

**Numerische Mehrkörpersimulation einer modular  
aufgebauten, schwimmenden Multifunktionsplattform  
mit besonderem Fokus auf die Verbindungselemente**

Bernhard Blümel, BSc

**Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom Ingenieur

Studienrichtung Maschinenbau

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen der

**Technischen Universität Graz**

Beurteilerin:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Katrin Ellermann

Betreuer:

Dipl.-Ing. Marcel Prem BSc

Institut für Mechanik

Technische Universität Graz

Graz, Mai 2019

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 28. Mai 2019

.....  
(Unterschrift)

## Danksagungen

Ich möchte mich bei der Leiterin des Instituts für Mechanik Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Katrin Ellermann, für die Möglichkeit diese Arbeit zu verfassen und für die umfangreiche fachliche Unterstützung, bedanken.

Weiters möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Marcel Prem und Dr. Michael Klanner für die fachliche Betreuung und für die hilfreichen Anregungen bei der Anfertigung dieser Arbeit bedanken.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Freundin Gabi für die Unterstützung und Geduld, die sie mir im Laufe meiner Studienzeit und während des Verfassens dieser Arbeit entgegengebracht hat, bedanken. Im speziellen möchte ich mich für die Liebe, Motivation und Kraft bedanken, ohne die das erfolgreiche Abschließen meines Studiums nicht möglich gewesen wären.

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern bedanken, die mich mein ganzes Leben lang unterstützt haben. Sie haben mich immer ermutigt und an mich geglaubt. Außerdem möchte ich mich bei meinen Großeltern und nicht zuletzt bei meiner Schwester Christina für die Unterstützung in den Jahren meines Studiums bedanken.

## Kurzfassung

Im Rahmen des EU Forschungsprojektes „Space@Sea“ soll ein System aus schwimmenden Multifunktionsplattformen entwickelt werden. Ziel ist es, die Plattformen als Transport- und Logistikhub sowie als Anlage zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen zu verwenden. Des Weiteren soll die Möglichkeit geschaffen werden die Plattformen als Aquakultur zur Herstellung von Lebensmitteln und als dauerhaftes Habitat für Menschen nutzbar zu machen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Aspekt der Verbindung der einzelnen Plattformelemente. Dank der Rechenleistung moderner Computer ist es möglich diese komplexen mechanischen Systeme durch die Anwendung der Methoden der Mehrkörperdynamik näher zu betrachten.

In dieser Arbeit werden Anforderungen an die Verbindungselemente definiert und mehrere Konzepte für die Verbindung der Plattformen ausgearbeitet. Mithilfe einer Expertenkommission wurden diese Konzepte evaluiert und bewertet. Der Einsatz von Stahlseilen und Fendern als Verbindungselemente wurde von der Kommission am besten bewertet, weshalb sich diese Arbeit hauptsächlich mit diesem Konzept befasst.

Durch die Anwendung der Methode von Newton-Euler wird ein mathematisches Modell des Konzeptes „Seile und Fender“ erstellt. Zur numerischen Berechnung des Mehrkörpersystems wird das Software Paket „Matlab“ verwendet.

Es werden diverse Berechnungen mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt. Mit den daraus gewonnenen Werten, vor allem jenen der auftretenden Kräfte, wird die Umsetzbarkeit des Konzeptes bewertet, beziehungsweise wird definiert unter welchen äußeren Bedingungen das Konzept durchführbar ist.

Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigt sich, dass der Einsatz von Fendern eine gangbare Möglichkeit darstellt den Plattformabstand in Grenzen zu halten. Der Einsatz von Stahlseilen ist, unter den hier untersuchten Bedingungen nur dann möglich, wenn die Aufhängung der Seile gefedert ausgeführt wird und damit die Steifigkeit deutlich gemindert wird.

## **Abstract**

The goal of the EU research project "Space @ Sea" is to develop a system of floating multifunctional platforms. The platforms should be useable as a transport and logistics hub as well as a substructure for renewable power generation plants. Furthermore, the platforms should be utilized as aquaculture to produce food and as a permanent habitat for humans.

This thesis deals with the aspect of the connection of the individual platform elements. Because of the computing power of modern computers, it is possible to analyse these complex mechanical systems by applying the methods of multi-body dynamics.

This thesis defines requirements for the connectors and develops several concepts for connecting the platforms. These concepts have been evaluated and rated by a commission of experts. The use of steel cables and fenders as connection elements was rated best by the commission. Therefore, this work is mainly concerned with this concept.

A mathematical model of the concept "ropes and fenders" is created by applying the method of Newton-Euler. For the numerical calculation of the multibody system the software package "Matlab" is used.

