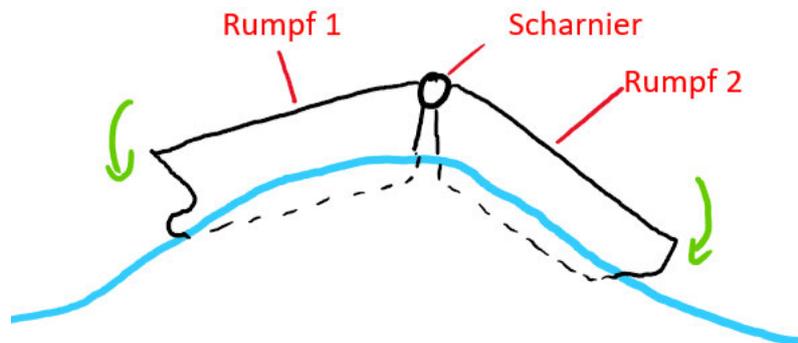


Abbildung 43: Zweiteiliger Rumpf, Verhalten auf einem Wellenberg

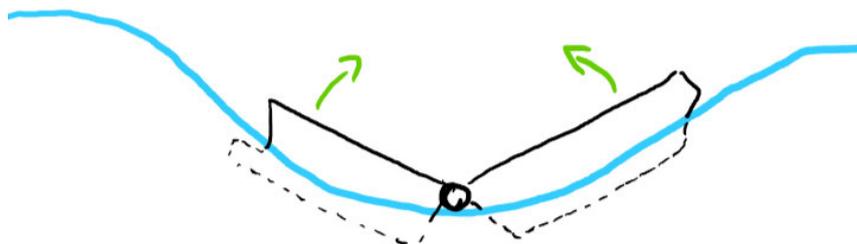


Abbildung 44: Zweiteiliger Rumpf, Verhalten in einem Wellental

### **Energieerzeugung:**

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Bewegung in Energie bzw. Vortrieb umzuwandeln:

#### **1. Hydraulisch:**

Neben dem Scharniergelenk sind die beiden Rumpfteile mit Hydraulikzylindern verbunden. Wenn die beiden Rumpfe sich zueinander bewegen, befördern die Zylinder Öl in ein Leitungssystem. Für den Vortrieb des Schiffes sorgt dann ein Hydraulikmotor, der eine Schiffsschraube antreibt.

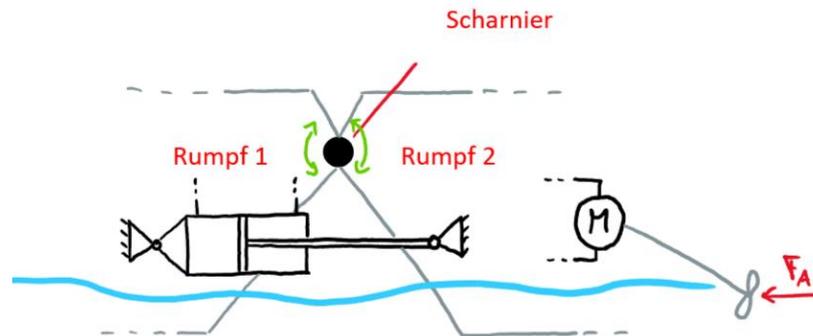


Abbildung 45: Prinzipskizze rein hydraulisch

## 2. Elektrisch:

Die Energie aus der Drehbewegung der beiden Rümpfe zueinander wird durch ein Getriebe in einen Generator geleitet. Dieser erzeugt elektrische Energie, die neben der Bordstromversorgung auch für den Schiffsantrieb über einen Elektromotor genutzt werden kann.

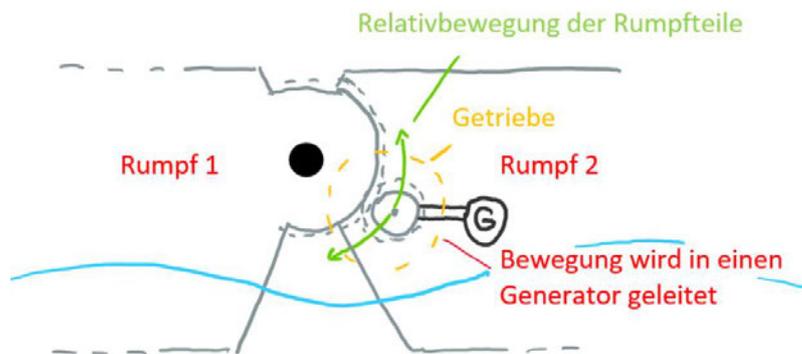


Abbildung 46: Prinzipskizze elektrisch

## 3. Mechanisch:

Bei diesem Ansatz wird auf die Umwandlung der Energieform gänzlich verzichtet. Die oszillierende Bewegung der Schiffsrümpfe wird über ein Getriebe mit Freiläufen in eine Drehbewegung mit konstanter Drehrichtung umgewandelt. Um die Rotationsgeschwindigkeit konstant zu halten, kann zusätzlich ein Schwungrad verwendet werden. Wie in der Schiffsfahrt üblich, wird die Drehbewegung mittels einer Schraube zum Schiffsantrieb genutzt.

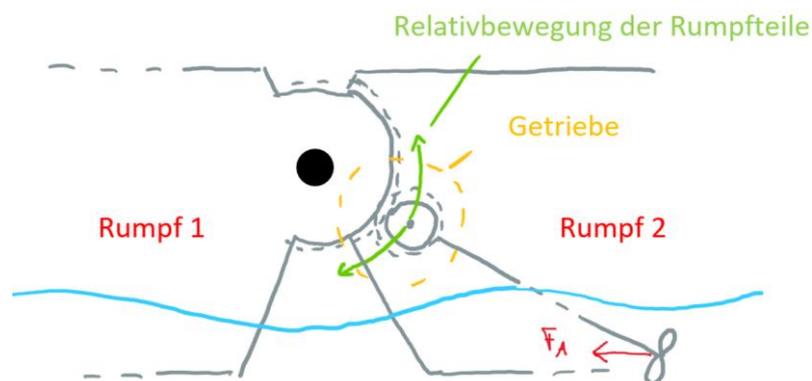


Abbildung 47: Prinzipskizze mechanisch

#### 4. Mechanisch – Hydraulisch

Ähnlich wie bei Möglichkeit 2. wird die Bewegungsenergie durch ein Getriebe an eine Hydraulikpumpe geleitet. Der erzeugte Druck treibt einen Hydraulikmotor an, der wiederum das Schiff antreibt.

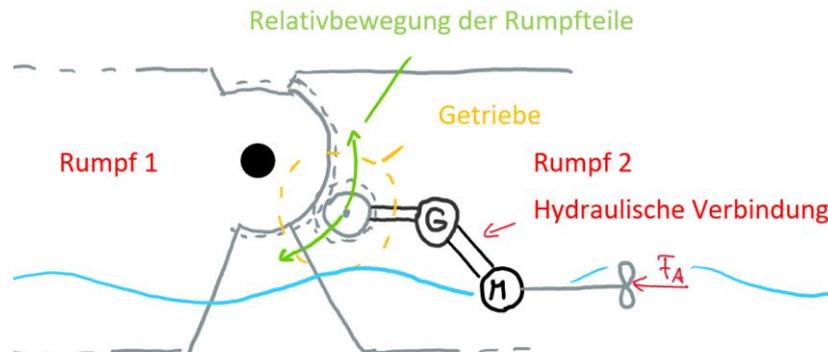


Abbildung 48: Prinzipskizze mechanisch-hydraulisch

#### 5. Hydraulisch – Elektrisch

Bei dieser Lösung wird wie bei Lösung 1. die mechanische Energie aus der Bewegung der beiden Rümpfe zueinander über einen Hydraulikzylinder aufgenommen. Dieser treibt einen Hydraulikmotor an, der an einen Generator gekoppelt ist. Die erzeugte elektrische Energie wird für den Antrieb und die Energieversorgung an Bord verwendet.

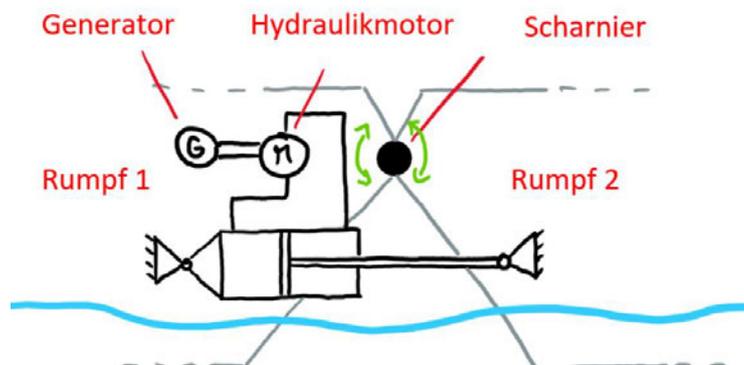


Abbildung 49: Prinzipskizze hydraulisch-elektrisch

### Aktueller Stand der Technik

Derzeit ist keine Unternehmung bekannt, die auf ein Schiffsmodell mit beweglichen Rumpfteilen setzt. Das stationäre „Pelamis WEC-System“ ist erfolgreich und wird bereits an mehreren Standorten in Europa zur Energiegewinnung eingesetzt. Das „Seacatt WEC-System“ sieht auf den ersten Blick so aus, als ob es für den Vortrieb von Schiffen genutzt werden soll, ist aber ebenfalls nur ein stationäres System.

#### 5.1.3. Bewertung anhand der Anforderungen

Eine erweiterte Bewertung anhand der gestellten Anforderungen befindet sich im Anhang B.

#### Einschätzung der Reibungsverluste und dessen Folgen

Das für dieses Konzept betrachtete statische Energiegewinnungssystem ist nicht sehr aquadynamisch gestaltet. Wenn der Rumpf sich im waagerechten Zustand befindet, sind die dynamischen

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

Eigenschaften des Rumpfes mit einem konventionellen Schiff vergleichbar. Es werden aber schon in diesem Fall erhöhte Reibungsverluste auftreten, da der Scharnierbereich des Rumpfes nicht optimal dynamisch gestaltet werden kann.

Wenn bei diesem Konzept die Rümpfe zueinander knicken, wird dies die Reibungsverluste proportional zum Knickwinkel erhöhen. Aus diesem Grund muss der Scharnierbereich des Schiffes erforscht und getestet werden, um die Reibungsverluste während der Energieproduktion zu minimieren.

Durch den erhöhten Strömungswiderstand des Rumpfes während des Knickens ist dieses Konzept nur für langsame Geschwindigkeiten geeignet. Ein strömungsoptimiertes Scharnierdesign könnte auch für mittlere Geschwindigkeiten nutzbar sein, wenn die Antriebsleistung ausreicht.

### Energiegewinnung

Je schwerer und länger die beiden Rumpfhälften sind, desto größer wird das Moment, welches durch die Welleneinwirkung zwischen den beiden Rumpfhälften wirkt. Die theoretisch aufgebrachte Energie kann berechnet werden, wenn die Eigenschaften des Schiffes und der Wellen bekannt sind.

### Für welche Schiffsgröße eignet sich dieses Konzept?

Bei diesem Konzept muss geprüft werden, ab welcher Schiffsgröße die Energieerzeugung im Verhältnis zu den Reibungsverlusten am effizientesten ist. Da die Länge und das Gewicht des Schiffes die Kraft zur Energieerzeugung bestimmen, ergibt es bei der ersten Betrachtung Sinn, dieses Konzept für große Schiffe wie die heutigen Containerschiffe zu verwenden.

Dabei dürfen zwei Punkte nicht vernachlässigt werden.

1. Das Scharnier zwischen den Rümpfen nimmt abhängig vom maximalen Knickwinkel und der Höhe des Schiffes viel Platz in Anspruch.
2. Je länger der Rumpf wird, desto weniger tendieren die Rümpfe dazu, bei kleineren Wellen ein wirksames Moment aufzubauen. Die Energieproduktion erfolgt nur bei höheren und längeren Wellen.

### Systempotential als Hybridlösung

Wie im Kap [5.1.2] erklärt, kann das Konzept je nach Bauweise verschiedene Energieformen produzieren. Ob dieses Konzept als alleinige Energiequelle für den Betrieb eines Schiffes ausreicht, muss erforscht werden. Eine Kombination mit einem konventionellen Antrieb ist ebenfalls möglich.

Für die Kombination mit anderen klimaneutralen Energiegewinnungssystemen gilt Folgendes:

- **Kombination mit Solarzellen:**  
Wenn sich herausstellen sollte, dass dieses Konzept sich gut für große Schiffe eignet, kann die Deckfläche des Schiffes für Solarpanels genutzt werden. Die erzeugte Energie kann dem Antrieb zugeführt werden.
- **Kombination mit Segeln, Flettner Rotoren, Rumpfsegler:**  
Die Kombination mit Segel und Flettnerrotoren ist möglich. Die Bewegung der Rumpfteile zueinander muss bei der Gestaltung der Komponenten beachtet werden. Ein Rumpfdesign, welches Rumpfsegeln ermöglicht und ein Scharnier beinhaltet, ist sehr komplex und sollte erst in die Realität umgesetzt werden, wenn beide Technologien näher erforscht sind.

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

### - **Kombination mit Brennstoffzellen, Batteriebetrieb:**

Die Rumpfteile können ohne Probleme mit Batterien oder Brennstoffzellen ausgestattet werden.

### Schwachstelle Scharnier

Die Scharnierlagerung zwischen den beiden Rumpfhälften ist, abhängig vom Seegang und der Schiffsgröße, großen Belastungen ausgesetzt. Deswegen muss die Lagerung sorgfältig gewartet und regelmäßig auf Beschädigungen inspiziert werden. Im Extremfall kann das Lager zerstört werden. Als Folge würden sich die Rumpfhälften separieren. Dies würde mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Verlust des gesamten Schiffes führen.

### Betrieb

Die Rumpfformen sollten so ausgelegt sein, dass die beiden Rumpfhälften schon bei geringem Seegang anfangen, sich zueinander zu bewegen. Dies bedeutet für die gesamte Fracht und das Personal an Bord, dass sich das Schiff deutlich mehr bewegt als ein konventionelles Schiff.

### 5.1.4. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen

#### **Stärken:**

- Dieses System könnte für große Schiffstypen geeignet sein
- Das System kann als alleinige Energiequelle genutzt werden
- Möglichkeit der Erweiterung um weitere Scharniere

#### **Schwächen:**

- Die Lagerung zwischen den beiden Rumpfhälften ist ein Schwachpunkt
- Abhängigkeit von der Ausbreitungsrichtung der Wellen
- Das System nimmt viel Platz im Inneren des Schiffes ein
- Mehr Schiffsbewegung als üblich

### 5.1.5. Optimierungspotential

Dieses Konzept wird zurzeit nur für die stationäre Energiegewinnung erforscht. Für die Anwendung auf Schiffen gibt es mehrere Punkte, die weiter erforscht und optimiert werden sollten:

#### **1. Das Rumpfdesign**

Die Rumpfhälften sollten darauf ausgelegt sein, schon bei einem kleinen Wellengang eine maximale Relativbewegung zueinander zu erzeugen.

#### **2. Die Lagerung**

Das Lager zwischen den Rumpfhälften muss in der Lage sein, Kräfte, die durch Extremwetterereignisse zustande kommen, aufzunehmen.

#### **3. Die Energiegewinnung**

Die Anordnung und Auslegung von Hydraulikelementen und Anlagen zur Energieumwandlung sollte so effizient wie möglich sein, um den Energiegewinn aus der Bewegung zu optimieren.

### 5.1.6. Zukunftspotential

Projekte wie das „Seacat-WEC-System“ werden in Zukunft Ergebnisse liefern, wie erfolgreich mit einem zweiteiligen Rumpf Energie produziert werden kann. Mit Hilfe der gewonnenen Daten und Erkenntnissen kann dann eine Aussage dazu getroffen werden, ob dieses stationäre Konzept ausreichend Energie produziert, um es für Schiffe zu adaptieren. Für den Bereich des Scharniers sollten Strömungsberechnungen genutzt werden, um die Reibungsverluste minimal zu halten. Eine in dieser Arbeit nicht betrachtete alternative Idee könnte sein, dass „Pelamis WEC-System“ von Schiffen

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

ziehen zu lassen. Dabei sollte das Verhältnis von Erhöhung der Reibungsverluste zu Energieproduktion besonders beachtet werden.

### 5.2. Nutzung von Oszillierenden Wassersäulen

Der Anstoß für dieses Konzept kommt vom Unternehmen „ZShips International CCC Ltd“ aus Kanada. Das Startup will das bereits bewährte Prinzip der oszillierenden Wassersäulen auf Schiffen anwenden, um elektrische Energie für den Antrieb zu gewinnen. [34]

#### 5.2.1. Aufbau



Abbildung 50: Ein schwimmendes OWC-Wellenkraftwerk [63]

Es wird zunächst der Aufbau eines stationären Systems betrachtet:

Das Prinzip der Oszillierenden Wassersäulen, Eng: „Oscillating Water Column (OWC)“, benötigt kaum mechanische Teile. Das System kann sowohl als festes Bauwerk an der Küste, als auch als schwimmende Plattform auf dem Wasser errichtet werden (vgl. Abb. 50). Das Grundsystem besteht aus einer mit Luft gefüllten Kammer, die im Wasser steht. Die Kammer besitzt keinen Boden und ist offen zum Wasser. Am oberen Ende der Kammer ist eine Öffnung, an welcher eine Turbine angebracht ist (vgl. Abb. 51).

