

Untersuchung einer neuen Wellenkraftwerkstechnologie hinsichtlich der generellen Machbarkeit

Dipl.-Ing. Mathias Schumacher, Gruppenleiter „Schwingungstechnik und Maschinendynamik“ des Instituts für Getriebetechnik und Maschinendynamik der RWTH Aachen

1. Einleitung

Im Rahmen der Untersuchung soll eine neue Wellenkrafttechnologie näher untersucht und das Konzept hinsichtlich der physikalischen Machbarkeit bewertet werden. Die entsprechende Technologie wurde bereits zum Patent angemeldet und rechtgültig erteilt (EP 2 369 170 B1). Zudem wurde ein erster Funktionsprototyp aufgebaut und im seichten Gewässer getestet. Ziel der Untersuchungen am IGM ist es die Eignung des Konzepts mittels eines Simulationsmodells nachzuweisen. Im Anschluss kann das erstellte Simulationsmodell verwendet werden, um das System auszulegen und hinsichtlich eines optimalen Bewegungsverhaltens bzw. einer Maximierung der gewinnbaren Energie abzustimmen. Zudem bietet das Modell die Möglichkeit die Belastungen auf die einzelnen Bauteile zu bestimmen und liefert somit eine für die Konstruktion der einzelnen Bauteile nötige Auslegungsgrundlage.

Nachfolgend soll zunächst das Konzept der neuen Technologie beschrieben und der Prototyp gezeigt werden. Im Anschluss wird die Modellierung den einzelnen Komponenten dargestellt. Abschließend werden exemplarisch erste Ergebnisse der Simulationen gezeigt. Dabei wird zunächst ein einzelnes Modul untersucht, bevor das Verhalten einer kleinen Anlage analysiert wird.

2. Technologie

Im Gegensatz zu anderen Entwicklungen im Bereiche der Elektrifizierung aus Meereswellen wird bei der untersuchten Technologie auf Downsizing und einen möglichst einfachen Aufbau gesetzt. Wenige, einfache, leichte und relativ kleine Komponenten können zu einem großen, modular aufgebauten, Kraftwerkskomplex zusammengesetzt werden. Dabei kommen ausschließlich massenfertigbare Einzelkomponenten zum Einsatz, die ähnlich schon heute auf dem Markt erhältlich sind, oder mit geringem Aufwand hergestellt werden können. Da die Technologie modular aufgebaut ist, kann sie leicht, sowohl an lokale Wellenaufkommen angepasst werden, als auch in der Leistung nahezu beliebig variiert werden.

Wie in **Abbildung 1** dargestellt, besteht das Wellenkraftwerk aus wenigen Einzelkomponenten: (1) Schwimmkörper, (2) Hubstange, (3) Anbindungselement, (4) Generator, (5) Regelung- und Leistungselektronik, (6) Verbindungsstangen, (7) Spannelemente (nicht dargestellt oder sichtbar: Zugfeder, Landleitung und Verankerung der Anlage).