Various calculations with different boundary conditions are carried out. With the obtained values, especially those of the occurring forces, the feasibility of the concept is evaluated, or rather it is defined under which external conditions the concept is feasible.

The evaluation of the results shows that the use of fenders is a viable option to keep the platform distance within certain limits. The use of steel cables, under the examined conditions, is only possible if the attachment of the cables is sprung and therefore the stiffness of the connection is significantly reduced.

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	1
1.1.	Das Projekt Space@Sea .....	1
1.2.	Aktueller Projektstand .....	1
1.3.	Ziel der Arbeit .....	2
1.4.	Vorgehensweise .....	2
2.	Grundlagen und Methoden .....	3
2.1.	Mehrköpersysteme .....	3
2.1.1.	Definition eines Mehrköpersystems .....	3
2.1.2.	Ziele einer Mehrkörpersimulation .....	3
2.1.3.	Freiheitsgrade .....	4
2.2.	Methode nach Newton-Euler .....	4
2.2.1.	Impuls- und Drallsatz .....	5
2.2.2.	Winkel und Drehmatrizen .....	7
2.2.3.	Externe Kräfte .....	9
3.	Konzepte für Verbindungselemente .....	11
3.1.	Anforderungen und Grundsätzliche Überlegungen .....	11
3.2.	Ausarbeitung der Konzepte .....	13
3.2.1.	Konzept 1: Seile und Fender .....	14
3.2.2.	Konzept 2: Federnd gelagerte Seile mit Fendern .....	15
3.2.3.	Konzept 3: Feder-Dämpfer Elemente in X-Anordnung .....	17
3.2.4.	Konzept 4: Feder-Dämpfer Elemente mit Fendern .....	18
3.2.5.	Konzept 5: Feder-Dämpfer Elemente mit Drehfedern .....	19
3.2.6.	Konzept 6: Starre Verbindung mit Drehfedern .....	20
3.3.	Bewertung der Konzepte .....	21
3.4.	Ausgewähltes Konzept .....	22
4.	Simulation des Konzeptes .....	24
4.1.	Aufbau der Simulation .....	24
4.2.	Simulation des ausgewählten Konzeptes .....	25
4.2.1.	Eingabeparameter der Simulation des Ausgangsentwurfs .....	25
4.2.2.	Ergebnisse der Simulation des Ausgangsentwurfs .....	27
4.2.3.	Vergleich unterschiedlicher Anströmwinkel der Wellen .....	32
4.2.4.	Vergleich unterschiedlicher Abstände der Plattformen zueinander .....	35
4.2.5.	Variation der Dämpfungskonstante der Seile .....	37
4.2.6.	Ergebnisse der Simulation von Seilen im Verbund .....	38

4.2.7.	Ergebnisse der Simulation von gefedert gelagerten Seilen .....	40
4.2.8.	Untersuchung des Systems mit vorgespannten Seilen .....	41
4.2.9.	Untersuchung auf Resonanzfälle.....	42
4.3.	Vergleich unterschiedlicher numerischer Lösungsverfahren .....	44
5.	Schlussbetrachtungen .....	46
5.1.	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse .....	46
5.2.	Limitationen der Ergebnisse.....	46
5.3.	Relevanz der Simulation für das Space@Sea Projekt und Ausblick .....	47
	Literaturverzeichnis .....	49
	Abbildungsverzeichnis .....	50
	Tabellenverzeichnis.....	52

# **1. Einleitung**

## **1.1. Das Projekt Space@Sea**

Im Rahmen des von 2014 bis 2020 laufenden EU Forschungs- und Innovationsförderungsprogramms „Horizon 2020“ wurde im November 2017 das Projekt „Space@Sea“, gestartet. Ziel des 3-jährigen Projektes ist es eine langlebige und nachhaltige Lösung für die Raumnutzung auf dem Meer auszuarbeiten. Dazu soll ein modular aufgebautes System aus schwimmenden Multifunktionsplattformen entwickelt werden. Diese Plattformen sollen sich offshore zu einem, den Anforderungen entsprechenden, Gesamtsystem zusammenbauen lassen und dadurch eine hohe Flexibilität aufweisen. Es soll ein Produkt geschaffen werden, welches für verschiedene Anwendungen genutzt werden kann. Dazu sind im Projekt vorerst vier Anwendungsfälle definiert. Diese sind die Nutzung der Plattformen als Transport- und Logistikhub sowie als Anlage zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen. Des Weiteren soll die Möglichkeit geschaffen werden die Plattformen als Aquakultur zur Herstellung von Lebensmitteln und als dauerhaftes Habitat für Menschen zu benutzen. Auch eine Kombination mehrerer dieser Anwendungsfälle soll aufgrund der angestrebten Modularität sehr einfach zu verwirklichen sein. [1]

Die wichtigsten Aspekte bei der Entwicklung sind Langlebigkeit in einer korrosiven Umgebung, Modularität, Kosteneffizienz und ein möglichst geringer Einfluss auf die Meeresökologie.