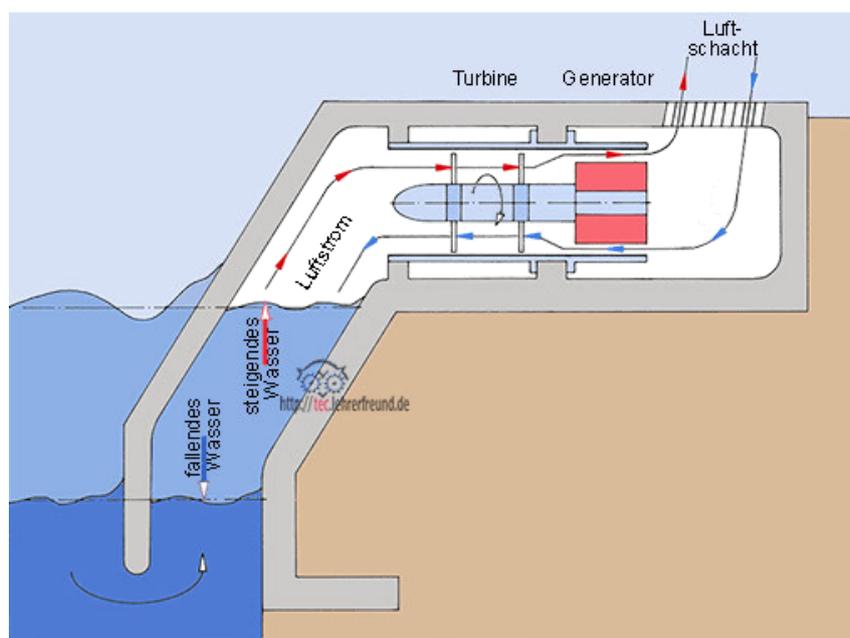


Abbildung 51: Schnittdarstellung eines OWC-Systems an einer Küste [59]

### 5.2.2. Funktionsweise eines stationären Systems

Ein OWC-System nutzt den oszillierenden Pegel der Wasseroberfläche bei Wellen. Steigt beispielsweise die Wasseroberfläche vor der Kammer durch eine Welle an, wird durch einen Druckausgleich der Wasserstand in der Kammer der Anlage zwangsläufig erhöht. Diese Erhöhung verdrängt ein Luftvolumen, welches nun durch Wasser ersetzt wird. Das verdrängte Luftvolumen wird durch eine Öffnung am oberen Ende der Kammer abgeführt. In dieser Öffnung sitzt eine Turbine, die durch die Strömungsgeschwindigkeit der Luft elektrische Energie produziert. Es gibt vier Faktoren, die die Energieproduktion beeinflussen:

**1. Die Wellenhöhe:**

Hier gilt der Zusammenhang: Je höher die Wellen, desto mehr Luftvolumen oszilliert in der Kammer. Dementsprechend steigt die Energieproduktion. Aus diesem Grund werden OWC Kraftwerke an Küstenlinien mit erhöhtem Wellenaufkommen eingesetzt. Wie in Kapitel 2.3 gezeigt, hat die Wellenhöhe einen quadratischen Einfluss auf das Leistungspotential einer Welle.

**2. Die Steigung der Welle:**

Je steiler eine Welle ist, desto schneller steigt und fällt der Wasserpegel in der Kammer. Es erhöht sich damit die Durchflussgeschwindigkeit der Turbine und mit ihr die Abgabeleistung.

**3. Die Grundfläche der Kammer:**

Zusammen mit der Wellenhöhe bestimmt die Grundfläche der Kammer, wie viel Luftvolumen durch den oszillierenden Wasserpegel verdrängt wird. Bei der Fläche der Kammer muss beachtet werden, wie gleichmäßig die Wellen auf die Kammer treffen. Bei einer zu großen Kammer kann es passieren, dass der Wasserstand innerhalb der Kammer nicht konstant ist. Dadurch würde sich unter Umständen die Änderung des Luftvolumens reduzieren.

**4. Der Durchmesser der Turbine:**

Das verdrängte Luftvolumen kann nur durch die Querschnittsfläche der Turbine entweichen. Dabei muss erforscht werden, welcher Querschnitt für eine Anlage und die entsprechende Turbine optimal ist. Bei einem zu großen Durchmesser kann die verdrängte Luft leicht entweichen. Dafür ist die Luftgeschwindigkeit durch die große Querschnittsfläche gering. Dies kann bedeuten, dass die Durchflussgeschwindigkeit außerhalb des effektiv wirksamen Bereichs der Turbine liegt. Andersherum darf der Durchmesser der Öffnung auch nicht zu klein gewählt werden. Da Luft ein kompressibles Medium ist, würde bei einer zu kleinen Öffnung die Luft in der Kammer verdichtet werden. Der geringe Durchmesser der Öffnung wirkt wie eine Blende, die den Druckabbau in der Kammer behindert.

Wenn die Kompressibilität der Luft vernachlässigt wird, können die Zusammenhänge wie folgt verdeutlicht werden:

Das verdrängte Luftvolumen  $[\Delta V_k]$  wird durch die Wellenhöhe  $[h_w]$  und die Fläche der Kammer  $[A_k]$  beeinflusst

$$\Delta V_k = h_w * A_k$$

Um später die mittlere Geschwindigkeit der Luft in der Turbine ermitteln zu können, muss die Zeit bekannt sein, die zwischen dem Wassertiefstand und dem Wasserhöchststand in der Kammer liegt  $[t]$ . Dabei gibt es einen direkten Zusammenhang zu der Wellenperiode  $[p]$

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

$$t = \frac{1}{2}p$$

Aus dem Durchmesser der Turbine [ $d_t$ ] muss die Querschnittsfläche [ $A_t$ ] berechnet werden

$$A_t = \frac{\pi * d_t^2}{4}$$

Somit kann die mittlere Durchflussgeschwindigkeit [ $v_{t\ opt}$ ] durch die Turbine bestimmt werden

$$v_{t\ opt} = \frac{\Delta V_k}{A_t * t}$$

Die berechnete Geschwindigkeit ist lediglich eine Annäherung an die Realität. Neben dem vernachlässigten Faktor der Kompressibilität spielt die Form der Wellen eine Rolle. Die Berechnung geht von einer gleichbleibenden Steigung der Welle aus. In der Realität entspricht die Form aber annähernd der eines Sinusgraphen.

### 5.2.3. Adaption für die Verwendung an einem Schiff

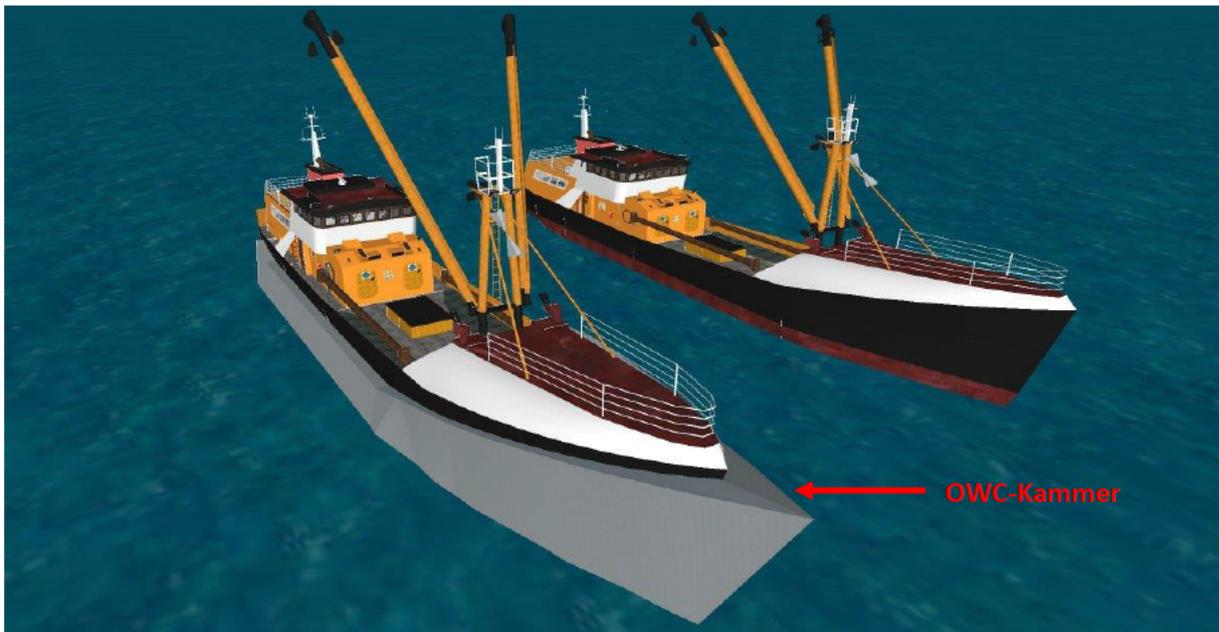


Abbildung 52: In grau der Anbau um den ursprünglichen Rumpf [34]

Um dieses System an einem Schiff nutzen zu können, muss der Rumpf modifiziert werden. Das System wird praktisch gesehen um den Schiffsrumpf herum gebaut (vgl. Abb. 52.)

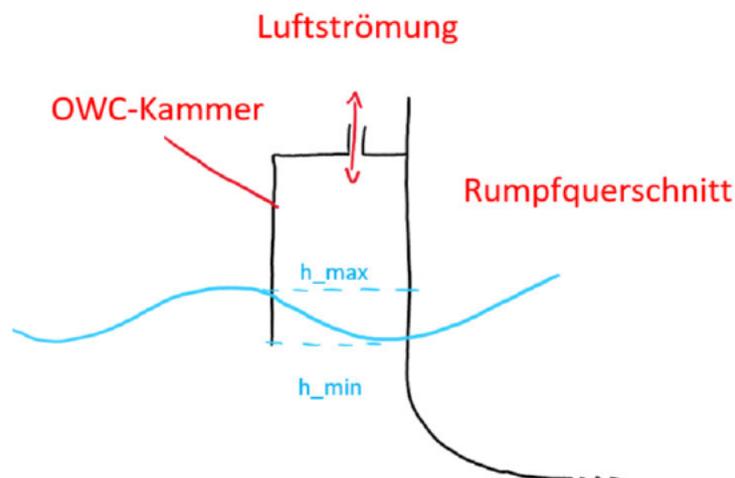


Abbildung 53: Querschnitt eines Rumpfs mit OWC-System

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

In ähnlicher Form wie bei den stationären Kraftwerken könnte das OWC-System auch an einem Schiffsrumpf montiert werden (vgl. Abb. 53). Der größte Unterschied ist hierbei, dass sich ein Schiff im Wasser durch die Wellen bewegt. Daher spielt neben der Wellenhöhe und Form auch die Eigenbewegung des Schiffsrumpfes eine Rolle.

Des Weiteren muss der Aufbau und die Position der Kammern erforscht werden. Anders als bei den stationären Kraftwerken kann die Richtung, aus der die Wellen kommen, nicht vorher festgelegt und die Anlage entsprechend ausgelegt werden. Generell können die Wellen, wenn ein Schiff auf dem Meer ist, aus jeder Richtung kommen. Nur bei Sturmfahrten, wenn die Gefahr des Kenterns besteht, steuert man ein Schiff gezielt mit dem Bug in die Richtung, aus der die Wellen kommen.

Während der Fahrt liegen an einem Schiffsrumpf, bezogen auf das Deck, zu jedem Zeitpunkt diverse Wasserstände an. So kann am Bug der Wasserstand zu einem Zeitpunkt maximal sein, während er am Heck gerade minimal ist.

### 5.2.4. Stand der Technik

Das OWC System hat sich für die stationäre Energiegewinnung bereits bewährt und wird an mehreren Standorten mit erhöhtem Wellenaufkommen zur Energieproduktion betrieben. Dabei wurden verschiedenste Bauformen des Systems realisiert.

1. Anlagen an der Küste
2. Schwimmende Anlagen vor der Küste
3. OWC Bojen vor der Küste

Die Funktionsweise ist bei allen Varianten gleich. Das Unternehmen „ZShips“ veröffentlicht seit 2017 keine Updates zu diesem Konzept [34]. Dem Konzept sehr nahe kommt jedoch das Schiff „Havkratt“. Das norwegische Unternehmen „Kvernevik Engineering“ installierte 2015 an dem überflüssigen Schiffstrawler vier OWC-Kammern mit jeweils einer Leistung von 50kW (vgl. Abb. 54) [35]. Dieser Aufbau könnte theoretisch in der Lage sein, sich selbstständig fortzubewegen. Vorgesehen ist das umgebaute Schiff für die stationäre Energieversorgung.



Abbildung 54: Der umgebaute Fischtrawler mit den vier OWC-Kammern am Bug [35]

### 5.2.5. Bewertung anhand der Anforderungen

Eine erweiterte Bewertung anhand der gestellten Anforderungen befindet sich im Anhang B.

#### Einschätzung der Reibung und der erreichbaren Geschwindigkeit

Durch die Erweiterung eines Rumpfes mit dem OWC-System wird der Strömungswiderstand des Rumpfes erhöht. Inwieweit sich die Reibungsverluste erhöhen, muss im Anwendungsfall durch eine CFD-Simulation ermittelt werden.

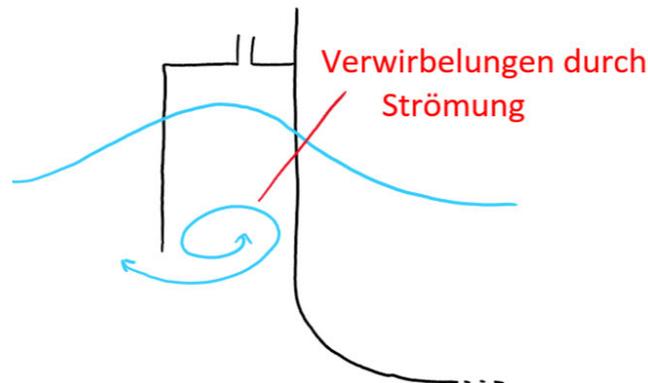


Abbildung 55: Mögliche Verwirbelungen an der OWC-Kammer

Das ein- und ausströmende Wasser kann in Kombination mit der Bewegungsgeschwindigkeit zu Verwirbelungen im Wasser führen, die die Reibungsverluste erhöhen (vgl. Abb.55).

Die erreichbare Geschwindigkeit ist nach Kapitel 2.4 direkt von den Reibverlusten am Rumpf abhängig. Denkbar ist, dass sich mit zunehmender Geschwindigkeit die Verwirbelungseffekte des Wassers in den Kammern des Systems zunehmen. Folglich wäre dieses Konzept nur für langsame Geschwindigkeiten geeignet.

#### Energiegewinn und Wirkungsgrad stationärer Anlagen

Stationäre Anlagen sind in der Lage, Energiemengen von bis zu 300kW zu erzeugen. Diese Anlagen sind in ihrer Größe allerdings kaum in einer ähnlichen Weise auf einem Schiff zu realisieren. Eine stationäre Anlage in der spanischen Bucht Mutirku an der Biskaya produziert beispielsweise durchschnittlich 246kW (vgl. Abb.56). Die Anlage besteht aus 14 Kammern mit zugehörigen Turbinen, die jeweils 18,5 kW abgeben können. Messdaten über die Wellenverhältnisse und Daten über die Leistungsabgabe der Anlage ergeben einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 26%. Als Spitzenwirkungsgrad wurden bis zu 31% berechnet [36].



Abbildung 56: Das WEC-Kraftwerk: "Mutriku Wave Energy Plant" [37]

### Kompromisse bei der Anwendung auf Schiffen

Ein System, welches einen erheblichen Anteil des Schiffes einnimmt, erzeugt verhältnismäßig viel Energie. Allerdings bleibt nur wenig Raum für die eigentliche Nutzung des Schiffes übrig. Zusätzlich ist es wahrscheinlich, dass dieses System den Reibungswiderstand des Rumpfes so weit erhöht, dass trotz des hohen Energiegewinns kaum ein Vortrieb möglich ist.

Ein kleineres System nimmt nur wenig Platz an Bord ein und erhöht die Reibung nur wenig. Aufgrund der Größe produziert das System jedoch nur wenig Energie. Dadurch sind, wenn überhaupt, nur kleine Geschwindigkeiten möglich.

Es muss also ein Mittelmaß in der Systemgröße gefunden werden, um eine effiziente Schiffsgeschwindigkeit zu erreichen und gleichzeitig genug Raum für die Nutzung des Schiffes beizubehalten.

### Schiffsgröße für Anwendung

Ein genannter, entscheidender Faktor für die Energiegewinnung aus einem OWC-System ist, neben der Periode, die Wellenhöhe. Bezogen auf ein Schiff, bei dem sich der Rumpf und somit das System relativ zum Wasser bewegt, ist neben der Wellenhöhe also auch die Bewegung des Schiffes ein Faktor.

**Fall 1:** Bewegt sich das Schiff mit den Wellen auf und ab, verändert sich der Wasserpegel bezogen auf den Rumpf nur wenig. Die Änderung des Wasserstandes in den Kammern ist also geringer als die Wellenhöhe.

**Fall 2:** Das Schiff liegt trotz Wellen nahezu still im Wasser. Dadurch entspricht die Änderung des Wasserstandes in den Kammern der Wellenhöhe.

**Fall 3:** Das Schiff bewegt sich teilweise entgegengesetzt zur vertikalen Wellenbewegung. Dadurch fällt die Änderung des Wasserpegels in den Kammern größer aus als die Wellenhöhe.

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

Für die Nutzung auf einem Schiff sollten die Fälle **2** und **3** angestrebt werden. Dem Fall **1** würde ein kleines Boot (ca. bis zu 10 Meter Länge) entsprechen, das sich durch die Wellen auf und ab heben lässt. Seine Massenträgheit ist dabei zu gering, um in die Wellen einzutauchen.

Dem Fall **3** entsprechen Schiffe mit einer mittleren Länge (ca. 10-50m Länge, siehe auch Abbildung 51). Diese werden durch die Welleneinwirkung in Bewegung versetzt. Durch ihre Massenträgheit taucht der Rumpf in die Wellen ein und bewirkt so eine Änderung der Wasserhöhe in den Kammern, die unter den richtigen Bedingungen größer als die Wellenhöhe sein kann.

Für den Fall **2** bedarf es großer Schiffe (über 50m Länge). Diese werden aufgrund ihrer Länge und Massenträgheit auch bei mittleren Wellen noch nicht in nennenswerte Bewegungen versetzt. Dadurch entspricht die Wassersäulenänderung im Rumpf nahezu der Wellenhöhe.