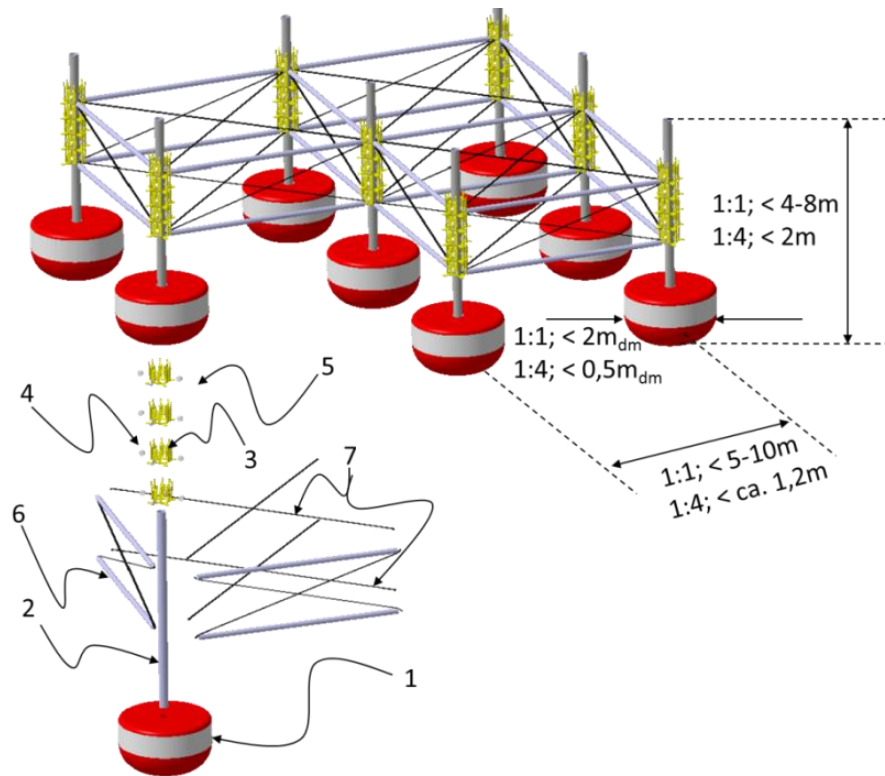


Abbildung 1: Wellenkraftwerk mit neun Modulen und einem Modul in Explosionszeichnung

Insgesamt lässt sich das Wellenkraftwerk, in Analogie zum Fahrwerk eines Autos, in gefederte und ungefederte Massen aufteilen. Das Auftriebsselement (1) mit der Hubstange (2) bilden die ungefederte Masse wohingegen die restlichen Bauteile (insbesondere der Tragrahmen (3, 6 und 7)) die gefederte Masse darstellt. Durch die Wellenbewegung wird die ungefederte Masse vertikal angeregt und bewegt sich relativ zum Tragrahmen. Damit das Auftriebsselement der Welle auch bei der Abwärtsbewegung folgen kann, muss die ungefederten Komponenten eine gewisse Masse aufweisen. Nur so kann der Widerstand der Generatoren überwunden werden. Eine andere Möglichkeit, wäre die Verwendung von Freiläufen. Nachteil dieser zweiten Lösung wäre, dass dadurch nur die Aufwärtsbewegung für die Stromerzeugung genutzt werden könnte. Mittels der geplanten Mehrkörpersimulation können diese beiden prinzipiellen Lösungen verglichen und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet werden.

Die sich ergebene Relativbewegung zwischen Hubstange (2) und Tragstruktur (3, 6 und 7) wird mittels einfacher Nabenmotoren in Strom gewandelt. Diese werden so an die Hubstange gedrückt, dass die translatorische Bewegung in eine rotatorische übersetzt wird. Da das Kraftwerk über die Auftriebsselemente (1) getragen wird, müssen in Wellenrichtung mindestens drei Module miteinander verbunden sein, weil sonst das Kraftwerk bei Wellengang nur schaukeln würde. Es wird damit gerechnet, dass es von Vorteil ist möglichst mehrere Wellen zu überspannen und mehr als drei Module in Wellenrichtung zu verwenden.

Die Tragstruktur besteht aus einem einfachen Stangenfachwerk, dass durch diagonal gespannte Drahtseile eine steife Tragstruktur bildet.

Sowohl der Abstand der Module zueinander als auch die Auslenkungshöhe und Leistungsabnahme der Generatoren können beliebig an die lokalen Bedingungen angepasst werden.

3. Prototyp

Der existierende Prototyp besteht aus 3 x 3 Modulen und hat Gesamtabmessungen von ca. 4 m x 4 m x 2,5 m (L x B x H) (siehe **Abbildung 2**). Als Auftriebselemente sorgen pro Modul jeweils zwei aufgeschäumte Reifen (205/65/R15), die zu zweit eine Auftriebskraft von bis zu 1300 N bereitstellen können. Die gefederte Tragstruktur, die aus einem Fachwerk von Edelstahlstangen und Drahtseilen besteht, wiegt insgesamt knappe 200 kg. Hinzu kommt die Masse der Hubstange und der Auftriebselemente mit je ca. 47 kg. Damit wiegt das Kraftwerk insgesamt 620 kg. Aus Kostengründen ist der Prototyp nur mit kleinen Generatoren (jeweils 6 W) ausgestattet und verfügt somit nur über eine vergleichbar geringe Leistung von 54 W. Als Verbraucher wurden mehrere Glühlampen am Wellenkraftwerk installiert. Abweichend zu der unter dem Kapitel *Technologie* genannten Zugfeder wurden beim dargestellten Prototyp noch Druckfedern verwendet, die sich als nachteilig herausgestellt haben. Auch die hohe Reibung der Gleitlagerführung der Hubstangen ist bei dem Prototyp nicht optimal. Auch hierfür wurde bereits eine neue Lösung erarbeitet und zum Patent angemeldet.