Die Arbeitsgruppe besteht aus 17 europäischen Partnern, welche sich die unterschiedlichen Entwicklungsaufgaben untereinander aufteilen. Es wurden zehn Arbeitspakete geschaffen, in welche die unterschiedlichen Aufgabenstellungen aufgeteilt wurden. Diese Arbeit ist im Arbeitspaket „Form, Kräfte und Kinematik“, im Unterpunkt „detailliertes Design“ angesiedelt. Sie beschäftigt sich mit der Bewegung der Plattformen, den Verbindungselementen zwischen den Plattformen und den durch die Bewegungen entstehenden Kräften.

## **1.2. Aktueller Projektstand**

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit war das Design der Plattformen noch nicht abschließend festgelegt. Die Arbeitsgruppe des Grunddesigns, hat sich aber mittlerweile auf eine quadratische Grundfläche der Plattform mit 45m Kantenlänge geeinigt. Diese Entscheidung beruhte vor allem auf den Anforderungen der unterschiedlichen Anwendungsszenarien, welche von der quadratischen Form am besten erfüllt werden, da der Platz so am effizientesten genutzt werden kann. Die Wahl der Seitenlänge von 45 m beruht auf der Tatsache, dass für diese Größe mehrere Werften in Europa als Produktionsstandort, für die Plattformen, in Frage kommen.

Bezüglich der Plattformdicke gibt es bislang keine endgültige Entscheidung. Ob eine Festlegung der Dicke, angesichts der sich stark unterscheidenden Anwendungsszenarien, sinnvoll ist, muss noch untersucht werden.

Auch zahlreiche andere Parameter, wie die Masse der Plattformen oder das Material, aus dem sie gefertigt werden, stehen zum jetzigen Zeitpunkt noch zur Diskussion. Für einige dieser Punkte werden in dieser Arbeit daher Annahmen getroffen.



### **1.3. Ziel der Arbeit**

In dieser Arbeit werden Konzepte für die Verbindung von schwimmenden Plattformen erarbeitet und die Auswirkung der Dynamik der Gesamtstruktur auf die Verbindungselemente untersucht. Zu Beginn wird ein Anforderungskatalog mit zwingenden und wünschenswerten Kriterien für die Verbindungselemente erstellt. Eine besondere Herausforderung stellen hierbei die unterschiedlichen Anwendungsszenarien dar, da sie auch zum Teil stark voneinander abweichende Anforderungen an das System stellen.

Ziel der Arbeit ist es, durch eine Evaluierung der unterschiedlichen Konzepte das vielversprechendste zu finden und für dieses die Kräfte in den Verbindungselementen zu bestimmen. Dazu wird dieses Konzept mit einer numerischen Mehrkörpersimulation genauer untersucht. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wird das System mit unterschiedlichen Randbedingungen simuliert und die Kräfte in jedem einzelnen Verbindungselement bestimmt. Dabei werden Parameter, unter anderem die Steifigkeit und der Dämpfungsgrad der Verbindungselemente, variiert. Des Weiteren sollen auch äußere Einflussfaktoren, wie die Richtung der Wellenströmung verändert werden.

Durch die Simulation wird bestimmt, unter welchen Bedingungen das Konzept für die Verbindung der Plattformen einsetzbar ist. Primär wird dies durch die Berechnung der auf die Verbindungselemente wirkenden Kräfte überprüft.

### **1.4. Vorgehensweise**

In der ersten Phase werden mehrere unterschiedliche Konzepte erstellt. Dabei sollen so wenige einschränkende Faktoren wie möglich berücksichtigt werden, um mögliche Lösungen nicht vorzeitig auszuschließen.

Anschließend wird ein kompakter Anforderungskatalog erstellt, welcher die Anforderungen möglichst aller Anwendungsszenarien berücksichtigt. Die Anforderungen werden dabei so formuliert, dass sie auf jedes Konzept anwendbar sind.

Der Anforderungskatalog dient als Basis für eine Expertenbefragung. Bei dieser soll, durch ein auf Punkten basierendes Bewertungssystem, herausgefunden werden, welche der erstellten Konzepte die Anforderungen am besten erfüllen.