Dieser Logik zufolge sind also mittlere und große Schiffe gut für das OWC-System geeignet.

### **Systempotential als Hybridlösung**

Das System der oszillierenden Wassersäulen produziert durch die Turbine elektrische Energie. Um diese Energie für den Vortrieb des Schiffes nutzen zu können, muss ein Elektromotor im Antriebsstrang installiert werden.

Dabei ist eine Kombination mit einem konventionellen Antrieb möglich. Hierbei kann der Elektromotor zusammen mit dem konventionellen Antrieb in Reihe arbeiten. Um die Energieproduktion weiter zu erhöhen ist es auch möglich, das System um Solarpanels, Brennstoffzellen oder Batterien zu erweitern. Eine Kombination mit Segeln, Flettnerrotoren, Kite-Drachen oder auch eine Ausführung als Rumpfsegler ist möglich.

### **Installation**

Laut "ZShips" ist es möglich, dieses OWC-System an bestehenden Schiffen nachzurüsten. Dabei werden die Kammern wie ein Kleid um den Rumpf herum angeordnet und die Turbinen, sowie die Luftführung, auf oder in dem Schiff untergebracht [34].

Um den Energiegewinn zu maximieren, wird es jedoch nicht ausreichen, ein bestehendes Schiff auf dieses System umzurüsten. Wenn die Rumpfform auf den Einsatz dieses Systems so optimiert wird, dass die Relativbewegung des Rumpfes zur Wasseroberfläche maximiert wird, lässt sich die Energieproduktion erhöhen.

### **Wartung, Betrieb und Lebenserwartung**

Alle Komponenten dieses Systems sind salzhaltigem Wasser und salzhaltiger Luft ausgesetzt. Dementsprechend ist im Bereich der Turbine darauf zu achten, dass die Materialien und die Elektrik nicht durch Korrosion beschädigt werden. Gleiches gilt, sollten im System Ventile zur Luftführung vorhanden sein.

Im Betrieb muss ausgeschlossen werden, dass durch extremen Wellengang die Wassersäule in der Kammer bis zur Turbine steigt. Das Wasser würde die Turbine in einem solchen Fall schlagartig belasten. Eine Zerstörung der einzelnen Rotorflügel wäre möglich.

Je nach Korrosionsbeständigkeit und Belastung der Turbine muss diese regelmäßig gewartet und ausgetauscht werden. Gleiches gilt für Ventile. Die Kammern müssen, wie es auch bei einem Schiffsrumpf üblich ist, beschichtet werden, um das Wachstum von Meeresorganismen auf den Oberflächen zu vermeiden. Dieser würde die Reibeigenschaften des Rumpfes und der Kammern verschlechtern und den Energiebedarf bzw. die Endgeschwindigkeit negativ beeinflussen.

### 5.2.6. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen

**Stärken:**

- Durch die Anordnung um den Rumpf wird der ursprüngliche Laderaum beibehalten
- Passive Energieproduktion
- Relativ simple Konstruktion mit wenig beweglichen Teilen
- Möglichkeit der Nachrüstung bei Schiffen

**Schwächen:**

- Keine zuverlässige Aussage über die Energieproduktion möglich
- Negativer Einfluss auf die Strömungseigenschaften des Rumpfes
- Die erhöhte Breite des Rumpfes stört bei Hafeneinfahrten und beim Be- und Entladen

### 5.2.7. Optimierungspotential

Folgende Bereiche des Systems können optimiert werden:

**1. Die Rumpfform**

Diese kann so gestaltet werden, dass sich bei Welleneinwirkung eine maximale Relativbewegung zwischen Rumpf und Wasseroberfläche einstellt.

**2. Größe, Anzahl und Position der Kammern**

Es sollte erforscht werden, an welchen Positionen am Schiffsrumpf Kammern am effektivsten sind. Des Weiteren sollten die Kammern nicht zu groß gewählt werden, um zu verhindern, dass der Wasserstand in den Kammern verschiedene Höhen gleichzeitig annimmt und somit weniger Luft verdrängt wird.

**3. Anzahl der Turbinen**

Je nach Anzahl der Kammern kann es sinnvoll sein, dass eine Turbine von mehreren Kammern angetrieben wird. Dabei müssen Ventile installiert werden, um die Strömungsrichtungen zu steuern. Ansonsten kann es dazu kommen, dass die Luftströmungen der Kammern sich gegenseitig ausgleichen.

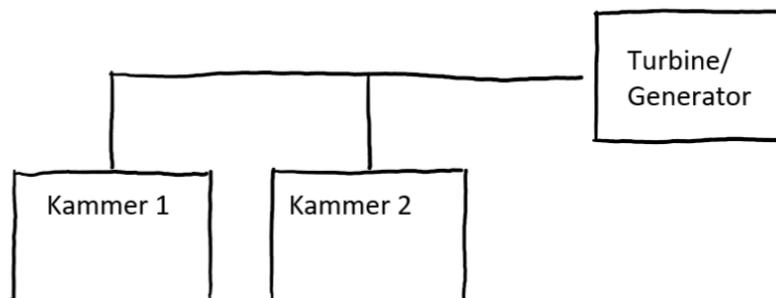


Abbildung 57: Mehrere Kammern versorgen eine Turbine

**4. Gleichbleibende Anströmrichtung an den Turbinen**

In der einfachsten Variante dieses Systems ändert sich die Strömungsrichtung der Luft mit dem Heben und Senken des Wasserpegels in der Kammer. Dadurch ändert sich die Drehrichtung der Turbine ständig. Über eine Ventilsteuerung könnte diese Umkehrung der Drehrichtung beseitigt und somit die Effektivität der Turbine gesteigert werden.

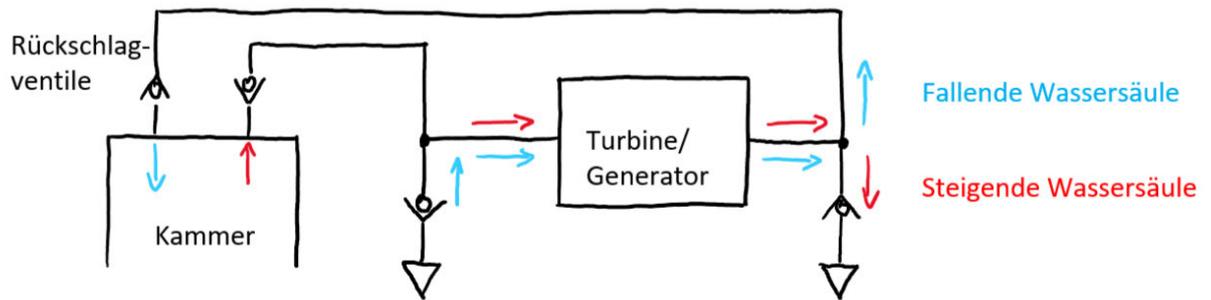


Abbildung 58: Ventilsteuerung für eine gleichbleibende Anströmrichtung der Turbine

### 5. Verstellbare Rotorblätter

Es sollte erforscht werden, ob eine Turbine mit verstellbaren Rotorblättern die Energieproduktion erhöhen kann. Dabei werden die Rotorblätter je nach Strömungsgeschwindigkeit der Luft in unterschiedlichen Winkeln angestellt. Somit kann das entstehende Antriebsmoment innerhalb der Turbine für die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit optimiert werden.

### 6. Nutzung der Kammern zur Erhöhung der Stabilität

Wenn der Luftauslass am oberen Ende der Kammern blockiert wird, erhöht sich die effektive Breite des Schiffes, die zur Stabilität gegen Rollen beiträgt. Bei stürmischer See könnte so die Sicherheit des Schiffes erhöht werden.

#### 5.2.8. Zukunftschancen

Die Forschungsergebnisse aus dem stationären Wellenkraftwerk von „Mutriku“ zeigen, dass die Energiegewinnung über das OWC-Prinzip mit Wirkungsgraden bis zu 31% durchaus effizient ist. Für die Anwendung auf Schiffen gibt es seit 2017 keine neuen Informationen des Startup-Unternehmens „ZShips“. Die Idee des Konzeptes bedarf weiterer Forschung und Entwicklung. Mit Modellversuchen und Simulationen können Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit gewonnen werden. Bei einem anschließenden Vergleich mit anderen Konzepten kann entschieden werden, ob diese Technologie weiterverfolgt werden sollte.

### 5.3. Nutzung einer Schwungmasse

Heutzutage werden Rümpfe in der Entwicklung, neben optimalen Strömungseigenschaften, auch auf eine stabile Lage im Wasser ausgelegt. Die Schiffsrouten auf den Weltmeeren folgen oft über tausende Kilometer einer geraden Linie. Wenn Fahrtrichtung und Wellenausbreitungsrichtung konstant sind, wird die Bewegung eines Schiffes rhythmisch annähernd gleichmäßig wiederholt.

Um dieses Verhalten für die Energiegewinnung nutzbar zu machen, ist es möglich, im Schiff Schwungmassen zu installieren. Dieser Ansatz wird bereits für den stationären Energiegewinn vom finnischen Unternehmen „Wello“ umgesetzt.

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

### 5.3.1. Aufbau

Es wird zunächst das System von „Wello“ betrachtet:



Abbildung 59: Ein „Wello-Pinguin“ im Betrieb. Ansicht auf die breite Rumpfseite [38]



Abbildung 60: Ansicht auf die breite Rumpfseite ( [38]

Aus einigen Perspektiven sieht der „Wello`s Pinguin“ bereits aus wie ein Schiff ohne Aufbauten (vgl. Abb. 59 und 60). Im Betrieb macht die Bewegung des Rumpfes den Eindruck, als würde das ganze System nahezu kentern. In der Realität ist der „Pinguin“ allerdings ein asymmetrisch geformter Schiffsrumpf (vgl. Abb. 61). Dieser besitzt keinen Antrieb und wird im Betrieb mit Ankerketten ortsfest am Meeresboden gehalten, während die Wellen auf ihn einwirken.

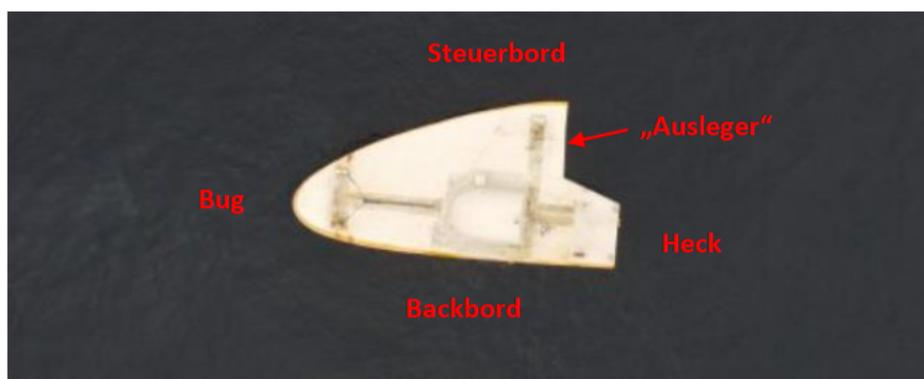


Abbildung 61: Die Draufsicht zeigt den asymmetrischen Rumpf deutlich [38]

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

Im Inneren des Rumpfes befindet sich eine senkrecht zum Wasser angeordnete Exzenterwelle. Am Exzenter ist eine große Schwungmasse befestigt. Am oberen Ende der Welle ist ein Generator verbaut, der die Drehbewegung der Welle in elektrische Energie umwandelt.

### 5.3.2. Funktionsweise

Im Gegensatz zu anderen Rümpfen, ist der des „Wello-Pinguins“ darauf ausgelegt, sich schon bei kleinen Wellen stark zu bewegen. Hierfür muss die Rumpfform jeweils in Längs- als auch Querrichtung betrachtet werden.

Wie auch bei jedem anderen Schiff sorgt eine Welle für eine Änderung der Auftriebskraft am Rumpf. Trifft eine Welle auf den Bug, steigt dort die Auftriebskraft an. Das Kräftegleichgewicht aus Gleichung (Kapitel 2.4) wird zum Ungleichgewicht. So entsteht eine Beschleunigung und der Bug fängt an, aufzusteigen.

Die asymmetrische Rumpfform ist speziell dafür ausgelegt, den Rumpf bei Wellen in eine Taumelbewegung um die Mittelachse zu versetzen. Mit Hilfe von Ballasttanks kann eine größtmögliche Taumelbewegung erzeugt werden. Wenn sich der Rumpf aus seiner Ruhelage heraus neigt, sorgt die Schwerkraft dafür, dass sich das Exzentergewicht immer in Richtung der Neigung dreht. Das Gewicht verstärkt dabei die Neigung durch die Verlagerung des Schwerpunktes. Ab einem gewissen Punkt übersteigt die Auftriebskraft die momentane Gewichtskraft und sorgt dafür, dass sich der Rumpf wieder aufrichtet. Im nächsten Moment neigt sich der Rumpf in eine andere Richtung und lässt die Schwungmasse in die nächste Position drehen.

### 5.3.3. Veranschaulichung des Bewegungsablaufes

In den folgenden Abbildungen ist die Backbordseite (linke Seite) des Rumpfes zu erkennen (vgl. Abb. 61). Die breitere Rumpfhälfte, im Folgenden Ausleger genannt, befindet sich auf der dem Betrachter abgewandten Seite. Dargestellt sind außerdem:

- In Orange: die Exzenterwelle mit Gewicht
- In Gelb: der Generator
- In Grün: der Ballasttank

#### 1. Eine Welle trifft auf den Bug:

- Der Bug steigt auf
- Der Ausleger sinkt auf die tiefste Position, der Rumpf rollt nach Steuerbord
- Das Heck sinkt
  - ➔ Der Exzenter beginnt sich im Uhrzeigersinn in Richtung des Auslegers/Steuerbord zu drehen

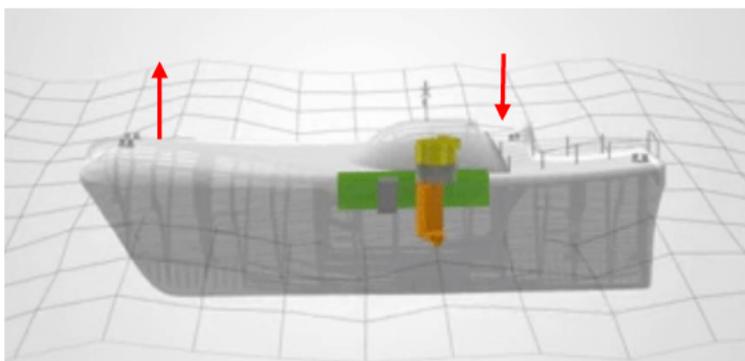


Abbildung 62: Einfahrt in die Welle [38]

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

### 2. Der Wellenberg befindet sich unterhalb des ersten Drittels des Rumpfes:

- Der Bug hat seinen höchsten Punkt erreicht
- Der Ausleger steigt auf, der Rumpf rollt in die Waagerechte
- Das Heck befindet sich noch im Wellental
  - ➔ Der Exzenter dreht sich in Richtung Heck

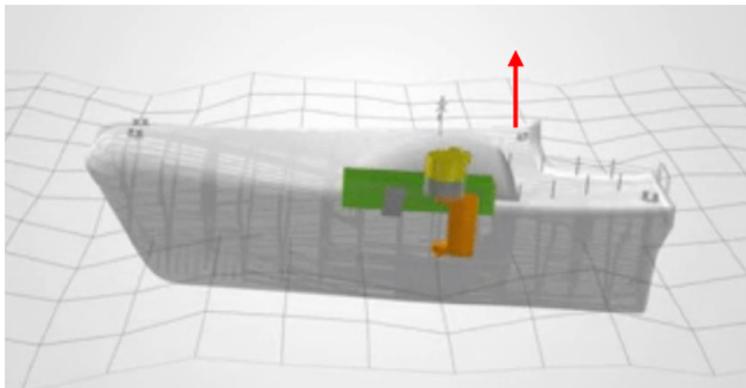


Abbildung 63: Der Wellenkamm steht unter dem Bug [38]

### 3. Der Wellenberg befindet sich mittig unter dem Rumpf:

- Der Bug sinkt
- Das Heck steigt
- Kurzzeitig befinden sich Bug und Heck auf der gleichen Höhe
- Der Ausleger hat seinen höchsten Punkt erreicht, der Rumpf rollt nach Backbord
  - ➔ Der Exzenter dreht sich in Richtung Backbord

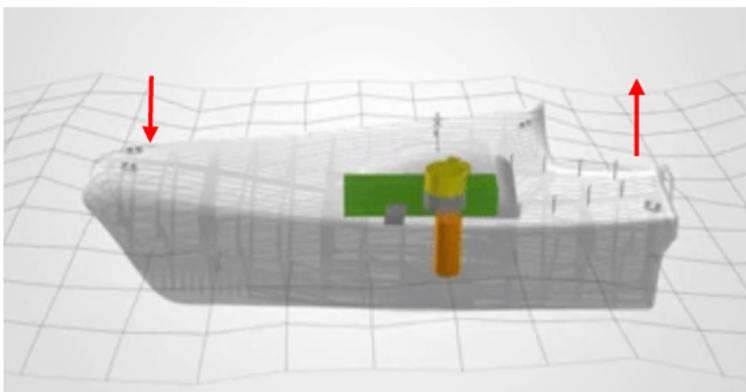


Abbildung 64: Der Wellenkamm befindet sich mittig unter dem Schiff [38]

### 4. Der Wellenberg befindet sich unter dem hinteren Drittel des Rumpfes:

- Das Heck erreicht seine höchsten Punkt
- Der Ausleger sinkt, der Rumpf rollt in die Waagerechte
- Der Bug erreicht den niedrigsten Punkt
  - ➔ Der Exzenter dreht sich in Richtung Bug

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

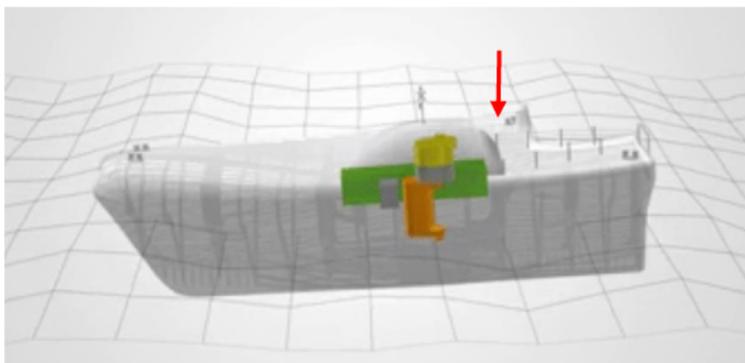


Abbildung 65: Der Wellenkamm befindet sich unter dem Heck [38]

Die Exzenterwelle wird in eine ständige Rotation versetzt. Der dadurch produzierte Strom wird beim „Wello-Pinguin“ durch ein Unterseekabel an Land geführt.