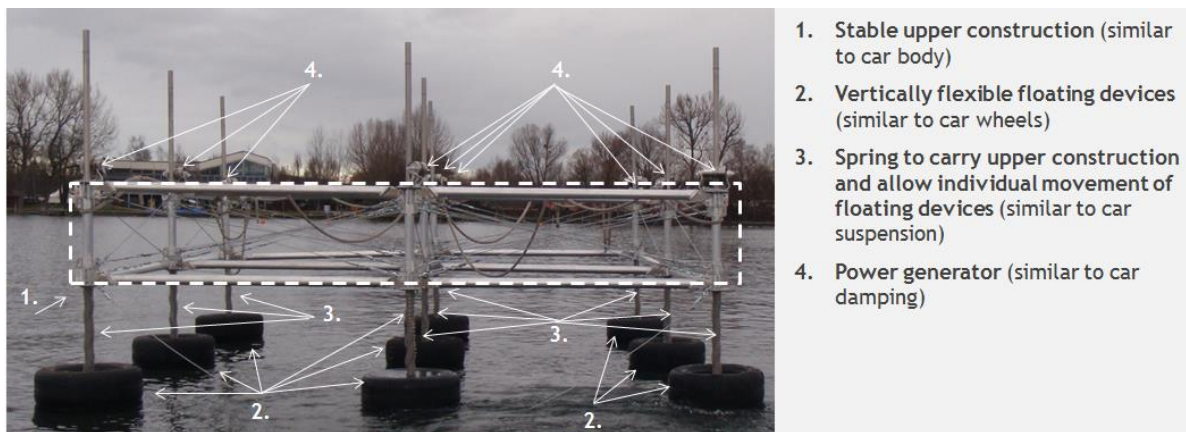


Abbildung 2: Erster Funktionsprototyp der Technologie

Das unter dieser Dokumentation auf der Homepage des IGMs veröffentlichte Video zeigt zunächst, wie durch eine Relativbewegung zwischen einer Hubstange und der Tragstruktur Strom gewandelt werden kann. Zudem zeigt es den schwimmend Prototyp auf einem See. Das System wird durch das Vorbeifahren eines Motorboots zu Schwingungen angeregt und die verbauten Lampen leuchten auf. Damit konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell möglich ist mit diesem Konzept Strom aus Wasserwellen zu generieren. Um das Potential der Technologie besser abschätzen zu können und spätere Prototypen optimal auslegen zu können wurde in der Folge ein Simulationsmodell erstellt, das im Folgenden dargestellt werden soll.

4. Modellierung des Wellenkraftwerks

4.1. Modellierungsansatz

Um das Bewegungsverhalten eines technischen Systems berechnen zu können, muss im Rahmen der Modellbildung ein mathematisches Modell für das reale technische System gefunden werden. Bei der Modellbildung wird dafür zunächst ein physikalisches Modell des technischen Systems gebildet.

Diese Modellbildung wird im Wesentlichen in den folgenden Schritten durchgeführt.

- Festlegung der relevanten Systembestandteile und physikalischen Effekte
- Wahl eines geeigneten Modellansatzes
- Festlegung der notwendigen Modellelemente
- Bestimmung der Modellparameter, Einführung von Koordinatensystemen und Festlegung der Lagegrößen

Das Verhalten der physikalischen Modelle kann durch mathematische Gleichungen beschrieben werden. Die Gesamtheit aller Gleichungen, die ein physikalisches Modell beschreiben, wird als mathematisches Modell bezeichnet.

Das physikalische Modell beschreibt die Teile des technischen Systems, die für das Systemverhalten verantwortlich sind. Durch das physikalische Modell wird festgelegt, welche physikalischen Effekte im Modell berücksichtigt werden und welche Größen mit dem Modell berechnet werden können.

Es ist nur selten möglich, ein reales System durch ein physikalisches Modell vollständig zu erfassen. Letztlich besteht die Aufgabe der Modellbildung darin, das Modell so einfach wie möglich und nur so komplex und aufwändig wie nötig zu entwerfen. Bei der Modellbildung werden komplexe Sachverhalte des realen Systems eindeutig den Eigenschaften des Modells zugeordnet und damit für die anschließende schwingungstechnische Analyse und eventuell auch für die Synthese zugänglich gemacht.