Das Konzept, welches in der Expertenbefragung am besten abschneidet, wird dann mittels Mehrkörpersimulation genauer untersucht. Dazu wird mittels der Methode nach Newton-Euler ein Differentialgleichungssystem aufgestellt, welches mithilfe von „Matlab R2018a“ numerisch gelöst wird. Das bedeutet, dass die räumliche Lage jeder Plattform zu jedem Zeitpunkt des definierten Intervalls berechnet wird. Weiters lassen sich auch die Kräfte, zwischen Verbindungselementen und Plattformen, berechnen.

Die relevanten Konstruktionsparameter werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die geforderten Randbedingungen untersucht. Unter anderem wird so berechnet, wie hoch die Kräfte in den Verbindungselementen, bei verschiedenen Steifigkeiten und Dämpfungsgraden des Verbindungselements, werden.

## **2. Grundlagen und Methoden**

In diesem Kapitel wird auf die relevanten Grundlagen der Mehrkörpersimulation eingegangen. Zuerst werden die Grundelemente von Mehrkörpersystemen definiert, danach werden die Ziele einer Mehrkörpersimulation dargelegt und anschließend wird der Begriff des Freiheitsgrades erklärt. Abschließend werden alle für diese Arbeit relevanten Aspekte der Methode nach Newton-Euler beschrieben.

### **2.1. Mehrkörpersysteme**

#### **2.1.1. Definition eines Mehrkörpersystems**

Ein Mehrkörpersystem ist ein mechanisches System, das aus gekoppelten Körpern besteht, welche sich unter dem Einfluss von Kräften im Raum bewegen. Die Körper sind massebehaftet, die sie verbindenden Elemente werden jedoch als masselos betrachtet. Diese Koppellemente können Krafterelemente (z.B. Federn oder Dämpfer) sein, welche zwei Punkte zweier Körper verbinden und eine Kraft oder ein Moment auf diese Körper ausüben. Andererseits können es Bindungselemente sein, (z.B. Gelenke oder Führungen) welche die Lage eines Körpers relativ zu einem anderen definieren. [2]

Prinzipiell können Mehrkörpersysteme in zwei Gruppen eingeteilt werden. Es gibt starre Mehrkörpersysteme, bei denen alle Körper als ideal starr betrachtet werden können. Zum anderen existieren elastische Mehrkörpersysteme, bei denen auch die elastische Verformung der Körper berücksichtigt wird.

Die Annahme ideal starrer Körper stellt eine Vereinfachung dar, welche den Berechnungsaufwand deutlich senkt, gleichzeitig jedoch auch das Berechnungsmodell ungenauer werden lässt. Je nach betrachtetem System ist zu beurteilen, ob die Annahme, dass alle Körper ideal starr sind, eine gute Näherung ist. Maßgeblich ist die Größe der Verformungen im Verhältnis zu den Bewegungen der Körper zueinander. Die in dieser Arbeit vorkommenden Körper werden als starr angenommen, da die Plattformen als Fundament für diverse Strukturen fungieren und daher so konstruiert werden müssen, dass sie eine hohe Steifigkeit aufweisen. Die zulässige Verformung der Plattform ist daher um Größenordnungen kleiner als die Relativbewegungen der Plattformen zueinander. [3]

Durch diese Vereinfachung kann aus der Position eines Körperpunktes und der Ausrichtung des Körpers die Lage jedes anderen Körperpunktes eindeutig bestimmt werden.

#### **2.1.2. Ziele einer Mehrkörpersimulation**

Eine Mehrkörpersimulation basiert auf einem mathematischen Modell, welches die Wirklichkeit je nach Detailgrad des Modells mehr oder weniger genau abbildet. Im Allgemeinen ist das Ziel der Simulation, Lösungen für ein technisches Problem zu finden. Als erster Schritt müssen ausgehend von einem technischen Problem konkrete Anforderungen an das System definiert werden. Danach wird das reale System zu einem Ersatzsystem abstrahiert, wobei das Ersatzsystem so einfach wie möglich und so komplex wie nötig erstellt wird. [3] [4]

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Verbindungselementen. Dabei sollen insbesondere folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie groß sind die Kräfte in den Verbindungselementen bei gegebener Anregung und Steifigkeit der Verbindungselemente?
- Wie verändern sich die Kräfte in den Verbindungselementen bei unterschiedlicher Anregung und verschiedenen Systemkonfigurationen?
- Welchen Einfluss hat der Dämpfungsgrad der Verbindungselemente auf das Verhalten des Systems?