### 5.3.4. Idee zur Erweiterung des Systems um einen Antrieb

Dieses System kann sich mit geringem Aufwand selbst fortbewegen. Um die produzierte Energie zu nutzen, wird ein Elektromotor, welcher eine Schiffsschraube antreibt, installiert. Zusätzlich wird ein Ruder benötigt, um das Schiff effektiv steuern zu können. Für die Trimmung durch die Ballasttanks im Ausleger muss im Fahrtbetrieb ein Kompromiss zwischen maximaler Energieerzeugung und minimalem Strömungswiderstand gefunden werden.

### 5.3.5. Stand der Technik

Seit 2010 wird ein „fullscale Prototyp“ des „Wello-Pinguins“ getestet. Das System hielt Wellen von bis zu 18m Höhe stand und produzierte erfolgreich Energie. 2019 wurde eine kommerziell nutzbare Variante zu Wasser gelassen. Der 44m lange Rumpf konnte dabei eine Leistung von bis zu 600 kW produzieren.

### 5.3.6. Bewertung Anhand der Anforderungen

Eine erweiterte Bewertung anhand der gestellten Anforderungen befindet sich im Anhang B.

#### Einschätzung der Reibverluste und dessen Folgen

Ein Schiff mit dem Schwungmassensystem besitzt keine Bauteile an den Außenseiten des Rumpfes, welche den Strömungswiderstand erhöhen könnten. Jedoch werden durch die asymmetrische Form des Rumpfes die Reibungsverluste auf der Seite des Auslegers höher sein. Als Folge würde das Schiff ohne Ruder immer einen Kreis fahren.

#### Systempotential als Hybridlösung

Basierend auf der Leistungsangabe des „Wello-Pinguins“ von bis zu 600 kW kann davon ausgegangen werden, dass dieses Konzept ausreichend Energie produziert, um sich selbst anzutreiben [38]. Um jedoch Geschwindigkeiten von über 10 Knoten erreichen zu können, wird die Leistung des WEC-Systems voraussichtlich nicht ausreichen.

Ein Hybridbetrieb mit fossilen Antrieben kann verwendet werden. Dabei muss beachtet werden, dass der Verbrennungsmotor, sowie die Kraftstoffzuführung durch die intensive Schiffsbewegung nicht negativ beeinflusst werden dürfen. Es bietet sich an, dass der Verbrennungsmotor einen Generator antreibt, der wiederum den Antriebsmotor mit Energie versorgt. Dadurch wäre die Schraubendrehzahl unabhängig von der Drehzahl des Verbrennungsmotors. Durch die Kombination der Leistungen des WEC-Systems und des Verbrennungsmotors sind auch höhere Geschwindigkeiten erreichbar. Der Verbrennungsmotor ermöglicht zusätzlich das Manövrieren in wellenarmen Gewässern.

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

Das System kann auch um klimaneutrale Energieformen erweitert werden. Es bietet sich an, die Deckfläche für Solarpanels zu nutzen. Diese erhöhen die Leistung des Gesamtsystems. Mit einem Energiespeicher an Bord kann das Schiff auch in wellenarmen Gewässern angetrieben werden. Windkraft sollte nicht zusammen mit diesem Konzept genutzt werden, da Segel, Flettnerrotoren, etc. die Taumelbewegung behindern.

### Folgen der Schiffsbewegung

Dieses Konzept ist darauf ausgelegt, das Schiff in eine taumelnde Bewegung zu versetzen. Diese erschwert die wirtschaftliche Nutzung des Schiffes. Eine solche Bewegung soll bei einem konventionellen Schiff im Normalfall minimiert werden, um Frachten und Personen, ohne Gefahren und negative Auswirkungen, sicher transportieren zu können. Es sollte bedacht werden, für welche Art von Einsätzen ein Schiff mit diesem Konzept genutzt werden kann.

### 5.3.7. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen

#### **Stärken:**

- Voraussichtlich ausreichende Energieproduktion für den Vortrieb
- Keine signifikante Erhöhung des Strömungswiderstandes
- Sturmsicheres Rumpfdesign
- Das Konzept ist als stationäre Variante bereits im Einsatz

#### **Schwächen:**

- Taumelbewegung ist unangenehm für Menschen an Bord
- Taumelbewegung erfordert intensive Ladungssicherung
- Schwungmasse im Inneren des Schiffes nimmt viel Raum ein
- Komplexe Steuerung von Generatorregelung, Antrieb und Ruder

### 5.3.8. Optimierungspotential

Mehrere Aspekte dieses Konzeptes sollten weiter erforscht und optimiert werden:

#### **1. Die Antriebseinheit**

Es gibt verschiedene Arten der Antriebseinheiten. Es besteht die Gefahr, dass der kontinuierliche Antrieb durch eine Schiffsschraube die Taumelbewegung des Schiffes behindert. Hier sollte erforscht werden, ob es möglich ist, die Antriebskraft aktiv zu ändern, sodass die Taumelbewegung nicht behindert wird.

#### **2. Ausgleichen der asymmetrischen Reibung**

Folgende Ansätze wirken der asymmetrischen Reibung entgegen und erleichtern somit das Geradeausfahren des Schiffes:

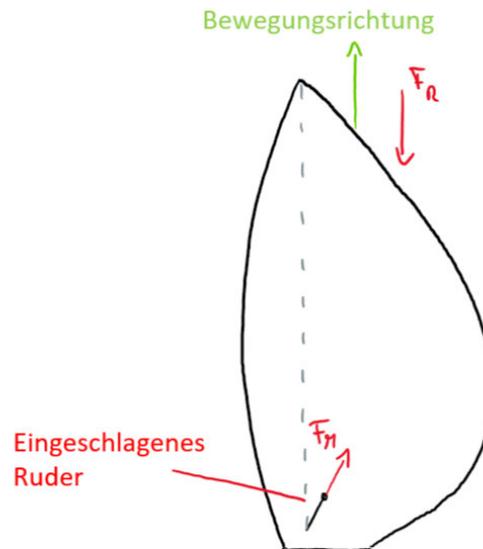


Abbildung 66: Das schräggestellte Ruder sorgt für Geradeausfahrt

- Das Ruder gleicht die asymmetrische Reibung aus. Dabei muss das Ruder bei Geradeausfahrt bereits leicht eingeschlagen sein. Dabei erzeugt das Ruder ebenfalls Reibung. Damit sinkt die Effizienz des Antriebes (vgl. Abb. 66).

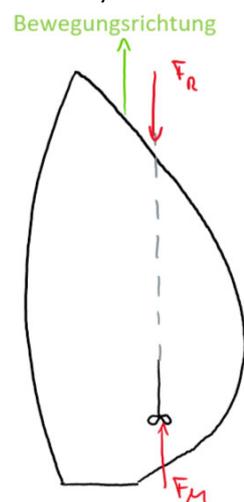


Abbildung 67: Der versetzte Antrieb sorgt für Geradeausfahrt

- Der Antriebsstrang inklusive Propeller wird außermittig im Schiff angeordnet. Wenn die Propellerwelle in Richtung des Auslegers verschoben wird, sodass die Antriebskraft kollinear zur der Reibungskraft wirkt, kann die asymmetrische Reibung ausgeglichen werden. Durch diese Lösung werden keine zusätzlichen Reibverluste eingebracht (vgl. Abb. 67).

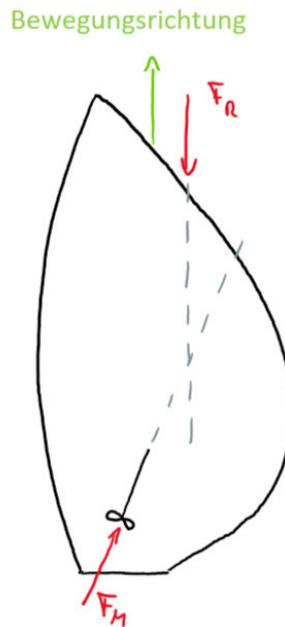


Abbildung 68: Der schräggestellte Antrieb sorgt für Geradeausfahrt

- Der Antriebsstrang wird mit einem Winkelversatz zur Fahrtrichtung installiert. Durch den schrägen Schub des Propellers wird die asymmetrische Reibung ausgeglichen (vgl. Abb. 68).

### 3. Die Rumpfform

Beim stationären Konzept des „Wello Pinguins“ ist die Rumpfform rein auf die Maximierung der Energieproduktion ausgelegt. Soll ein ähnliches Konzept für die Schifffahrt genutzt werden, müssen mehrere Aspekte bedacht werden:

- Maximierung der Energieproduktion
- Minimierung des Strömungswiderstandes
- Maximierung der Ladungskapazitäten

### 4. Eigenschaften der Schwungmasse

Folgende Eigenschaften der Schwungmasse sollten für eine maximale Energieproduktion optimiert werden:

- Die Masse
- Die Exzentrizität
- Die Positionierung im Rumpf

### 5. Steuerung des Generators

Die Energieproduktion des Generators ist abhängig von der Drehzahl und des an der Eingangswelle anliegenden Drehmoments. Über eine Regelung wird die Energieproduktion und somit auch das abbremsende Moment des Generators gesteuert. Diese Regelung sollte optimiert werden, um die Energieproduktion auf Dauer maximal zu halten.

- Beispiel: Erhöht die Regelung zu einem Zeitpunkt die Energieproduktion zu stark, wird die Schwungmasse abgebremst und verliert den Rhythmus der Taumelbewegung.

### 6. Aktive Steuerung der Ballasttanks

Das Schiff soll bei verschiedenen Wellengrößen Energie produzieren können. Um die Taumelbewegung sowohl bei kleinen als auch große Wellen einleiten zu können, muss das Schiff über Ballasttanks getrimmt werden. Die Erforschung der optimalen Gewichtsverteilung in Abhängigkeit von Ladung und Wellengang ist erforderlich.

### 7. Optimierung für die wirtschaftliche Nutzung

Ein Schiff hat immer einen definierten Verwendungszweck. Durch die Taumelbewegung ist dieses Konzept nicht für jeden Anwendungsfall geeignet. Es sollte ein Anwendungsfall gefunden werden, für den dieses Konzept optimal geeignet ist.

### 5.3.9. Zukunftspotential

Dieses Konzept verspricht, im Hinblick auf bereits getestete stationäre Versionen, eine vergleichsweise hohe Energieproduktion. Ob es möglich ist, einen Rumpf taumeln zu lassen, während er sich selbst antreibt, muss in Zukunft erforscht werden. Versuche mit Modellen in Wellenbecken könnten hierbei aussagekräftige Ergebnisse liefern. Bevor die Entwicklung von Prototypen beginnt, sollte zuerst ein geeigneter Verwendungszweck für ein taumelndes Schiff gefunden werden.

## 5.4. Nutzung von Schwimmkörpern an Auslegern



*Abbildung 69: Mit 4m Durchmesser an den Schwimmkörpern, der aktuell größte Prototyp von „Wavestar“ [39]*

### 5.4.1. Aufbau

Das ursprüngliche System besteht aus einer Plattform, die fest mit dem Meeresboden verankert ist. An einem Ausleger ist ein Schwimmkörper befestigt. Dieser schwimmt auf der Wasseroberfläche und folgt den Wellenbewegungen. Der Ausleger ist mit der Plattform über ein Lager verbunden. Insgesamt sind an einer Plattform mehrere Ausleger montiert (vgl. Abb. 69).

### 5.4.2. Funktionsweise des stationären Systems

An den Auslegern sind Hydraulikzylinder installiert. Durch die auf und ab Bewegung fördern diese Hydrauliköl. Der entstehende Druck und der Volumenstrom werden von allen Auslegern auf einen Hydraulikmotor geleitet. Das Wirkungsprinzip ist hierbei wie bei dem Trimaran (Kapitel 4.3.2): Der Hydraulikmotor erzeugt eine Drehbewegung. Über einen Generator wird die Drehbewegung in elektrische Energie umgewandelt. Übersteigt die Wellenhöhe den maximal zulässigen Betriebsbereich der Ausleger, werden diese in ihre höchste Position gezogen. Dadurch wird ein Kontakt zum Wasser verhindert.

### 5.4.3. Adaption zur Verwendung auf einem Schiff

Dieses Schwimmkörper-System kann in einer ähnlichen Form auf einem Schiff genutzt werden. Die Form der Schwimmkörper muss dazu angepasst werden, um den zusätzlichen Strömungswiderstand minimal zu halten. Es wäre vorstellbar, dass diese Schwimmkörper aufgrund der zu beachtenden Strömungseigenschaften eine bootsähnliche Form hätten.

Die Installation von Auslegern an Schiffen ist nicht neu. Diese stabilisieren das Schiff bei Wellengang erheblich und verhindern so ein Kentern. Außerdem kann so der Rumpf schlanker, also strömungsgünstiger konstruiert werden. Bei kleinen Motorbooten, Einbäumen und Kanus wie in Abbildung 70 sind häufig Ausleger zur Stabilisierung vorhanden.



Abbildung 70: Klassisches Verwendungsbeispiel für einen Ausleger [65]

### 5.4.4. Stand der Technik

Das dänische Unternehmen „Wave Star“ befasst sich seit längerem mit dem Konzept der stationären Energiegewinnung. Es gab dazu bereits mehrere Versuche in Wellenbecken. Mit einem 1:10 Modell wurden bereits Praxiserfahrungen in einem Fjord in Dänemark gesammelt (vgl. Abb. 71).

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie



Abbildung 71: Das 1:10 Modell [40]

Seit 2009 gibt es an der dänischen Nordseeküste einen Aufbau im Maßstab 1:2 (vgl. Abb. 69). Derzeit wird die Anlage ausgebaut, um noch zwei weitere Schwimmer zu installieren.

Wave height $H_{m0}$ (m)	Wave period $T_{0,2}$ (s)										
	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13
0.0 - 0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5 - 1.0	0	49	73	85	86	83	78	72	67	63	59
1.0 - 1.5	54	136	193	205	196	182	167	153	142	132	123
1.5 - 2.0	106	265	347	347	322	294	265	244	224	207	193
2.0 - 2.5	175	429	522	499	457	412	372	337	312	288	267
2.5 - 3.0	262	600	600	600	600	540	484	442	399	367	340
3.0 -	Storm protection										

Abbildung 72: Zukünftige Leistung des finalen Systems [41]

Die Abbildung 72 zeigt die erwartete Energieproduktion der „fullscale Anlage“ mit 20 Schwimmern, die jeweils einen Durchmesser von fünf Metern aufweisen. Die Leistung wurde aus den Messwerten der 1:2 Anlage skaliert. Die produzierte Leistung ist abhängig von der Wellenperiode und der Wellenhöhe. Mit der Gleichung aus Kapitel 2.3 kann der Wirkungsgrad der Anlage annähernd bestimmt werden. Bei 20 Schwimmern beträgt die effektiv genutzte Wellenlänge 100 Meter. Es ergibt sich ein maximaler Wirkungsgrad von ca. 29% bei Wellenhöhen von 0,5-1m und einer Wellenperiode von vier bis fünf Sekunden. Eine Tabelle mit dem Wirkungsgrad über alle Betriebszustände befindet sich im Anhang D.

### 5.4.5. Bewertung anhand der Anforderungen

Eine erweiterte Bewertung anhand der gestellten Anforderungen befindet sich im Anhang C.

#### Energiebilanz und Reibungsverluste des Systems

Wenn sich Schwimmkörper im Einsatz befinden, werden diese vom Schiff durch das Wasser gezogen. Dabei hat jeder Schwimmkörper einen Strömungswiderstand, der den Vortrieb des Schiffes negativ beeinflusst. Damit das System funktioniert, muss die produzierte Leistung höher sein, als die zusätzliche Strömungsverluste, welche die Schwimmkörper durch die Reibung mit dem Wasser verursachen. Es gelten die Beziehungen wie in Kapitel 3.2.

Wenn mehrere Schwimmkörper an einem Schiff verbaut sind, besteht die Möglichkeit, diese nur zum Teil zu benutzen oder bei zu hohen Wellen zum Schutz der Bauteile in der oberen Endlage zu lagern. Dadurch ließe sich die Leistung des Systems stufenweise regulieren.

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

Betrachtet man die Leistungsfähigkeit der stationären Varianten dieses Konzeptes, produzieren diese unter den optimalen Wellenbedingungen ausreichend Energie, um ein Schiff antreiben zu können. Es muss jedoch noch erforscht werden, welche Geschwindigkeiten hiermit erreicht werden können, bis der Strömungswiderstand des Schiffes der Antriebskraft entspricht. (vgl. Kapitel 2.4)

### Nutzungspotential

Das System bietet sich für den Einsatz auf großen Schiffen, wie derzeitigen Containerschiffen und Tankern, an. Dabei können die Ausleger mit den Schwimmkörpern an den Seiten des Rumpfes montiert werden. Bei einem Einsatz auf derzeitigen Schiffen würde das System den fossilen Hauptantrieb unterstützen und somit den Schadstoffausstoß bzw. den Verbrauch senken.

In der Zukunft ist eine Kombination mit allen anderen klimaneutralen Antrieben möglich.