Die Auswahl der zu modellierenden Systembestandteile setzt eine ausreichende Kenntnis über das Verhalten des realen Systems voraus und hängt außerdem von den verfolgten Zielen ab. Wenn ein System nicht genau bekannt ist, ist es häufig nicht möglich, den Einfluss einzelner Effekte auf das Verhalten des Gesamtsystems abzuschätzen. Das physikalische Modell sollte also ggf. diese Effekte zusätzlich zu den bekannten einflussreichen Effekten umfassen. Soweit möglich, kann auch versucht werden, durch Messungen am realen System den Einfluss verschiedener Größen abzuschätzen.

Die Modellierung eines realen Schwingungssystems durch ein Mehrkörpersystem ist die in der Schwingungstechnik am häufigsten verwendete Modellierung. Ein Mehrkörpersystem besteht aus massebehafteten *starr*en Körpern, die miteinander durch Gelenke, Federn, Dämpfern und Stellglieder verbunden sind. Die das Systemverhalten beschreibenden Bewegungsgleichungen sind im Allgemeinen nichtlinear, können aber bei Bedarf bzgl. Solllagen oder Sollbewegungen der verallgemeinerten Koordinaten linearisiert werden. Für kleine Abweichungen von diesen Solllagen oder Sollbewegungen ergeben sich lineare inhomogene zeitvariante Differentialgleichungen der Form:

$$\mathbf{M}(t)\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{P}(t)\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{Q}(t)\mathbf{x}(t) = \mathbf{h}(t)$$

wobei $\mathbf{x}(t)$ als Lagevektor der kleinen Schwingungsgrößen eingeführt wurde. Neben der Massenmatrix $\mathbf{M}(t)$ ist in der Gleichung noch die Matrix der geschwindigkeitsabhängigen Kräfte $\mathbf{P}(t)$, die Matrix der lageabhängigen Kräfte $\mathbf{Q}(t)$ und der Erregervektor $\mathbf{h}(t)$ zu finden.

Sind die Bewegungsgleichungen aufgestellt, so können die Einflüsse verschiedener Systemparameter auf das Eigenverhalten oder das Zeitverhalten der modellierten Maschine untersucht werden.

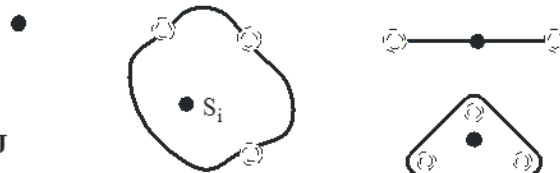
Mit Hilfe des Mehrkörpersystems lässt sich das Systemverhalten mit geringerem Aufwand als mit der Methode der kontinuierlichen Systeme oder mit der Methode der finiten Elemente abschätzen, da auf diese Weise das Verhalten des realen Systems durch ein Modell mit relativ geringem Freiheitsgrad beschrieben werden kann. Die Anzahl der Systemparameter ist dadurch verhältnismäßig niedrig, so dass Parametereinflüsse einfacher analysiert werden können. Außerdem lassen sich die Ergebnisse einer Schwingungsanalyse, sei es nun das Zeitverhalten oder das Eigenverhalten, leichter interpretieren.

Ein wesentliches Ziel für die Modellbildung ist das Streben nach einem Minimalmodell, das die physikalischen Vorgänge in einem System mit möglichst geringem Freiheitsgrad und wenigen Modellparametern richtig erfasst. Ein solches Minimalmodell soll auf eine einfache Form der Bewegungsgleichungen führen, so dass eine gute Interpretation von Simulationsergebnissen möglich wird. Mit geringem Aufwand gewinnt man somit eine Vorstellung über die physikalischen Vorgänge und über die wesentlichen Modellparameter.

Bei Mehrkörpersystemen werden physikalische Eigenschaften wie z.B. Trägheit, Elastizität, Dämpfung oder Kraft den drei Arten von Modellelementen, **starre Körper**, **Bindungselemente** und **Koppellemente** zugeordnet, **Abbildung 3**.