### 2.1.3. **Freiheitsgrade**

Die Freiheitsgrade eines Mehrkörpersystems sind definiert als die Anzahl der unabhängigen Koordinaten, welche man benötigt, um die Lage des Systems im Raum zu beschreiben. Betrachtet man lediglich Punktmassen, die keine räumliche Ausdehnung besitzen, sind die Freiheitsgrade im dreidimensionalen Raum gegeben durch

$$f = 3n - m \quad (2.1)$$

wobei  $n$  die Anzahl der Punktmassen und  $m$  die Anzahl der Bindungen ist. Diese Freiheitsgrade werden auch als translatorische Freiheitsgrade bezeichnet, da diese jeweils eine unabhängige Verschiebung in eine Raumrichtung erlauben.

Betrachtet man hingegen ausgedehnte starre Körper, können diese zusätzlich ihre Ausrichtung relativ zueinander verändern. Somit sind die Freiheitsgrade des Systems gegeben durch

$$f = 6n - m \quad (2.2)$$

wobei die 3 nun hinzugekommen Freiheitsgrade als rotatorische Freiheitsgrade bezeichnet werden, da diese jeweils eine unabhängige Winkelverdrehung um eine Achsenrichtung beschreiben. [5]

Der Begriff „unabhängig“, bezeichnet kinematische Unabhängigkeit, eine Kraftübertragung zwischen den betrachteten Körpern gibt es demnach. Das bedeutet, dass Federn und Dämpfer, in diesem Sinne keine Bindungselemente darstellen und den Freiheitsgrad eines Systems nicht einschränken.

Bindungen sind als Gelenke (z.B. Kugelgelenke) oder Führungen (z.B. Schienensysteme) in Mehrkörpersystemen vorhanden und treten im Berechnungsmodell als Gleichungen auf, welche zwei oder mehr Koordinaten miteinander in Beziehung setzten. Dadurch reduziert sich die Anzahl der unabhängigen Koordinaten und daher auch die Anzahl der Freiheitsgrade des Systems.

## 2.2. **Methode nach Newton-Euler**

Zur Erstellung von lösbaeren Gleichungssystemen von komplexen Mehrkörpersystemen können verschiedene Methoden zum Einsatz kommen, beispielsweise das Prinzip von d'Alembert (virtuelle Arbeit) beziehungsweise das Prinzip von Jourdain (virtuelle Leistung) oder die Lagrangeschen Gleichungen 2. Art.

Das System wird entsprechend freigeschnitten, um über Impuls- und Drallsatz die Differentialgleichungen zur Beschreibung der Bewegung des Mehrkörpersystems zu erstellen. Durch das Freischneiden treten zunächst viele Kräfte und Momente an den Bindungen auf. Es muss daher darauf geachtet werden, dass hinreichend viele linear

unabhängige Gleichungen zur Beschreibung der Zusammenhänge aufgestellt werden. Bei vielen komplexen Mehrkörpersystemen ist das Erstellen der Freischnitte sehr aufwändig und daher wird eine der anderen, vorher erwähnten, Methoden zur Erstellung des Differentialgleichungssystems häufig der Methode nach Newton-Euler vorgezogen. [3]

Bei dem hier untersuchten Mehrkörpersystem handelt es sich um eine modular aufgebaute Struktur, bei der alle Elemente einen identischen Aufbau aufweisen. Daher ist nur ein einziger Freischnitt einer Plattform notwendig, welcher für eine Kopplung mit zwei Verbindungselementen pro Seite in Abbildung 1 beispielhaft dargestellt ist.