### 5.4.6. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen

#### **Stärken:**

- Eine Nachrüstung an Schiffen ist möglich
- Möglichkeit der Stabilisierung des Schiffes
- Das Konzept ist als stationäre Variante bereits im Einsatz

#### **Schwächen:**

- Die Ausleger erschweren das Be- und Entladen des Schiffes
- Im Bereich von Auslegern können keine Rettungsboote untergebracht werden

### 5.4.7. Optimierungspotential

Ausgehend von einem stationären System gibt es folgende Möglichkeiten, dieses Konzept für den Einsatz auf Schiffen zu optimieren:

#### **1. Die Form der Schwimmkörper**

Die im Falle der stationären Variante verwendete Form einer Halbkugel ist für den Einsatz auf Schiffen nicht ideal. Für Schiffe sollte eine Form gefunden werden, die in Fahrtrichtung des Schiffes optimal strömungsgünstig ist. Da die Auftriebskörper im Betrieb teilweise auch unter die Wasseroberfläche tauchen, sollte die Optimierung der Form auch für den Übergang vom Auftriebskörper zum Ausleger durchgeführt werden.

#### **2. Länge der Ausleger**

Die Länge des Auslegers bestimmt durch die Hebelgesetze die Kräfte im hydraulischen System. Hier sollte geforscht werden, welche Hebellänge am effizientesten für die Energieproduktion ist.

Wenn ein Ausleger außer Betrieb ist, wird dieser hochgeklappt. Je länger der Ausleger, desto höher wird das Schiff. Dieser Aspekt muss beachtet werden, wenn die Bauhöhe des Schiffes beispielsweise durch zu passierende Brücken beschränkt wird.

#### **3. Maximaler Hub der Ausleger**

Der maximale Hub der Ausleger bestimmt, bis zu welcher Wellenhöhe das System Energie erzeugen kann. Im Fall der stationären Variante von „Wave Star“ muss das System ab einer Wellenhöhe von drei Metern die Ausleger aus dem Wasser heben, um Schäden abzuwenden. Diese Grenze sollte für den Einsatz auf Schiffen erhöht werden, um auch Energie bei rauer See zu produzieren.

#### 4. Anzahl und Größe der Ausleger

Ausgehend von der Größe des Schiffes sollte erforscht werden, ob es effizienter ist, viele kleine oder wenige und dafür große Ausleger zu installieren. Bei dieser Entscheidung sollte die mittlere Wellenhöhe der zu befahrenden Seegebiete berücksichtigt werden.

#### 5. Nutzung zur Erhöhung der Stabilität

Anstatt die Ausleger bei zu hohen Wellen hochzuziehen, könnte es bei Schiffen sinnvoll sein, die Ausleger im Wasser zu lassen, um die Stabilität des Schiffes zu erhöhen. Generell erhöhen die Ausleger, wenn sie sich im Betrieb befinden, die Stabilität eines Schiffes. Wird dies von Anfang an bei der Planung eines Schiffes bedacht, könnten diese ihren Gewichtsschwerpunkt näher an den Verdrängungsschwerpunkt legen. Dies ermöglicht beispielsweise den Bau von hoch aufbauenden Schiffen mit geringem Tiefgang.

#### 6. Nutzung der Auslegerarme für die Erzeugung einer Antriebskraft

Bei dieser Idee wird das Konzept „Schwimmkörper“ mit dem Konzept „Antrieb durch bewegliche Finnen“ kombiniert. Die Ausleger werden dabei unter den Schwimmkörpern und im Unterwasserbereich des Rumpfes befestigt. Somit sind diese komplett unter Wasser. Die Form des Arms entspricht der Tragflächenform der Finnen. Die Finne wird drehbar gelagert, sodass sich die gleichen physikalischen Zusammenhänge ergeben, wie im Kapitel 4.2.2 erklärt. Somit wird das Schiff zusätzlich angetrieben.

#### 5.4.8. Zukunftspotential

Der stationäre Aufbau an der dänischen Nordseeküste von „Wavestar Energy“ zeigt bereits, dass dieses Konzept erfolgreich Wellenenergie nutzen kann. Die weitere Forschung für die Nutzung auf Schiffen sollte sich auf die Auswirkungen auf den Strömungswiderstand konzentrieren. Dafür eignen sich Modellversuche und Simulationen. Wie beim stationären System ist es sinnvoll, Prototypen in kleineren Maßstäben zu testen, um die Eigenschaften dieses Konzepts zu erforschen.

### 5.5. Nutzung des piezoelektrischen Effekts

#### 5.5.1. Vorstellung

Der piezoelektrische Effekt bezeichnet die Eigenschaft bestimmter Materialien, unter Krafteinwirkung ein Spannungspotential aufzubauen (vgl. Abb.73).

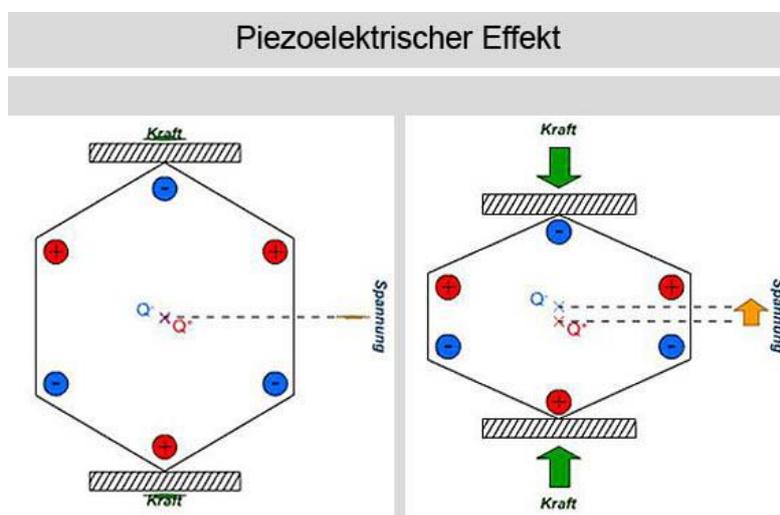


Abbildung 73: Darstellung des Piezoelektrischen Effekts [42]

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

Dabei verhält sich die Ladung proportional zur Änderung der einwirkenden Kraft. Es gilt also:

$$Q = d * \Delta F$$

$Q$  = Ladung in (C)

$d$  = Verhältnisfaktor (abhängig von dem verwendeten Piezokristall)

$\Delta F$  = Änderung der wirkenden Kraft [43, p. S. 2]

Im Alltag wird dieser Effekt bei Zündern für Gaskocher oder auch für Feuerzeuge verwendet. Bei diesen Bauteilen entsteht durch Druck auf einen Piezokristall eine Spannung, die ausreicht, um einen Funken entstehen zu lassen.

### 5.5.2. Anwendungen

Der piezoelektrische Effekt ermöglicht es, durch Druck elektrische Energie zu erzeugen. Dieser Vorgang ist derzeit vor allem für Anwendungsbereiche interessant, in denen eine Energieversorgung weder über Kabel noch mittels einer Batterie realisiert werden kann. Beispiele hierfür sind die elektrischen Systeme, die in den Flügeln von Windrädern untergebracht sind. Piezoelemente auf den Flügeln erzeugen dort die benötigte Energie (vgl. Abb. 74) [43].

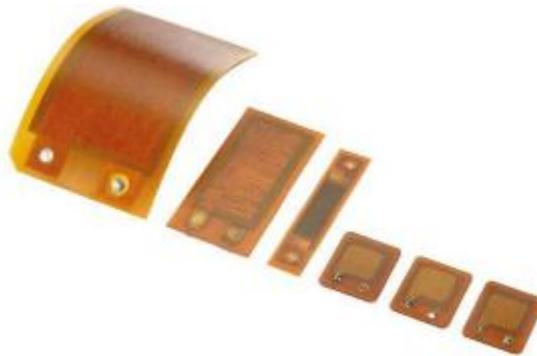


Abbildung 74: Piezoelemente für unter anderem den Einsatz auf den Flügeln von Windkraftanlagen [43]

### 5.5.3. Anwendung auf Schiffen

Treffen Wellen auf ein Schiff, so sorgen diese im Bereich der Wasserlinie für eine Druckänderung auf den Rumpf. Dabei entstehen sowohl durch die Änderung des Wasserspiegels (potentielle Energie), als auch durch den Einfluss der kinetischen Energie der Welle, Druckänderungen. Wenn das Schiff in Bewegung gerät, befindet sich die Wasserlinie des Rumpfes zeitweise über oder auch unterhalb des Wasserspiegels. Große Druckänderungen entstehen bei erhöhtem Seegang am Bug, wenn ein Schiff beginnt, in die Wellenberge zu „stampfen“ (vgl. Abb. 75 und Abb. 76).

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie



Abbildung 75: Der Bug "stampft" in einen Wellenberg [44]

Durch piezoelektrische Elemente im Bereich der Wasserlinie und am Bug des Rumpfes kann mit dieser Technik Energie erzeugt werden.

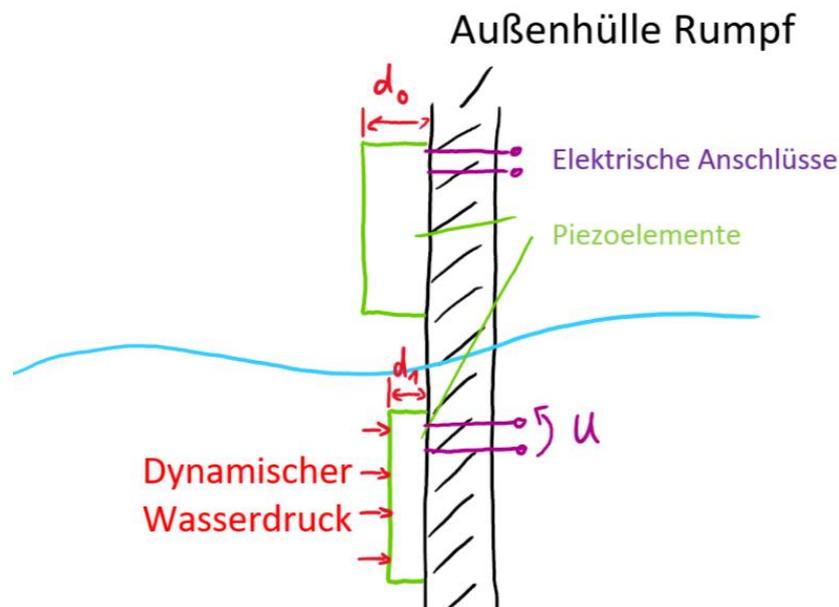


Abbildung 76: Anordnung der Piezoelemente auf Höhe der Wasserlinie am Rumpf

### 5.5.4. Stand der Technik

Derzeit wird die Technik in abgewandelter Form in Rümpfen aus Faserverbundwerkstoffen genutzt. Dort werden Piezoelemente benutzt, um Materialfehler und Beschädigungen zu lokalisieren. Über die Piezoelemente als Sensoren können Schallwellen im Material, ausgehend von Fehlerstellen, gemessen werden (vgl. Abb. 77). Eine Nutzung von Piezoelementen für die Energieversorgung von Elektromotoren ist derzeit nicht geplant. [45, p. 59 ff]

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

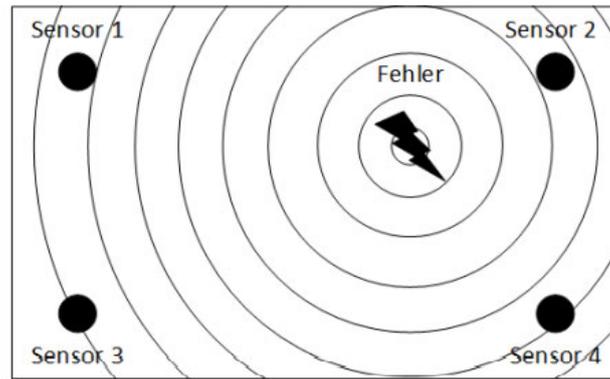


Abbildung 77: Prinzipdarstellung der Sensortechnik zur Ermittlung von Materialfehlern in Faserverbundwerkstoffen [45]

### 5.5.5. Bewertung anhand der Anforderungen

Eine erweiterte Bewertung anhand der gestellten Anforderungen befindet sich im Anhang C.

### Strömungseigenschaften des Rumpfs

Für den Einsatz auf Schiffsrümpfen müssen die Elemente in der Lage sein, schon bei den geringsten Dehnungen bzw. Stauchungen, Energie zu produzieren. Dabei sollte die Oberfläche im Bereich der Piezoelemente in ihrer Rauheit und an den Übergängen zu anderen Elementen nahezu einer konventionellen Rumpfoberfläche entsprechen. Dies ist erforderlich, damit sich die guten Strömungseigenschaften des Rumpfes nicht verschlechtern.

### Leistungsfähigkeit der Elemente

	Betriebsspannungsbereich [V]	Min. laterale Kontraktion [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Rel. laterale Kontraktion [ $\mu\text{m}/\text{m}/\text{V}$ ]	Blockierkraft [N]	Abmessungen [mm]	Min. Biegeradius [mm]	Piezokeramikhöhe [ $\mu\text{m}$ ]	Elektrische Kapazität [nF] $\pm 20\%$
P-876.A11	-50 bis +200	400	1,6	90	61 x 35 x 0,4	12	100	150
P-876.A12	-100 bis +400	650	1,3	265	61 x 35 x 0,5	20	200	90
P-876.A15	-250 bis +1000	800	0,64	775	61 x 35 x 0,8	70	500	45
P-876.SP1	-100 bis +400	650	1,3	280	16 x 13 x 0,5	-	200	8

Piezokeramik PIC 255  
Standardanschlüsse: Lötunkte  
Betriebstemperaturbereich: -20 bis +150 °C

Abbildung 78: Technische Daten der verschiedenen Piezoelemente [43]

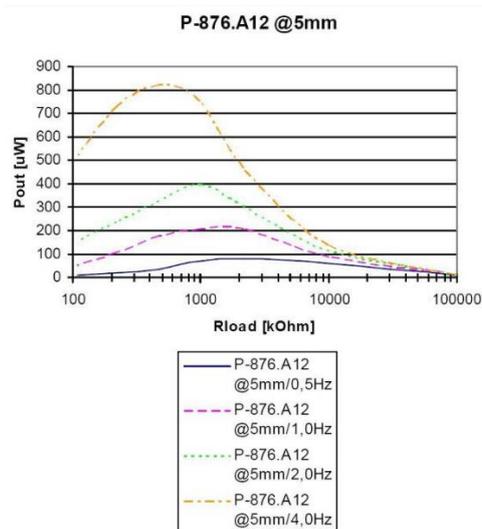


Abbildung 79: Leistungsabgabe bei Belastung mit einem variablen Widerstand [43]

## Eigene Konzeptideen zur Nutzung von Wellenenergie

Um eine Aussage für die Leistungsfähigkeit eines Elementes zu ermitteln, wird im Folgenden ein Probeaufbau mit einem Element betrachtet:

Das Element P-876.A12 (vgl. Abb. 78 Z.2) hat im unbelasteten Zustand folgende Abmessungen: 61 mm x 35 mm x 0,5 mm (L x B x H). In einem Versuch wird das Element mit einer Frequenz von 4 Hz um 5 mm gedehnt. Die Abgabeleistung der Elemente ist abhängig von dem Widerstand der Last. Wie die Abbildung 79 zeigt, produziert dieses Element bei einer anliegenden Last von ~500 Ohm eine Leistung von ~820  $\mu\text{W}$ .

Durch diese Ergebnisse kann die Leistungsdichte einer Fläche mit diesen Elementen bestimmt werden:

$$\frac{820 \mu\text{W}}{61 \text{ mm} * 35 \text{ mm}} = 0,384 \frac{\mu\text{W}}{\text{mm}^2} = 384 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2} \rightarrow 2604 \frac{\text{m}^2}{\text{kW}}$$

Die Rechnung zeigt, dass die Leistungsfähigkeit der Elemente eher gering ist. Auch wenn nur ein kleines Boot angetrieben werden soll, ist eine Leistung von mindestens 1 kW erforderlich, um einen effizienten Vortrieb zu generieren. Ein kleines Ruderboot mit einer Länge von vier Metern besitzt geschätzt eine 2  $\text{m}^2$  große Fläche, die für Piezoelemente genutzt werden könnte. Die Leistung von 2  $\text{m}^2$  beträgt nach der berechneten Leistungsdichte somit 0,7 W.

Es lässt sich also zusammenfassend sagen, dass die Energieproduktion eines derzeitigen Piezoelementes nicht ausreichend ist, um genug Energie für einen Schiffsantrieb zu erzeugen.

### Systempotential als Hybridlösung

Wenn ein Schiff mit Piezoelementen im Bereich der Wasserlinie ausgestattet ist, kann es mit diversen weiteren Antriebskonzepten kombiniert werden. Nicht geeignet wäre jedoch die Nutzung von Windenergie. Wenn die Kraft des Windes auf Segel, Kite-Drachen, Flettnerrotoren oder auch den Rumpf eines Rumpffleglers wirkt, sorgt die Windkraft dafür, dass sich das Schiff zu einer Seite kränkt. Dadurch verschiebt sich die Wasserlinie und damit auch der effektive Nutzungsbereich von Piezoelementen.

#### 5.5.6. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen

##### **Stärken:**

- Keine signifikante Einschränkung der Strömungseigenschaften
- Möglichkeit der Nachrüstung an bestehenden Schiffen

##### **Schwächen:**

- Die Leistungsfähigkeit der Elemente ist zu gering. Dadurch ist dieses Konzept derzeit nicht realisierbar
- Der Bedarf an seltenen Rohstoffen

#### 5.5.7. Optimierungspotential

##### **1. Die Leistungsdichte**

Um dieses Konzept umsetzen zu können, sollte die Flächenleistung der Elemente auf mindestens 100  $\text{W}/\text{m}^2$  ansteigen. Dafür könnten die Elemente beispielsweise in mehreren Schichten übereinander liegen.

##### **2. Dehnungsmöglichkeiten am Rumpf**

Es sollte unterschieden werden in Dehnung durch Strecken oder Stauchen. Eventuell kann es sinnvoll sein, die Elemente auf einem Gitter anzuordnen, sodass sich hinter jedem Element ein Hohlraum befindet, indem sich das piezoelektrische Material unter Druckeinwirkung ausdehnen kann (vgl. Abb. 80).