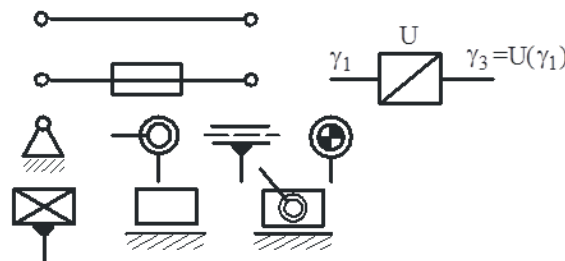
Starre Körper

- Punktmassen m
- Ausgedehnte starre Körper m, J



Bindungselemente

- Masselose Stäbe
- Lagestellglieder
- Lager, Drehgelenke
- Schubgelenke



Koppelemente

- Federn
- Dämpfer {
 - vikose Reibung
 - trockene Reibung
- Kraftstellglieder

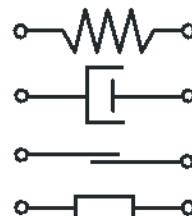


Abbildung 3: Modellelemente der Mehrkörpersimulation

Bei der hier vorgestellten Untersuchung wird für die Aufstellung und Lösung der nichtlinearen Bewegungsgleichung die kommerzielle Mehrkörpersimulations-Software MSC.Adams verwendet.

4.2. Beschreibung des verwendeten Modells

Das im Folgenden beschriebene Simulationsmodell ist vollparametrisch aufgebaut. Dadurch können alle funktionsrelevanten Parameter unabhängig voneinander geändert und später in Optimierungsroutinen verwendet werden. Zudem wurde für den Aufbau des Modells die Adams/View Command-Language verwendet, sodass wiederkehrende Strukturen in Schleifen aufgebaut werden können. So kann die Anzahl der Generatoren pro Modul oder die Anzahl der Module pro Richtung schnell variiert und deren Einfluss systematisch untersucht werden.

Das Simulationsmodell eines einzelnen Moduls besteht aus einem zylinderförmigen Auftriebselement, das mit der Hubstange fix verbunden ist (siehe **Abbildung 4**). Die Hubstange ist über Kurvenkontakte (curve-curve contact) mit den Generatoren verbunden, sodass sie geführt wird. Die translatorische Bewegung $s_{rel,HS}$ wird über die Definition einer Bindungsgleichung (General Constrains) in eine Drehbewegung der Generatoren φ_G gewandelt:

$$s_{rel,HS} - \varphi_G \cdot r_G = 0$$

Die Generatoren sind mittels Drehgelenken an eine Generatorhalteplatte angebunden. Die Halteplatte hat wiederum einen translatorischen Freiheitsgrad in radialer Richtung der Hubstange. Dadurch können die Generatoren über eine Feder an die Hubstange gedrückt werden. Die Feder ist stark vorgespannt und mit dem Gestell bzw. der Tragstruktur verbunden.

Zwischen Hubstange und Gestell (Modell des Einzelmoduls) bzw. Tragstruktur (Modell einer kleinen Anlage) befindet sich zudem noch eine vorgespannte Feder, die das Gewicht der Tragstruktur trägt.

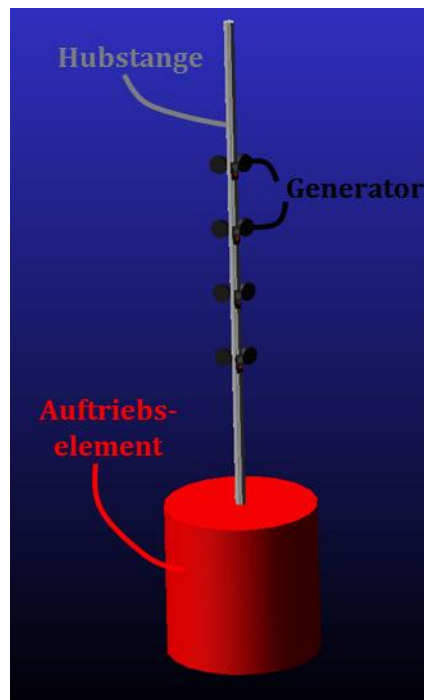


Abbildung 4: MKS Modell eines Moduls

Dieses System wird über eine modellierte Auftriebskraft angeregt. Die Leistungsabnahme resultiert aus einem Rotationsdämpfer zwischen Generator und Generatorhalteplatte. Beide Simulationsmodellbestandteile sollen untenstehend nochmal näher erläutert werden.

Die Tragstruktur wird in diesem ersten Modell als ein starrer Körper modelliert und besitzt bei dem Modell der Anlage drei Bindungsgleichungen, durch die die Rotation um die Hochachse sowie die Translation in der Ebene gesperrt sind. Der Körper kann also noch um die Horizontalachsen kippen und sich in vertikaler Richtung bewegen.