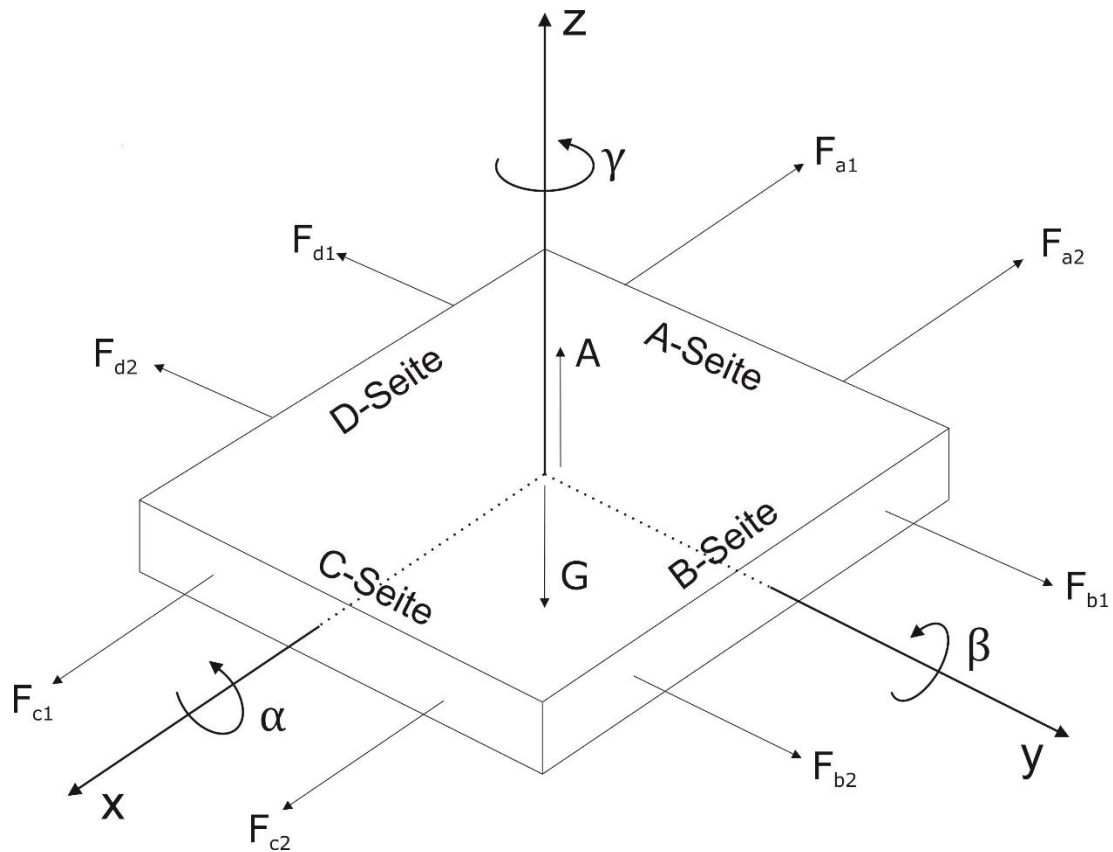


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung des Freischnitts einer Plattform, F sieht für Kräfte der Verbindungselemente, G für die Gewichtskraft der Plattform und A für die Auftriebskraft des Wassers

### 2.2.1. Impuls- und Drallsatz

Der Impuls eines infinitesimal kleinen Körpers ist definiert als

$$\overline{dp} = \overline{v_K} dm \quad (2.3)$$

wobei  $v_K$  die Geschwindigkeit der Masse bezeichnet. Durch Integration erhält man den Gesamtimpuls eines Körpers.

$$\vec{p} = \int_K \overline{dp} = \int_K \overline{v_K} dm \quad (2.4)$$

Ist die Masse des Körpers konstant, führt das zu Gleichung 2.5

$$\vec{p} = m \vec{v}_s \quad (2.5)$$

Wobei  $\vec{v}_s$  für die Schwerpunktgeschwindigkeit steht. [2]

Der auf Isaac Newton zurückgehende Impulssatz besagt nun, dass die zeitliche Änderung des Impulses der Summe aller auf den Körper einwirkenden Kräften entspricht.

$$\frac{d}{dt}(\vec{v} dm) = d\vec{F}_a + d\vec{F}_i \quad (2.6)$$

Hierbei steht  $\vec{F}_a$  für die von außen auf das System wirkenden Kräfte und  $\vec{F}_i$  für Schnittkräfte zwischen  $dm$  und anderen Massenelementen des Systems, die sogenannten inneren Kräfte. Wird nun ein abgeschlossenes System betrachtet, heben sich die inneren Kräfte auf, da sie innerhalb der Systemgrenze stets paarweise entgegengesetzt auftreten. Es bleibt [3]

$$\frac{d}{dt}\vec{p} = \vec{F}_a \quad (2.7)$$

Der Drallsatz ist als vom Impulssatz unabhängiges Grundgesetz zu betrachten und besagt, dass die zeitliche Änderung des Drehimpulses der Summe aller auf den Körper einwirkenden Momenten entspricht. Der Drall ist allerdings immer abhängig vom jeweiligen Bezugspunkt, aus dem man ihn betrachtet. Ganz allgemein kann der Drall daher folgend angegeben werden

$$\begin{aligned} L^0 &= \int_K \left( (\vec{r}_{OQ} + \vec{r}_{QK}) \times \left( \frac{d\vec{r}_{OQ}}{dt} + \frac{d\vec{r}_{QK}}{dt} \right) \right) dm \\ &= \vec{L}^Q + \vec{r}_{OQ} \times \vec{p} + m \vec{r}_{QS} \times \vec{v}_Q \end{aligned} \quad (2.8)$$

Hierbei steht der Index 0 für den Ursprung des Koordinatensystems, Q für den Bezugspunkt, K für einen allgemeinen Punkt des Körpers und S für den Schwerpunkt des Körpers.