## Empfehlung einer Konzeptidee

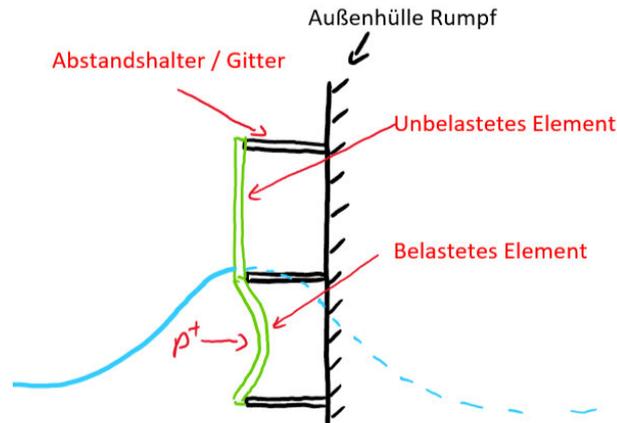


Abbildung 80: Erhöhung der Dehnungsmöglichkeiten durch Abstandshalter am Rumpf

### 3. Positionierung am Rumpf

Eine Untersuchung der Druckänderung an verschiedenen Unterwasserbereichen des Rumpfes könnte Erkenntnisse über die effizienteste Platzierung von Elementen liefern.

### 4. Rumpfformen

Durch die Optimierung der Rumpfform könnte die Druckänderung an Teilen des Rumpfes für den Einsatz von Piezoelementen maximiert werden.

### 5.5.8. Zukunftspotential

Um dieses Konzept für den Vortrieb von Schiffen nutzen zu können, müssen Wege gefunden werden, um die Leistungsfähigkeit eines Piezoelementes deutlich zu erhöhen. Nach derzeitigem Stand der Technik ist dieses Konzept nicht realisierbar. Zusätzlich einschränkend ist der Bedarf an seltenen Rohstoffen für die aufwendige Verdrahtung von hunderten bis tausenden von Elementen.

## 6. Empfehlung einer Konzeptidee

Ausgehend von der Forschung und den Erkenntnissen dieser Arbeit wird ein System, welches zwischen den Konzepten „Schwimmkörper an Auslegern“ und „Antrieb durch bewegliche Rumpfteile“ liegt, empfohlen. Angedacht ist die Verwendung eines Haupttrumpfes mit weit überkragendem Deck, unter dessen Enden sich Seitenrümpfe (Auftriebskörper) befinden. Diese erzeugen, wie bei dem Konzept „Antrieb durch bewegliche Rumpfteile“ beschrieben, durch ihre Relativbewegung zum Haupttrumpf, Energie (vgl. Kapitel 4.3.2). Im Gegensatz zu dem Konzept werden allerdings mehrere bewegliche Seitenrümpfe hintereinander angeordnet, sodass das Gesamtsystem auch Parallelen zu dem Konzept „Schwimmkörper an Auslegern“ aufweist.

Dadurch ergeben sich folgende Vorteile:

- Erkenntnisse aus den Projekten von „Wavestar Energy“ können übernommen und adaptiert werden
- Das breite überkragende Deck bietet vielseitige Nutzungsmöglichkeiten für verschiedene Ladungen, aber auch für die Unterbringung von Solarpanelen
- Zusätzliche Stabilität des Schiffes durch mehrere Rümpfe
- Möglichkeit der Nutzung von Segeln durch die erhöhte Stabilität
- Die Ausmaße der Seitenrümpfe können gezielt für bestimmte Wellengrößen optimiert werden

## Erkenntnisse und Fazit zur Wellenenergienutzung auf Schiffen

- Minimierung der Reibungsverluste durch die schlanke Form der Seitenrümpfe
- Keine Einschränkungen der maximalen Größe des Schiffes

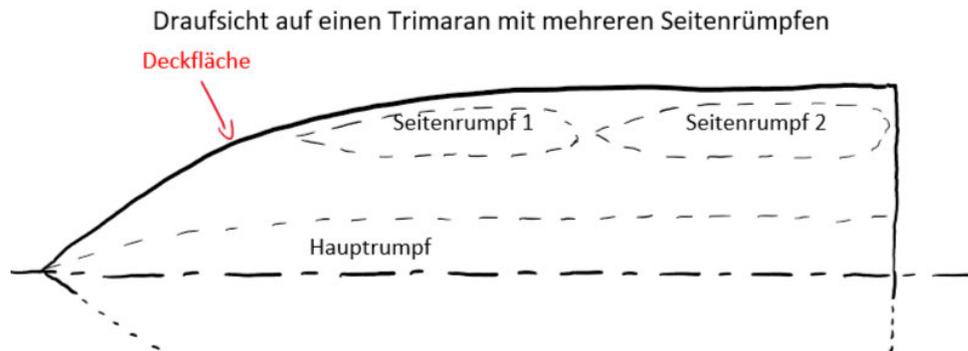


Abbildung 81: Draufsicht, es ist nur die steuerbord-Seite dargestellt

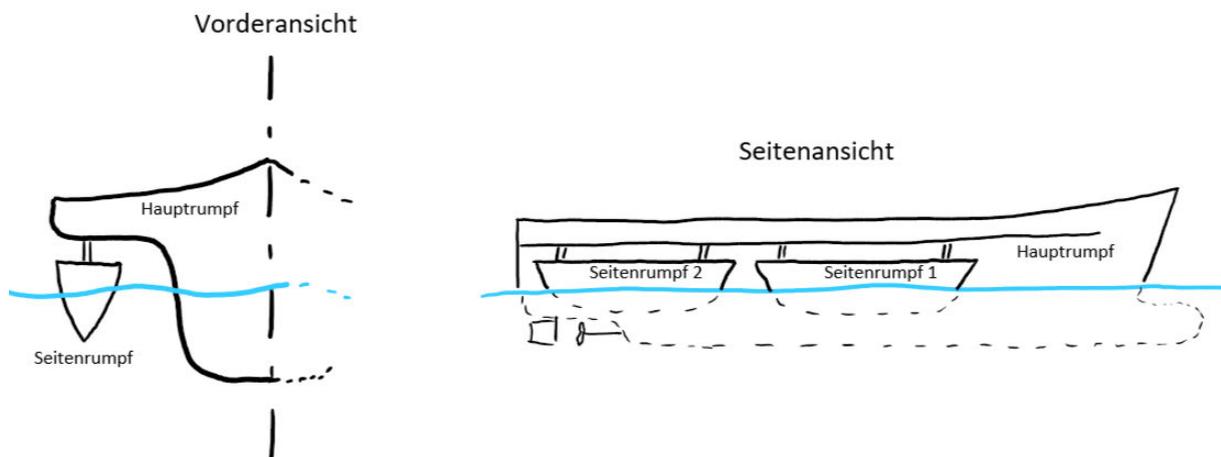


Abbildung 82: Vorderansicht (nur Steuerbordseite dargestellt) und Seitenansicht von steuerbord

Ausgehend von der erfolgreichen Energieproduktion des „Wavestar Energy“ Prototypen, mit Wirkungsgraden bis zu 29%, ist dieses Konzept in der Lage, ein Schiff anzutreiben. Es bietet sich an, diese Idee in einer weiteren Arbeit genauer zu analysieren und möglicherweise durch CFD-Berechnungen oder auch einen Modellversuch in einem Wellenbecken zu testen.

## 7. Erkenntnisse und Fazit zur Wellenenergienutzung auf Schiffen

Nach der Betrachtung und Bewertung möglicher Konzepte zur Nutzung von Wellenenergie für den Antrieb von Schiffen, lässt sich festhalten, dass derzeit keine der vorgestellten Technologien in der Lage ist, fossile Antriebe vollständig zu ersetzen. Die Leistungsfähigkeit der derzeit verwendeten Schiffsmotoren ermöglicht Schiffen mit großen Ladungskapazitäten und Geschwindigkeiten von 15 bis zu 25 Knoten zu navigieren. Dies stellt eine Hürde für klimaneutrale Antriebskonzepte dar. Ein Antrieb durch Wellenenergie ist mit heutigen Mitteln prinzipiell möglich. Im Nutzungsprofil müssen jedoch deutliche Einschränkungen in Kauf genommen werden. Die Analyse der Konzepte ergab kein klares Ergebnis darüber, welche Technologie generell zu favorisieren ist. Vielmehr zeigte sich, dass die verschiedenen Systeme sich jeweils für unterschiedliche Einsatzzwecke(-gebiete) eignen. Hervorzuheben sind hierbei die Konzepte „Scharnier“ und „Schwungmasse“. Diese Konzepte benötigen intensive

## Erkenntnisse und Fazit zur Wellenenergienutzung auf Schiffen

Schiffsbewegungen, um ihr volles Leistungspotential abzurufen. Für den Transport von Waren und insbesondere Personen, führt dies zu möglichen Beschädigungen und Unwohlsein. Erschwerend für die wirtschaftliche Nutzung von WEC-Systemen auf Schiffen, ist die Leistungsfähigkeit von Konzepten zur Nutzung von Wind- und Solarenergie. Die Nutzung der Windkraft für den Vortrieb von Schiffen wird seit Jahrhunderten erforscht, genutzt und optimiert. Stationäre Lösungen zur Nutzung von Solarenergie lassen sich auch mit geringfügigen Anpassungen für die Schifffahrt nutzen.

Um mit klimaneutralen Energiequellen die Anforderungen an ein wirtschaftliches Schiff zu erfüllen, wird es aktuell nötig sein, mehrere Systeme auf einem Schiff zu verwenden. Bei der Verwendung von Wind, Wellen, und Solarenergie erhöht sich allerdings auch die Komplexität des Gesamtsystems und somit die Installations- und Wartungskosten. Gleiches gilt für Übergangslösungen mit klimaneutralen und fossilen Energiequellen im Hybridbetrieb.

Wenn die Schifffahrt in naher Zukunft auf klimaneutrale Antriebe wie beispielsweise WEC-Systeme umgestellt werden soll, müssen die Anforderungen an die Geschwindigkeit von Schiffen deutlich gesenkt werden. Derzeit verspricht kein Konzept, außer dem Surfen, Geschwindigkeiten von über 10 Knoten zu erreichen.

Ausgehend vom möglichen Leistungspotential einer Welle sollte die Erforschung und Optimierung von Konzepten ausgebaut werden. Je mehr Projekte zu diesem Thema durchgeführt werden, desto mehr Erkenntnisse können gewonnen werden. Diese führen zu Weiterentwicklungen, die den Wirkungsgrad von WEC-Systemen steigern. Letzten Endes ist die Nutzung von Wellenenergie auf Schiffen nicht weniger wichtig, als die stationäre Nutzung an Küsten. Ohne die Schifffahrt ist der globale Warenhandel der modernen Gesellschaft nicht möglich.

## 8. Literaturverzeichnis

- [1] „Schweröl - Chemie.de,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Schwer%C3%B6l.html>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [2] „Luftverunreinigung durch Seeschiffe - Umweltbundesamt,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/seeschiffe-luftschadstoffe-energieeffizienz#luftverunreinigung-durch-seeschiffe>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [3] J. Lippelt, A. M. M. Gomez und L. McCarthy, „Kurz zum Klima: Land in Sicht? Emissionen der internationalen Schifffahrt und Herausforderungen des Klimawandels,“ Leibniz-Informationszentrum, 2016.
- [4] „Wellenphänomene - physikunterricht-online,“ 2021. [Online]. Available: <http://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/wellenphaenomene/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [5] „Wellengrafik - Alberts & Fabel,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.alberts-fabel.com/images/blog/Wellen/Grafik.jpg>.
- [6] „Wasserwellen - learnattack.com,“ 2016. [Online]. Available: [https://learnattack-cdn-res.cloudinary.com/image/upload/cs\\_no\\_cmyk,f\\_auto,fl\\_progressive.strip\\_profile,q\\_auto/v1/learn/2016-10/Wasserwellen](https://learnattack-cdn-res.cloudinary.com/image/upload/cs_no_cmyk,f_auto,fl_progressive.strip_profile,q_auto/v1/learn/2016-10/Wasserwellen).
- [7] „Lehrstuhl für Didaktik der Physik,“ [Online]. Available: [https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/multimedia/programme\\_applets/wellen/bilder/wasserwelle\\_3\\_500.png](https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/multimedia/programme_applets/wellen/bilder/wasserwelle_3_500.png). [Zugriff am 15 Mai 2022].
- [8] S. Tannhauer, „Wellenenergie und ihre Nutzung,“ Fakultät für Physik der Universität Bielefeld, 2009.
- [9] „wasserwelle - roanline.ch,“ [Online]. Available: <https://www.raonline.ch/images/edu/nw3/ph/wasserwelle16003.jpg>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [10] K. Strauß, Kraftwerkstechnik zur Nutzung von fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [11] „boote-forum,“ 2014. [Online]. Available: <https://www.boote-forum.de/showthread.php?t=203871>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [12] „Durchschnittsgeschwindigkeit von Schiffen - Statista,“ März 2020. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1289545/umfrage/durchschnittsgeschwindigkeit-von-schiffen-nach-typ/#:~:text=%20Die%20Werte%20wurden%20in%20der,Kreuzfahrtschiff%20%20bis%2025%20Knoten..> [Zugriff am 12 Juni 2022].

## Literaturverzeichnis

- [13] „Wikipedia - Peking,“ 29 Mai 2022. [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/Peking\\_\(Schiff\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Peking_(Schiff)). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [14] „Kruzenshtern - Ndr,“ [Online]. Available: [https://www.ndr.de/nachrichten/mecklenburg-vorpommern/hansesail1202\\_v-contentgross.jpg](https://www.ndr.de/nachrichten/mecklenburg-vorpommern/hansesail1202_v-contentgross.jpg). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [15] „Rumpfsegler - green-shipping-news.de,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.green-shipping-news.de/wp-content/uploads/2020/10/Vindskip-Green-Shipping-News.jpg>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [16] M. Prior, „Der Magnus-Effekt Universität Goettingen,“ 2014. [Online]. Available: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/3773>. [Zugriff am 13 Juni 2022].
- [17] „Das Solarschiff bzw. Solarboot - xpert.digital,“ [Online]. Available: <https://xpert.digital/solarschiff-solarboot-solarglas-module/>. [Zugriff am 22 Juni 2022].
- [18] „Drachen - Welt.de,“ [Online]. Available: <https://img.welt.de/img/wirtschaft/mobile102092078/8761621067-ci23x11-w1280/Drachen-DW-Wirtschaft-Kiel-jpg>.
- [19] „Sechs umweltfreundliche Antriebe - dw.com,“ September 2015. [Online]. Available: <https://www.dw.com/de/sechs-umweltfreundliche-schiffsantriebe/a-18697998>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [20] F. Neumeier, „cruisetricks,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.cruisetricks.de/ufaqs/was-bedeutet-energie-effizienz-bei-kreuzfahrtschiffen/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [21] „Was bedeutet Energieeffizienz bei Kreuzfahrtschiffen? - Ndr,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.cruisetricks.de/ufaqs/was-bedeutet-energie-effizienz-bei-kreuzfahrtschiffen/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [22] „Redbull - What is surf-boat-rowing,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.redbull.com/au-en/what-is-surfboat-rowing>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [23] „Wellenreiten.de,“ [Online]. Available: <https://www.wellenreiten.de/surfen/ueber-das-meer-und-die-wellen/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [24] „Bernoulli Principle - TeachPE.com,“ 19 06 2022. [Online]. Available: <https://www.teachpe.com/biomechanics/fluid-mechanics/bernoulli-principle>.
- [25] „Suntory Mermaid II - Academic.com,“ 2010. [Online]. Available: <https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/9426363>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [26] „Japanese sailor first to cross Pacific in wave-powered boat,“ *Sydney Mornig Herald*, 5 Juli 2008.
- [27] Z. Z. Y. X. C. Z. YU Zhenjiang, „Dynamic Analysis of Propulsion Mechanism Directly Driven by Wave Energy for Marine Mobile Buoy,“ CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, 2016.
- [28] „autonautusv.com,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.autonautusv.com/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].

## Literaturverzeichnis

- [29] „Liquid Robotics,“ 2022. [Online]. Available: [www.liquid-robotics.com](http://www.liquid-robotics.com). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [30] „Je mehr Welle desto besser - float-magazine.de,“ 2022. [Online]. Available: <https://floatmagazin.de/boote/je-mehr-welle-desto-besser-hybrid-trimaran/?all=1>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [31] „Warum ein Multi und kein Einrümpfer - multihull.de,“ [Online]. Available: <http://www.multihull.de/basis/multi-mono.htm>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [32] „An LCA of the Pelamis wave energy converter,“ The International Journal of Life Cycle Assessment, 2018.
- [33] „seacatt - ocean renewables,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.ocean-renewables.com/seacatt>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [34] „ZShips International CCC Ltd,“ [Online]. Available: <https://joseluisgtz.wixsite.com/zships>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [35] „Fishingboat becomes power plant - maritime-executive.com,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.maritime-executive.com/article/fishing-boat-becomes-wave-power-plant>. [Zugriff am 13 Juni 2022].
- [36] G. Ibarra-Berastegi, J. Sáenz, A. Ulazia, P. Serras, G. Esnaola und C. Garcia-Soto, „Electricity production, capacity factor, and plant efficiency index at the Mutriku wave farm (2014–2016),“ 2018. [Online]. Available: [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/23246/2017\\_ibarra\\_berastegi\\_OE.pdf;jsessionid=0D43F849B2EC0741EADA78138F15BD0E?sequence=4](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/23246/2017_ibarra_berastegi_OE.pdf;jsessionid=0D43F849B2EC0741EADA78138F15BD0E?sequence=4). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [37] „mutriku wave energy plant - renewable technology.com,“ [Online]. Available: <https://www.renewable-technology.com/projects/mutriku-wave-energy-plant/>. [Zugriff am 22 Juni 2022].
- [38] „Wello,“ 2022. [Online]. Available: <https://wello.eu/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [39] „Wellenkraftwerk in Dänemark - Welt.de,“ [Online]. Available: <https://img.welt.de/img/wissenschaft/mobile115038056/5651629297-ci23x11-w780/Wellenkraftwerk-in-D-nemark.jpg>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [40] „Wavestar,“ 2022. [Online]. Available: <http://wavestarenergy.com/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [41] M. K. P. F. Laurent Marquis, „First Power Production Results from the Wave Star Roshage Wave Energy Converter,“ Wavestar, Bilbao, 2010.
- [42] „Piezoelektrischer Effekt - vetsuisse.com,“ [Online]. Available: [https://vetsuisse.com/vet-impl/lernmodule/radgeneral/images\\_m/313\\_m.jpg](https://vetsuisse.com/vet-impl/lernmodule/radgeneral/images_m/313_m.jpg). [Zugriff am 13 Juni 2022].
- [43] D.-P. B. Schulze, „Energy Harvesting nutzt den Piezoeffekt,“ PI Ceramic GmbH.
- [44] „Seegängige Motorboote - boote-magazin.de,“ [Online]. Available: <https://www.boote-magazin.de/ratgeber/sicherheit/bootspraxis-seegaengige-motorboote-einmal-ueber-den-atlantik/>. [Zugriff am 22 Juni 2022].