4.2.1. Modellierung der Anregung durch die Auftriebskraft

Das für diese Untersuchung benutzte Auftriebselement ist zylinderförmig. Für spätere Untersuchungen kann aber eine beliebige Oberfläche verwendet werden. Dadurch werden jedoch einige der unten aufgeführten Gleichungen etwas komplexer und schwerer zu nachvollziehen, weshalb in dieser Darstellung darauf verzichtet wird.

Zunächst wird die statische Eintauchtiefe $h_{eintauch,st}$ und die entsprechende Auftriebskraft $F_{eintauch,st}$ bestimmt:

$$h_{eintauch,st} = \frac{m_{AE} + m_{HS} + \frac{m_{TS}}{Anz_x + Anz_y} + (m_G + m_{GH}) \cdot Anz_G}{\pi \cdot r_{AE}^2 \cdot \rho_W}$$

$$F_{eintauch,st} = \left(m_{AE} + m_{HS} + \frac{m_{TS}}{Anz_x + Anz_y} + (m_G + m_{GH}) \cdot Anz_G \right) \cdot g$$

mit m_{AE} : Masse Auftriebselement
 m_{HS} : Masse Hubstange
 m_{TS} : Masse Tragstruktur
 m_G : Masse Generator
 m_{GH} : Masse Generatorhalter
 Anz_x : Anzahl der Module in Wellenrichtung
 Anz_y : Anzahl der Module quer zur Welle
 Anz_G : Anzahl der Generatoren pro Modul
 r_{AE} : Radius des Auftriebselements
 ρ_W : Dichte Wasser
 g : Erdbeschleunigung

Damit kann im Anschluss zunächst die Wellenbewegung generiert werden. Es sein darauf hingewiesen, dass bei der hier vorgestellten Untersuchung der Koordinatenursprung im Mittelpunkt der unteren Begrenzungsfläche des Auftriebselements liegt. Es soll zunächst eine reine Sinuswelle untersucht werden, bei der sowohl die Amplitude amp_W , die Frequenz f_W und die Wellenlänge s_W variiert werden kann. Später kann aber durch die Vorgabe eines beliebigen Wellenprofils jede mögliche gemessene oder synthetisch generierte Wellenbewegung als Anregung des Systems genutzt werden. Für die Generierung realistischer Wellenanregungen kann die über die Universität Lund frei verfügbare Matlab-Toolbox WAFO genutzt werden. Für die Sinuswelle ergibt sich die folgende Wellenbewegung $h_{Welle}(t)$:

$$h_{Welle}(t) = amp_W \cdot \sin\left(f_W \cdot 2 \cdot \pi \cdot (t - T_{M,i})\right) + h_{eintauch,st}$$

mit dem Zeitverzug der Welle am entsprechenden Modul i von:

$$T_{M,i} = (i - 1) \cdot \frac{s_x}{s_W \cdot f_W}$$

Dabei steht s_x für den Abstand der Module in Wellenrichtung.

Im Simulationsmodell wird die Bewegung des Schwerpunktes des Auftriebselements zu jedem Zeitschritt berechnet. Diese kann für die Bestimmung des Wasserstands der Welle relativ zum Auftriebselement $h_{rel}(t)$ benutzt werden.

Im Anschluss kann die maximale Auftriebskraft $F_{A,max}$ bestimmt werden, die erreicht wird sobald der Schwimmkörper überspült wird:

$$F_{A,max} = (h_{AE} - h_{eintauch,st}) \cdot \pi \cdot r_{AE}^2 \cdot \rho_W \cdot g + F_{eintauch,st}$$

Die minimale Auftriebskraft liegt bei null Newton, da das Wasser nur Druck- und keine Zugkräfte einbringen kann. Die entstehende Auftriebskraft ohne Berücksichtigung dieser Grenzen ($F_{A,unkorr}$) kann durch folgende Gleichung bestimmt werden:

$$F_{A,unkorr}(t) = h_{rel}(t) \cdot \pi \cdot r_{AE}^2 \cdot \rho_W \cdot g + F_{eintauch,st}$$

Aus dieser Gleichung kann unter Verwendung der min- und max-Funktion der Adams/View-Command Language schließlich die tatsächlich wirkende Auftriebskraft F_A bestimmt werden.