Der Drallsatz, welcher nun die zeitliche Änderung des Dralls beschreibt, wird allgemein wie folgt angeschrieben:

$$\frac{d}{dt}\vec{L}^Q + m \vec{r}_{QS} \times \vec{a}_Q = \vec{M}^Q \quad (2.9)$$

Die in Gleichung 2.8 und 2.9 vorkommenden Terme in denen  $\vec{r}_{QS}$  enthalten ist, werden zu null, wenn der Bezugspunkt Q und der Schwerpunkt S zusammenfallen. Auch in dieser Arbeit wird dieser Umstand genutzt. Die Formeln für den Drall und den Drallsatz vereinfachen sich dann zu [3]

$$\vec{L}^0 = \vec{L}^S + \vec{r}_{OS} \times \vec{p} \quad (2.10)$$

$$\frac{d}{dt}\vec{L}^S = \vec{M}^S \quad (2.11)$$

Mit Impuls- und Drallsatz können pro Plattform 6 Differentialgleichungen aufgestellt werden, 3 Impulssätze, je einer pro Koordinatenrichtung und 3 Drallsätze, je einer um jede Raumachse. Die 6 Gleichung jeder Plattform sind in einem lokalen Koordinatensystem

aufgestellt, wodurch es notwendig ist, diese mittels Drehmatrizen in ein gemeinsames, globales Koordinatensystem zu bringen, um das Gleichungssystem zu lösen.

### 2.2.2. Winkel und Drehmatrizen

Zur Drehung der relevanten Punkte (z.B. Verankerungspunkte der Verbindungselemente) ins globale Koordinatensystem werden Drehmatrizen mit Kardanwinkeln benutzt. Die Elementardrehungen erfolgen in der Reihenfolge x-y-z, stets bezogen auf die mitgedrehten Achsen.

Die Matrix für die Drehung um die x-Achse sieht wie folgt aus, wobei  $\alpha$  der Drehwinkel um die x-Achse ist:

$$A_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Die Drehmatrizen für die Elementardrehungen um die y und z Achse sind folgendermaßen definiert.

$$A_\beta = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$A_\gamma = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Hierbei ist  $\beta$  der Drehwinkel um die y-Achse und  $\gamma$  der Drehwinkel um die z-Achse. In Abbildung 2 sind die einzelnen Elementardrehungen eines Koordinatensystems dargestellt. In schwarz das Ausgangssystem, in Rot das um die x-Achse gedrehte, in grün das um x und y gedrehte und in blau das um alle Achsen gedrehte System.