## Literaturverzeichnis

- [45] U. L. B. S. Bardia Emad, „Konzepte für die Bootsrumpherstellung mittels Faserverbundwerkstoffen,“ HAW Hamburg, 2017.
- [46] „boatcollar,“ 2021. [Online]. Available: <https://boatcollar.com.au/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [47] „Wikipedia - Wellenreiten,“ 10 Juni 2022. [Online]. Available: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/Wellenreiten.jpg>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [48] „Wikipedia - Wave power ship,“ 27 Mai 2022. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_power\\_ship](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power_ship). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [49] „Wikipedia - Sirius Star,“ 2008. [Online]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c5/Sirius\\_Star\\_2008e.jpg/640px-Sirius\\_Star\\_2008e.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c5/Sirius_Star_2008e.jpg/640px-Sirius_Star_2008e.jpg). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [50] „Wikipedia - River Surfing,“ 10 Juni 2022. [Online]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/River\\_surfing\\_-\\_Severn\\_bore.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/River_surfing_-_Severn_bore.jpg). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [51] „i.ytimg.com,“ [Online]. Available: <https://i.ytimg.com/vi/SR1xNHWIEeM/hqdefault.jpg>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [52] „Status on the Wave Star Energy converter development,“ Wave Star Energy, Bremerhafen, 2006.
- [53] P. F. M. K. J. P. Kofoed, „Recent Developments of Wave Energy Utilization in Denmark,“ Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark, Aalborg.
- [54] F. Solèr, „Piezoelectric Energy Harvesting - Entwicklung einer Innensohle zur Energiegewinnung durch die menschliche Fortbewegung,“ Kantonsschule Wiedikon Zürich, 2017.
- [55] F. Streich, „Analogieversuch zur Quantenmechanik mit Wasserwellen,“ Universität Stuttgart, 2016.
- [56] „Wellenbezeichnungen - atlantiksurlf.com,“ 2014. [Online]. Available: <https://atlantiksurlf.com/de/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/welle3.jpg>.
- [57] „Trimmen - boatingmag.com,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.boatingmag.com/wp-content/uploads/sites/16/2021/09/qsttrimtabs1717.jpg>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [58] „Suntory Mermaid II - gettyimages.com,“ 2022. [Online]. Available: <https://media.gettyimages.com/photos/japanese-solo-yachtsman-kenichi-horie-in-fukuyama-japan-on-may-30-picture-id110834890?k=20&m=110834890&s=612x612&w=0&h=5wcJgr68xiKqBm8XTO8TalwyxPcNBUpaoXT3HwF6p2U=>.
- [59] „Voith Turbine - lehrerfreund.de,“ [Online]. Available: [https://www.lehrerfreund.de/medien/tec\\_artikel\\_bilder/Titelbild\\_Voith\\_Turbine.png](https://www.lehrerfreund.de/medien/tec_artikel_bilder/Titelbild_Voith_Turbine.png). [Zugriff am 12 Juni 2022].

## Literaturverzeichnis

- [60] „Flettner Wirkprinzip - marigreen.eu,“ Januar 2016. [Online]. Available: [http://marigreen.eu/wordpress\\_marigreen/wp-content/uploads/2016/01/EcoFlettner-Wirkprinzip-282x300.jpg](http://marigreen.eu/wordpress_marigreen/wp-content/uploads/2016/01/EcoFlettner-Wirkprinzip-282x300.jpg). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [61] „ZShips - maritime-executive.com,“ [Online]. Available: <https://www.maritime-executive.com/media/images/article/Photos/Shipbuilding/Cropped/Trawlers%20zships%2016x9.jpg>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [62] „Sirius Star - nauticexpo.de,“ [Online]. Available: [https://img.nauticexpo.de/images\\_ne/photo-g/31139-12008327.jpg](https://img.nauticexpo.de/images_ne/photo-g/31139-12008327.jpg). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [63] „water column - noaa.gov,“ [Online]. Available: [https://celebrating200years.noaa.gov/magazine/wave\\_energy/water\\_column\\_614.jpg](https://celebrating200years.noaa.gov/magazine/wave_energy/water_column_614.jpg). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [64] „Piezothorie - piezosystem.de,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.piezsystem.de/piezopedia/piezothorie/>. [Zugriff am 13 Juni 2022].
- [65] „fishing boat - pixabay.com,“ 2018. [Online]. Available: [https://cdn.pixabay.com/photo/2018/03/19/22/03/fishing-boat-3241419\\_1280.jpg](https://cdn.pixabay.com/photo/2018/03/19/22/03/fishing-boat-3241419_1280.jpg). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [66] „Wave Runner -popsci.com,“ 2008. [Online]. Available: <https://www.popsci.com/gear-gadgets/article/2008-02/wave-runner/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [67] „Surf Boat - revoutionise.com,“ [Online]. Available: <https://cdn.revolutionise.com.au/cups/palmbeachslsc/files/wuhn9yznyq1chpbv.jpg>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [68] „Surf Basics - Die Physik des surfens - surfersmag.de,“ [Online]. Available: <https://surfersmag.de/articles/surf-basics-die-physik-des-surfens.html>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [69] „SEACATT WAVE ENERGY CONVERTER - Youtube,“ 2013. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dkHYT72pwKY>. [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [70] „Wave energy device - wikimedia.org,“ [Online]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Pelamis\\_P2\\_wave\\_energy\\_device\\_%287020981211%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Pelamis_P2_wave_energy_device_%287020981211%29.jpg). [Zugriff am 12 Juni 2022].
- [71] „Seatech,“ 2020. [Online]. Available: <https://seatech2020.eu/history/>. [Zugriff am 12 Juni 2022].

## 9. Anhang

## Anhang A

Kriterium \ Konzept	Wellensurfen	Antrieb durch bewegliche Finnen	Trimaran
<b>Abhängigkeit von Wellenrichtung</b>	<b>abhängig</b> Eine Bewegung ist nur mit der Ausbreitungsrichtung der Wellen möglich. Eine seitliche Bewegung entlang der steigenden Wellenflanke ist ebenfalls möglich.	<b>unabhängig</b> Wenn Finnen auf beiden Seiten des Rumpfes montiert sind, gibt es keine Abhängigkeit. Wenn nur eine Finne montiert ist, kann aus quer zum Schiff kommenden Wellen kein Vortrieb erzeugt werden.	<b>unabhängig</b> Das Konzept ist unabhängig von der Ausbreitungsrichtung der Wellen.
<b>Reibungsverluste im Vergleich zu einem konventionellen Schiff</b>	<b>gering</b> Die Gleitfahrt hebt den Rumpf zum Teil aus dem Wasser und verringert somit die Kontaktfläche. Reibungsverluste sind dadurch gering.	<b>erhöht</b> Die Finnen, deren Halterung und die Druck- und Zugstangen liegen außerhalb des Rumpfes und erzeugen somit Reibung bei der Fahrt durch das Wasser.	<b>gering</b> Die drei schmalen Rümpfe sollten weniger Reibung erzeugen als ein vergleichbares, ein rumpfiges Schiff.
<b>Energiegewinn/ -bilanz</b>	<b>nur Vortriebsenergie</b> Dieses Konzept erzeugt nur Vortrieb. Ein zusätzlicher Antrieb zum Einleiten und Halten des Surfers ist erforderlich. Es wird nur Energie eingespart und nicht produziert.	<b>nur Vortriebsenergie</b> Dieses Konzept erzeugt nur Vortrieb. Es könnte Energie aus den wirkenden Kräften in den Druck und Zugstangen gewonnen werden.	<b>unbekannt</b> Durch die geringe Reibung mit dem Wasser können hohe Geschwindigkeiten mit wenig Antriebsenergie erreicht werden. Die Effektivität der Energieproduktion muss geprüft werden.
<b>Geschwindigkeit</b>	<b>hoch (Gleitfahrt)</b> Beim Surfen wird mindestens die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle erreicht. Höhere Geschwindigkeiten sind möglich, wenn sich entlang der Wellenflanke bewegt wird.	<b>&lt;10 Knoten</b> Bisherige Schiffe mit Finnen erreichten ohne unterstützenden Antrieb nur Geschwindigkeiten unterhalb von 10 Knoten (~19 km/h).	<b>unbekannt</b> Dieses Konzept ist für hohe Geschwindigkeiten ausgelegt. Die dafür benötigte Energie kann nicht allein von dem WEC-System bereitgestellt werden.
<b>Geeignete Schiffsgröße</b>	<b>&lt;10m Länge</b> Derzeit wird dieses Konzept nur als Sportart genutzt. Denkbar ist ein Einsatz mit Schiffen unter 10m Länge.	<b>keine Einschränkung</b> Ein Einsatz bei jeder Schiffsgröße ist möglich. Die Relativbewegung des Schiffes zur Wasseroberfläche ist für die Effektivität des Systems entscheidend.	<b>aktuell für ca. 60m Länge</b> Die Trägheit der Ausleger bestimmen die maximal mögliche, effektive Schiffsgröße. Der im Bau befindliche Trimaran hat eine geschätzte Länge von ca. 60 Metern.

Kriterium \ Konzept	Wellensurfen	Antrieb durch bewegliche Finnen	Trimaran
<b>Nutzung ohne Hilfsantrieb</b>	<b>nicht möglich</b> Ohne zusätzlichen Antrieb ist es nicht möglich, das Surfen einzuleiten.	<b>möglich</b> Schiffe, die sich nur durch die Finnen fortbewegen, wurden bereits in der Praxis getestet.	<b>wahrscheinlich möglich</b> Ohne Hilfsantrieb sind wahrscheinlich nur geringe Geschwindigkeiten möglich.
<b>Nutzung Hybrid Fossil</b>	<b>funktioniert</b> Surfen ist mit kleinen Motorbooten und Jetskis möglich. Der Antrieb hilft bei dem Einstieg in die Welle und kann das Boot beim Surfen trimmen.	<b>möglich</b> Finnen könnten die Treibstoffverbrauch auf einem Schiff senken.	<b>möglich</b> Die erzeugte Energie senkt in Kombination mit den reibungsarmen Rümpfen den Kraftstoffverbrauch.
<b>Nutzung Hybrid Klimaneutral</b>	<b>funktioniert</b> Derzeitig wird Muskelkraft genutzt, um den erforderlichen zusätzlichen Vortrieb zu gewährleisten.	<b>gut geeignet</b> Dieses Konzept ist gut geeignet für die Kombination mit jeglichen klimaneutralen Antrieben.	<b>möglich</b> Die große Deckfläche ist gut geeignet für Solarpanels. Segeln ist möglich, erfordert aber eine aktive Steuerung. Eine Kombination von Batterien, Brennstoffzellen, oder Kites sind möglich.
<b>Nutzung zur Energieversorgung an Bord</b>	<b>ungeeignet</b> Dieses Konzept produziert keine Energie, die für die Energieversorgung an Bord nutzbar ist.	<b>nur mit Modifikation</b> Dieses Konzept produziert keine Energie, die für die Energieversorgung an Bord nutzbar ist. Statt Federn könnten Hydraulikelemente benutzt werden, welche Energie produzieren.	<b>geeignet</b> Die produzierte Energie sollte für die Versorgung an Bord ausreichen.
<b>Einsatzgebiete</b>	<b>Brandung</b> Surfen ist hauptsächlich nur im Brandungsbereich möglich. Gezeitenwellen können auf wenigen Flüssen zum Surfen genutzt werden. Das Surfen auf Wellen auf dem offenen Meer muss erforscht werden.	<b>Anforderung an Wellenhöhe</b> Je nach Auslegung der Komponenten ergibt sich eine minimale Wellenhöhe, ab welcher dieses Konzept genutzt werden kann.	<b>Anforderung an Wellenhöhe</b> Um das Konzept nutzen zu können, muss eine Mindestwellenhöhe vorhanden sein. Zu große Wellen verhindern wiederum das Erreichen der Sollgeschwindigkeit.
<b>Installation</b>	<b>Spezielles Rumpfdesign</b> Die Rumpfform muss für das Gleiten optimiert sein. Der Antrieb muss leistungsfähig sein, um das Boot auf der steigenden Flanke der Welle zu positionieren.	<b>Nachrüstung möglich</b> Eine Nachrüstung an einem bestehenden Schiff ist möglich. Ein für dieses Konzept optimierter Neubau ist zu empfehlen.	<b>Neubau</b> Dieses Konzept kann nur in einem eigens dafür entwickelten Neubau umgesetzt werden.

Kriterium \ Konzept	Wellensurfen	Antrieb durch bewegliche Finnen	Antrieb durch bewegliche Rumpfteile
<b>Betrieb</b>	<b>aktive Steuerung</b> Das Boot muss während des Surfens aktiv gesteuert und getrimmt werden. Es besteht ein erhöhtes Risiko zu kentern.	<b>passive Steuerung</b> Das System läuft selbstständig. Es muss nur die Fahrtrichtung gesteuert werden. Um anzuhalten werden die Finnen in ihrer Bewegung blockiert.	<b>passive Steuerung</b> Das System kann ohne aktive Steuerung Energie produzieren. Es ist zu empfehlen, die Ausleger mit Ballast aktiv an die Wellenverhältnisse anzupassen, um die Energieproduktion zu maximieren.
<b>Lebenserwartung und Schwachstellen im Vergleich zu konventionellen Schiffen</b>	Es gibt <b>keine Einschränkungen</b>	Der Verschleiß an Lagern von Finnen, Stangen und Federn muss beobachtet werden.	Die Mechanik an den Auslegern ist dem Seewasser ausgesetzt und wird im Betrieb stark belastet.
<b>Optimierungspotential</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rumpfformen für das Surfen optimieren</li> <li>- Steuerung des Surfvorgangs erforschen und automatisieren</li> <li>- Antrieb für das Surfen optimieren</li> <li>- Lösungen für das aktive Trimmen von größeren Schiffen suchen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durch die aktive Steuerung des Anstellwinkels der Finnen könnte ein höherer Wirkungsgrad erreicht werden</li> <li>- Hydraulikzylinder an Stelle der Federn könnten eine zusätzliche Stromversorgung ermöglichen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eine aktive Steuerung des Systems könnte den Wirkungsgrad erhöhen</li> <li>- Es könnte ein Aufschwingen des Schiffes (ähnlich wie bei dem Schwungmassenkonzept) provoziert werden, um die Energieproduktion zu erhöhen</li> </ul>
<b>Sicherheit und Probleme</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gefahr von Kentern durch falsche Trimmung des Bootes</li> <li>- Gefahr von Grundkontakt</li> <li>- Gefahr durch brechende Wellen</li> </ul>	Die Finnen dämpfen die Bewegungen des Schiffes ab. Das Schiff liegt vergleichsweise ruhig im Wasser.	Mehrrumpfige Schiffe liegen durch die drei Rümpfe stabil im Wasser. - Der Tiefgang des Schiffes dürfte vergleichsweise gering ausfallen.
<b>Umwelteinflüsse</b>	Beeinflussung von empfindlichen Küstengebieten	Mechanische Bauteile können verloren gehen	Hydrauliköl könnte in das Wasser gelangen

## Anhang B

Kriterium \ Konzept	Scharnerrumpf	Oszillierende Wassersäulen	Schwungmasse
<b>Abhängigkeit von Wellenrichtung</b>	<b>abhängig</b> Wellen, die seitlich auf das Schiff treffen, erzeugen keine Energie. Das Konzept ist am effektivsten, wenn das Schiff sich mit oder entgegen der Ausbreitungsrichtung positioniert.	<b>unabhängig</b> Das Konzept ist unabhängig von der Ausbreitungsrichtung der Wellen.	<b>bedingt unabhängig</b> Aus Wellen, die im rechten Winkel auf das Schiff treffen, kann nur erschwert eine Taumelbewegung und somit Energie erzeugt/gewonnen werden.
<b>Reibungsverluste im Vergleich zu einem konventionellen Schiff</b>	<b>erhöht</b> Die Form des Rumpfes im Bereich des Scharniers kann Turbulenzen hervorrufen. Je größer der Winkel der beiden Rumpfe zueinander ist, desto größer wird die Reibung.	<b>erhöht</b> Die Zugänge zu den Kammern Unterwasser können mit zunehmender Geschwindigkeit Turbulenzen hervorrufen.	<b>leicht erhöht</b> Die Reibverluste sollten durch die asymmetrische Form des Rumpfes nur leicht erhöht sein. Die asymmetrische Reibung erschwert den Geradeauslauf.
<b>Energiegewinn/ -bilanz</b>	<b>unbekannt</b> Je nach Länge und Gewicht der Rumpfhälften könnte dieses Konzept viel Energie erzeugen. Durch die erhöhte Reibung muss geprüft werden, ob sich ein effektiver Energiegewinn/Vortrieb realisieren lässt.	<b>stationär bis zu 300 kW</b> Das Konzept könnte gerade bei rauer See viel Energie produzieren. Es muss erforscht werden, ob die Reibungserhöhung einen effektiven Vortrieb erlaubt.	<b>stationär bis zu 600kW</b> Stationäre Varianten erzeugen bereits ausreichend Energie, um dieses Konzept anzutreiben.
<b>Geschwindigkeit</b>	<b>unbekannt</b> Es ist ein Einsatz bei geringen Geschwindigkeiten vorstellbar. Es sollte weiter erforscht werden, wie sich dieses Konzept bei Fahrt durchs Wasser verhält.	<b>unbekannt</b> Durch die erhöhte Reibung eignet sich das Konzept nur für geringe Geschwindigkeiten.	<b>unbekannt</b> Die Rumpfform lässt die für Schiffe üblichen Geschwindigkeiten zu. Je nach Energieproduktion können diese auch erreicht werden.
<b>Geeignete Schiffsgröße</b>	<b>keine Einschränkung</b> Je länger und schwerer die Rumpfhälften sind, desto mehr Energie kann produziert werden.	<b>keine Einschränkung</b> entscheidend für die Auswahl der Schiffsgröße ist die erwartbare Relativbewegung zwischen Schiff und Wasseroberfläche.	<b>aktuell 30-56m Länge</b> Derzeitig wird das System auf Schiffen mit einer Länge von 30 bis 56m eingesetzt. Auch kleinere Schiffsgrößen sollten möglich sein.
<b>Nutzung ohne Hilfsantrieb</b>	<b>wahrscheinlich möglich</b> Ein Vortrieb ohne Hilfsantrieb sollte möglich sein. Die erzielbare Geschwindigkeit wird dabei gering ausfallen.	<b>wahrscheinlich möglich</b> Ein Vortrieb ohne Hilfsantrieb sollte möglich sein. Die erzielbare Geschwindigkeit wird dabei gering ausfallen.	<b>möglich</b> Das System produziert genug Energie, um sich selbst anzutreiben.