4.2.2. Modellierung der Generatoren

Die Generatoren sind noch stark vereinfacht modelliert. Zur Abbildung dessen Eigenschaften wurde ein Rotationsdämpfer mit konstanten Dämpfungsgrad definiert. Dadurch kann noch nicht der drehzahlabhängige Wirkungsgrad berücksichtigt werden. Für spätere Untersuchungen sollen entsprechende Differentialgleichungen, die das Generatorverhalten besser abbildenden, implementiert werden.

5. Ergebnisse der Simulationen

5.1. Referenzmodell

Nachfolgend sollen einige der gemachten Untersuchungen exemplarisch dargestellt werden. Das unter diesen Artikel auf der Homepage des IGMs veröffentlichte Video zeigt eine kleine Anlage mit fünf Modulen in Wellenrichtung. Das Kraftwerk schwimmt auf dem Wasser und wird durch eine Sinuswelle angeregt. Es ist deutlich die Relativbewegung der Hubstange zum Gestell und die Übertragung der Bewegung auf die drehend gelagerten Generatoren sichtbar. Sowohl die Bewegung der Wellen und des Auftriebselements als auch die sich aus dem Produkt aus Drehmoment und Drehgeschwindigkeit der Generatoren ergebene abgenommene mechanische Leistung wird angezeigt.

Als Anregung wurde für die dargestellte Untersuchung eine Welle mit einer Amplitude von 875 mm und einer Periodendauer von 5,5 s verwendet. Diese Welle trägt pro Meter Wellenfront ca. 20,4 kW. Die entspricht der durchschnittlichen Leistung des Wellenvorkommens an einem möglichen Teststandort in der Nordsee (56,23° N; 2,03° E).

Mit dieser Welle und einem Auftriebselement mit einem Radius von 1,5 m, ergibt sich eine über die Zeit gemittelte mechanisch abgeführte Leistung von ca. 15 kW für die Summe der fünf Module. Bei der Annahme eines Wirkungsgrads von 0.8 der Generatoren liegt die gewinnbare elektrische Leistung bei 12 kW. Bei einer Welle die weniger Energie trägt ($H_s = 1,25$ m; $T = 5,5$ s; $4,2$ W/m) beträgt die gewinnbare elektrische Leistung immerhin noch 5 kW. Am angegebenen Standort kommt diese Welle mit 9,4 % relativ häufig vor.

Eine Übersicht der für diese Simulation verwendeten Parameter findet sich in der untenstehenden Tabelle.

Parameter	Zahlenwert	Einheit
Anzahl Generatoren pro Modul	12	[-]
Anzahl Module	5	[-]
Masse Schwimmkörper	100	kg
Masse Hubstange	1000	kg
Masse Generator	2.5	kg
Masse Tragstruktur	2500	kg
Durchmesser Schwimmkörper	1.5	m
Höhe Schwimmkörper	1.8	m
Länge Hubstange	5	m
Abstand Module	7.5	m
Federsteifigkeit Tragfeder	2.6	N/mm
Vorspannweg Tragfeder	2	m
Generatorwiderstand	3000	N*mm*s/rad

Bei der Modellierung der Wellenkraft wurde eine Abschwächung der Wellenamplitude pro Modulreihe in Wellenrichtung von jeweils 5 % angenommen. Damit ergibt sich eine gewinnbare elektrische mittlere Leistung von ca. 55 kW bei der Verwendung von 25 Modulen in einem kleinen Wellenkraftwerk mit 5 x 5 Modulen.

6. Fazit und Ausblick

Mit den vorgestellten Prototyp und dem gezeigten Simulationsmodells konnte die prinzipielle Funktion und Machbarkeit der Technologie nachgewiesen werden. Zudem ist mit dem Simulationsmodell eine erste Abschätzung der gewinnbaren Energie möglich. Auch kann der Einfluss wichtiger konstruktiver Parameter abgeschätzt werden. Somit bietet das Simulationsmodell die nötige Auslegungsgrundlage für weitere Prototypen.

Für eine bessere Abschätzung der gewinnbaren Energie und der wirkenden Kräfte sind jedoch noch weitere Schritte nötig. So muss zunächst eine realistische Anregung implementiert und für die Untersuchungen verwendet werden. Auch müssen die durch die Wellen eingebrachten horizontalen Kräfte berücksichtigt werden. Ausgehend von dieser realistischeren Anregung muss dann das Simulationsmodell schrittweise detaillierter gestaltet werden. Dazu gehören eine bessere Abbildung des Generatorverhaltens genauso wie die Modellierung des Fachwerks der Tragstruktur.