Kriterium \ Konzept	Scharnierrumpf	Oszillierende Wassersäulen	Schwungmasse
<b>Nutzung Hybrid Fossil</b>	<b>benötigt Forschung</b> Ein fossiler Antrieb erhöht die Geschwindigkeit des Schiffes. Es muss erforscht werden, ob die durch Wellen produzierte Energie ausreicht, um den durch zusätzliche Reibung verursachten Energieverlust auszugleichen.	<b>benötigt Forschung</b> Ein fossiler Antrieb erhöht die Geschwindigkeit des Schiffes. Es muss erforscht werden, ob die durch Wellen produzierte Energie ausreichend ist, um den durch Reibung verursachten Energieverlust auszugleichen.	<b>nur als Hilfsantrieb</b> Ein konventioneller Hilfsantrieb ist sinnvoll, wenn der Seegang gering ist. Wirtschaftlich ist nur ein Betrieb mit dem WEC-System als Hauptantrieb.
<b>Nutzung Hybrid Klimaneutral</b>	<b>möglich, benötigt Forschung</b> Zur Erhöhung der Geschwindigkeit sind Ergänzungen sinnvoll. Es muss erforscht werden, inwieweit Systeme wie Segel, Kites oder Flettnerrotoren durch das Scharnier beeinflusst werden.	<b>möglich, benötigt Forschung</b> Sinnvoll wäre die Ergänzung durch Solarpanels auf dem Deck. Bei Systemen, die den Wind nutzen, muss erforscht werden, inwieweit sie die Relativbewegung des Schiffes zur Wasseroberfläche beeinflussen.	<b>nur bestimmte</b> Die Nutzung der Windenergie ist bei diesem Konzept nicht empfehlenswert. Der Wind würde das Schiff stabilisieren und die Taumelbewegung erschweren. Die Nutzung von Solarflächen, Brennstoffzellen oder Batterien ist unproblematisch.
<b>Nutzung zur Energieversorgung an Bord</b>	<b>zu aufwendig</b> Die produzierte Energie sollte für die Versorgung an Bord ausreichen. Durch die erhöhte Reibung muss die Wirtschaftlichkeit geprüft werden. Die Installation dieses Konzepts ist zu aufwendig, um dieses nur für die Energieversorgung an Bord zu nutzen.	<b>möglich</b> Die produzierte Energie sollte für die Versorgung an Bord ausreichen. Durch die erhöhte Reibung muss die Wirtschaftlichkeit geprüft werden.	<b>zu aufwendig</b> Das Konzept erzeugt genug Energie, um das Schiff zu versorgen. Die Installation dieses Konzeptes ist zu aufwendig, um es nur für die Energieversorgung an Bord zu nutzen.
<b>Einsatzgebiete</b>	<b>Vorhersehbare Wellenrichtung</b> Die Schiffseigenschaften geben vor, welche Wellen am effektivsten für die Energieproduktion sind. Gebiete, in denen die Ausbreitungsrichtung der Wellen vorhersehbar ist, sind gut geeignet.	<b>Anforderung an Wellenhöhe</b> Die Wellengröße muss ausreichend sein, um die Schiffsgröße in ausreichend Bewegung zu versetzen.	<b>Vorhersehbare Wellenrichtung</b> Die Schiffseigenschaften geben vor, welche Wellen am effektivsten für die Energieproduktion sind. Gebiete, in denen die Ausbreitungsrichtung der Wellen vorhersehbar ist, sind gut geeignet.
<b>Installation</b>	<b>Neubau</b> Das Schiff sollte um das Scharnier herum entwickelt werden. Die Stabilität der Scharniere muss in jedem Fall Extremwetterereignissen standhalten können.	<b>Nachrüstung möglich</b> Die Kammern könnten nachträglich um einen bestehenden Schiffsrumpf herum gebaut werden. Ein für dieses Konzept optimierter Neubau ist zu empfehlen.	<b>Neubau</b> Dieses Konzept kann nur in einem eigens dafür entwickelten Neubau umgesetzt werden.

Kriterium \ Konzept	Scharnerrumpf	Oszillierende Wassersäulen	Schwungmasse
<b>Betrieb</b>	<b>aktive Steuerung</b> Das System sollte aktiv gesteuert werden. Mit Ballasttanks in den Rumpfhälften kann die Energieproduktion für die gegebenen Wellen optimiert werden. Das Schiff muss aktiv ausgerichtet werden.	<b>passive Steuerung</b> Das System arbeitet passiv.	<b>aktive Steuerung</b> Im Ausleger befindet sich ein Ballasttank. Das System erfordert eine aktive Steuerung des Ballastes und der Energieproduktion an der Schwungmasse.
<b>Lebenserwartung und Schwachstellen im Vergleich zu konventionellen Schiffen</b>	Das Scharnier steht unter großen Belastungen.	Die salzhaltige Luft kann Turbinen und Ventile beschädigen.	Durch die intensive Taumelbewegung des Schiffes wird das Deck wahrscheinlich regelmäßig überspült.
<b>Optimierungspotential</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Das Rumpfdesign um das Scharnier reibungsarm optimieren</li> <li>- Erweiterung des Systems um weitere Scharniere</li> <li>- Alternatividee: Das Statorsystem "Pelamis" hinter dem Schiff ziehen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integration der Kammern in den Rumpf</li> <li>- Anzahl und Größe der Kammern optimieren</li> <li>- Nutzung von Ventilen, um die Anströmrichtung der Turbine gleich zu halten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Das Rumpfdesign weiter optimieren</li> <li>- Optimierung der Schwungmasse und der Exzentrizität</li> <li>- Weite des Auslegers</li> <li>- Steuerung des Auftriebes über den Ballast optimieren</li> </ul>
<b>Sicherheit und Probleme</b>	Bei zu starker Belastung könnte das Scharnier brechen.	Es besteht die Gefahr, dass bei starkem Seegang Seewasser bis in die Turbine gelangt. Durch die hohen Drehzahlen und das schlagartige Abbremsen durch das Wasser, könnte diese Explodieren.	Das Konzept ist darauf ausgelegt, das Schiff in starke Bewegungen zu versetzen. Für Menschen und Ladung an Bord kann diese Bewegung gefährlich sein.
<b>Umwelteinflüsse</b>	Hydrauliköl könnte in das Wasser gelangen	Mechanische Bauteile können verloren gehen	Keine direkte Möglichkeit, die Umwelt negativ zu beeinflussen

Anhang C

Kriterium \ Konzept	Schwimmkörper	Piezoelektrische Elemente
<b>Abhängigkeit von Wellenrichtung</b>	<b>unabhängig</b> Das Konzept ist unabhängig von der Ausbreitungsrichtung der Wellen.	<b>unabhängig</b> Je nach Positionierung und Anzahl der Elemente, könnte das Konzept unabhängig von der Ausbreitungsrichtung der Wellen sein.
<b>Reibungsverluste im Vergleich zu einem konventionellen Schiff</b>	<b>erhöht</b> Jeder Schwimmkörper erzeugt zusätzliche Reibung.	<b>gleichbleibend</b> Die Elemente sollten auf dem Rumpf "glatt" verbaut sein. Es sollten also keine zusätzlichen Kanten entstehen, die die Reibung erhöhen.
<b>Energiegewinn/ -bilanz</b>	<b>stationär bis zu 600kW</b> Stationäre Varianten erzeugen bereits ausreichend Energie, um dieses Konzept anzutreiben. Durch die erhöhte Reibung muss erforscht werden, ob ein effektiver Vortrieb möglich ist.	<b>µW Bereich pro Element</b> Es wird Energie gewonnen, ohne die Reibung zu erhöhen. Es muss erforscht werden, ob die erzielbare Energieproduktion effektiv sein kann. Der Energiegewinn eines einzelnen Elements liegt derzeit im µW Bereich.
<b>Geschwindigkeit</b>	<b>unbekannt</b> Das Verhältnis aus erhöhter Reibung durch den Einsatz von Schwimmkörpern zur Energieproduktion bestimmt die Geschwindigkeit. Voraussichtlich ist dieses Konzept nur für geringe Geschwindigkeiten geeignet.	<b>unzureichend</b> Die nach derzeitigem Stand der Technik zu erwartende Energieproduktion dürfte nur gering sein. Ein reiner WEC-Betrieb ist also nur mit geringer Geschwindigkeit möglich.
<b>Geeignete Schiffsgröße</b>	<b>unbekannt</b> Es muss erforscht werden, für welche Schiffsgrößen dieses Konzept geeignet ist.	<b>unbekannt</b> Durch fehlende Praxistests ist keine klare Aussage möglich. Generell sollte ein Einsatz auf kleinen Booten erste Erkenntnisse über die Effektivität eines solchen Konzeptes liefern.
<b>Nutzung ohne Hilfsantrieb</b>	<b>wahrscheinlich möglich</b> Es muss erforscht werden, ob durch die erhöhte Reibung ein Vortrieb ohne Hilfsantrieb effektiv ist.	<b>nicht möglich</b> Nach derzeitigem Stand der Technik ist die zu erwartende Leistung dieses Systems zu gering, um ein Schiff effektiv anzutreiben.

Kriterium \ Konzept	Schwimmkörper	Piezoelektrische Elemente
<b>Nutzung Hybrid Fossil</b>	<p><b>benötigt Forschung</b>            Ein fossiler Antrieb erhöht die Geschwindigkeit des Schiffes.            Es muss erforscht werden, ob die durch Wellen produzierte Energie ausreichend ist, um den durch zusätzliche Reibung verursachten Energieverlust auszugleichen.</p>	<p><b>benötigt</b>            Die Vibrationen, welche durch einen Verbrennungsmotor hervorgerufen werden, erzeugen ebenfalls Energie.            Ein Zusatzantrieb ist nötig, um einen effektiven Vortrieb zu gewährleisten.</p>
<b>Nutzung Hybrid Klimaneutral</b>	<p><b>gut geeignet</b>            Dieses Konzept kann problemlos mit allen klimaneutralen Systemen kombiniert werden.</p>	<p><b>nur bestimmte</b>            Zur Steigerung der Energieproduktion sind ergänzende Systeme empfehlenswert. Systeme, die das Schiff in Schräglage versetzen, sind nicht zu empfehlen, da sich durch die Schräglage die effektiven Flächen für die Piezoelemente verschieben.</p>
<b>Nutzung zur Energieversorgung an Bord</b>	<p><b>geeignet</b>            Je nach Größe und Anzahl der Auftriebskörper kann auch nur die Energieversorgung an Bord übernommen werden.            Bei Schiffen, die öfter stationär in offenen Gewässern liegen, könnte diese Form der Nutzung geeignet sein.</p>	<p><b>geeignet</b>            Die produzierte Energie kann problemlos für die Versorgung an Bord benutzt werden.            Möglich ist auch die Verwendung als Notfallenergieversorgung.</p>
<b>Einsatzgebiete</b>	<p><b>Anforderung an Wellenhöhe</b>            Die Auslegung des Schwimmkörpergröße und des Hebelarms geben einen effektiven Bereich von Wellengrößen vor.</p>	<p><b>Anforderung an Wellenhöhe</b>            Eine Mindest-Wellenintensität muss vorhanden sein. Für dieses Konzept könnten Gebiete mit kreuzenden Wellenrichtungen gut geeignet sein.</p>
<b>Installation</b>	<p><b>Nachrüstung möglich</b>            Die Schwimmkörper können auch nachträglich an einem Rumpf installiert werden.            Es ist darauf zu achten, dass die Scharniere den Belastungen dauerhaft standhalten können.</p>	<p><b>Nachrüstung möglich</b>            Eine nachträgliche Installation auf dem Rumpf sollte möglich sein.</p>

Kriterium \ Konzept	Schwimmkörper	Piezoelektrische Elemente
<b>Betrieb</b>	<p><b>aktive Steuerung</b> Je nach Energiebedarf können Ausleger in das Wasser abgesenkt werden. Ab einer bestimmten Wellenhöhe ist kein Betrieb mehr möglich.</p>	<p><b>aktive Steuerung</b> Unabhängig von der Ladung sollte das Schiff durch Ballasttanks immer auf dem optimalen Tiefgang gehalten werden, um die Piezoelemente im Bereich der Wasserlinie zu halten. Die Ohm'sche Last an jedem Element muss in einem bestimmten Bereich gehalten werden.</p>
<b>Lebenserwartung und Schwachstellen im Vergleich zu konventionellen Schiffen</b>	<p>Die Scharniere der Hebelarme sind bei Fahrt durch das Wasser in allen drei Raumrichtungen belastet.</p>	<p>Die Elemente könnten sich von dem Rumpf loslösen und abfallen. Durch zu starke Belastungen können Elemente beschädigt werden. Die salzhaltige Luft lässt elektrische Kontakte korrodieren.</p>
<b>Optimierungspotential</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Form der Schwimmkörper optimieren</li> <li>- Länge und Hub der Ausleger optimieren</li> <li>- Untersuchungen der Effizienz von vielen kleinen gegen wenige große Ausleger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Piezoelektrisches Material mit mehr Leistungspotential erforschen</li> <li>- Anzahl und Positionierung am Rumpf optimieren</li> <li>- Rumpfform optimieren, um maximal wechselnde Kräfteinwirkungen im Bereich der Piezoelemente zu erzielen</li> </ul>
<b>Sicherheit und Probleme</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausleger können bei zu starker Belastung ausreißen</li> <li>- Beschädigte Schwimmkörper können mit Wasser volllaufen und das Schiff in Schräglage bringen</li> <li>- Hochgeklappte Schwimmkörper erschweren das Beladen des Schiffes</li> <li>- Die Unterbringung von Rettungsbooten ist im Bereich der Ausleger nicht möglich</li> </ul>	<p>Piezoelemente erzeugen hohe Spannungen. Diese können bei Isolierungsfehlern für Menschen gefährlich sein.</p>
<b>Umwelteinflüsse</b>	<p>Hydrauliköl könnte in das Wasser gelangen</p>	<p>Für die Produktion der Piezoelemente werden seltene Rohstoffe gebraucht. Der Verlust von Elementen im Betrieb ist möglich.</p>

Anhang

Anhang D

Erwartete Leistung der Anlage in [kW]

Wellenhöhe in [m]	Wellenperiode in [s]										
	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5
0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,75	0	49	73	85	86	83	78	72	67	63	59
1,25	54	136	193	205	196	182	167	153	142	132	123
1,75	106	265	347	347	322	294	265	244	224	207	193
2,25	175	429	522	499	457	412	372	337	312	288	267
2,75	262	600	600	600	600	540	484	442	399	367	340

Idealisierte verfügbare Wellenenergie in [kW]

Wellenhöhe in [m]	Wellenperiode in [s]										
	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5
0,25	15	21	28	34	40	46	52	58	64	71	77
0,75	138	193	248	304	359	414	469	524	580	635	690
1,25	383	537	690	843	997	1150	1303	1456	1610	1763	1916
1,75	751	1052	1352	1653	1953	2254	2554	2855	3155	3456	3756
2,25	1242	1739	2235	2732	3229	3726	4222	4719	5216	5712	6209
2,75	1855	2597	3339	4081	4823	5565	6307	7049	7791	8533	9276

Theoretischer Wirkungsgrad in %

Wellenhöhe in [m]	Wellenperiode in [s]										
	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5
0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,75	0,0	25,4	29,4	28,0	24,0	20,1	16,6	13,7	11,6	9,9	8,6
1,25	14,1	25,3	28,0	24,3	19,7	15,8	12,8	10,5	8,8	7,5	6,4
1,75	14,1	25,2	25,7	21,0	16,5	13,0	10,4	8,5	7,1	6,0	5,1
2,25	14,1	24,7	23,4	18,3	14,2	11,1	8,8	7,1	6,0	5,0	4,3
2,75	14,1	23,1	18,0	14,7	12,4	9,7	7,7	6,3	5,1	4,3	3,7



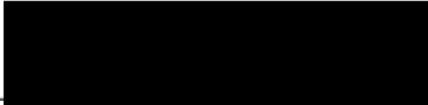
### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

<b><u>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit</u></b>		
Hiermit versichere ich,		
Name:	Gessner	_____
Vorname:	Marvin	_____
dass ich die vorliegende Bachelorarbeit <input checked="" type="checkbox"/> bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema: Nutzung von Wellenenergie zum Antrieb von Schiffen		
ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.		
- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -		
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:		
Hamburg	24.06.2022	
Ort	Datum	Unterschrift im Original