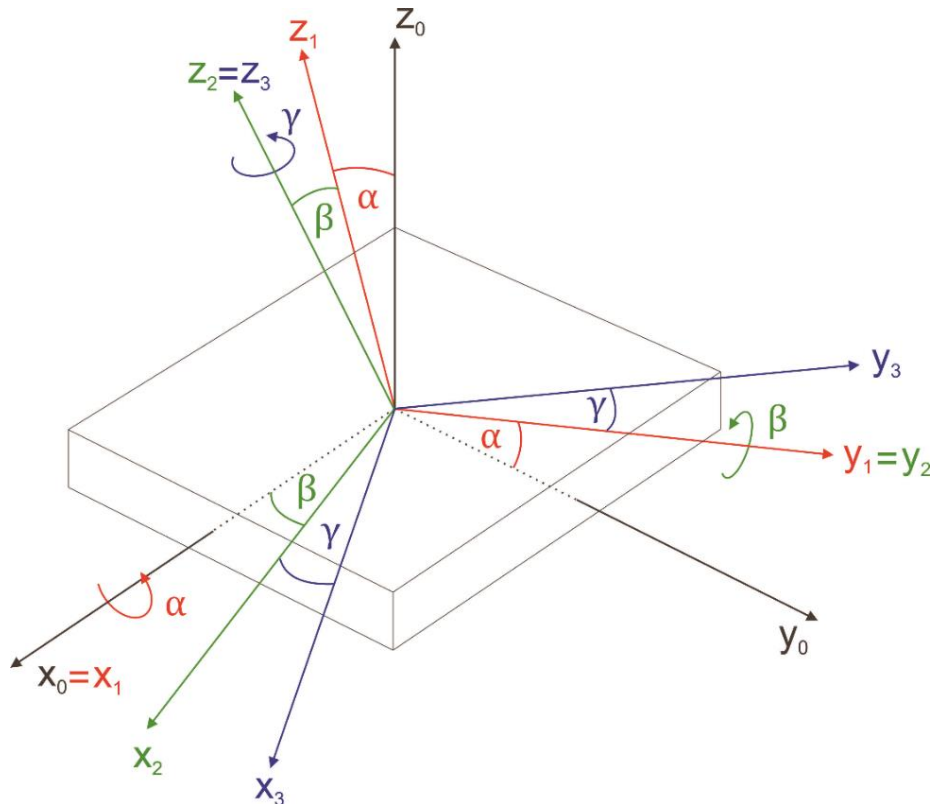


Abbildung 2: Darstellung aller 3 Elementardrehungen mit Kardanwinkeln eines Koordinatensystems. Der Index gibt die Anzahl der bereits durchgeführten Drehungen an.

Aus den drei Drehmatrizen der Elementardrehungen ergibt sich durch Multiplikation die gesamt Drehmatrix A. [3]

$$A = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Durch linksseitige Multiplikation der Matrix A mit dem Ortsvektor eines beliebigen Punktes der Plattform, wird dieser Vektor ins globale Koordinatensystem transformiert. Dies ist für die Aufstellung der Impuls- oder Drallsätze von Bedeutung, da sich dann alle Vektoren auf die gleiche Basis beziehen. In dieser Arbeit werden insbesondere die Ortsvektoren der Anknüpfungspunkte von Verbindungselementen benötigt. So lassen sich zu jedem Zeitpunkt die Länge der Verbindungselemente und durch

$$F = k \Delta x \quad (2.16)$$

auch die Kräfte, die das Verbindungselement ausübt, berechnen. Dabei ist k die Federsteifigkeit des Verbindungselements und  $\Delta x$  die aktuelle Längendifferenz des Elements zur Länge des entspannten Elements. Formel 2.16 gilt allerdings nur unter der Annahme linear elastischen Verhaltens des Verbindungselements.

### 2.2.3. Externe Kräfte

In diesem Abschnitt werden die Kräfte betrachtet, welche von außen auf das Gesamtsystem wirken und nicht über die Verbindungselemente übertragen werden.

Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Mehrkörpersystem treten zahlreiche externe Kräfte auf, welche allerdings nicht alle im gleichen Größenordnungsbereich liegen. Um die Komplexität der Simulation niedrig zu halten und dadurch eine hohe Rechengeschwindigkeit zu garantieren, werden ausschließlich die dominierenden Kräfte betrachtet. Diese sind die Auftriebskräfte und Kräfte, welche durch den Strömungswiderstand entstehen. Der Strömungswiderstand wird wie folgt berechnet

$$F_W = c_w A \frac{1}{2} \rho_w v^2 \quad (2.17)$$

Dabei ist  $c_w$  der Strömungswiderstandskoeffizient,  $\rho_w$  die Dichte von Wasser  $A$  die Fläche normal zur Anströmrichtung und  $v$  die Strömungsgeschwindigkeit.

Der Auftrieb  $B$  einer der Plattform ist definiert durch

$$B = A h \rho_w \quad (2.18)$$

wobei  $h$  die aktuelle Eintauchtief der Plattform ist. Zusätzlich zur Auftriebskraft in  $z$ -Richtung müssen aber auch die Momente  $MB_x$  und  $MB_y$  berechnet werden, welche entstehen, wenn die Plattform um die  $x$  oder  $y$ -Achse verdreht wird und der Auftrieb daher nicht mehr symmetrisch ist. Das Moment um die  $x$ -Achse lässt sich wie folgt berechnen:

$$MB_x = \frac{2}{3} l^4 \rho_w \tan \alpha \cos \alpha \quad (2.19)$$

Hier ist  $l$  die Kantenlänge der Plattform und  $\alpha$  der Drehwinkel der Plattform um die  $x$ -Achse. Das Moment um die  $y$ -Achse  $MB_y$  lässt sich aufgrund der Symmetrie identisch berechnen. Statt dem Winkel  $\alpha$  wird in dem Fall allerdings  $\beta$  benutzt.

Um die Kräfte zu berücksichtigen, welche durch den Wellengang auf die Plattformen wirken, werden 16 gleichmäßig auf der Plattform verteilte Punkte festgelegt. In diesen werden Kräfte berechnet, welche den hinzukommenden oder wegfallenden Auftrieb durch eine sinusförmige Welle berücksichtigen. Dazu wird die Theorie für lineare Wellen verwendet, welche eine gute Näherung darstellt, solange das Verhältnis zwischen Wellenhöhe und Wellenlänge kleiner als  $1/50$  ist. Mit der für die Simulation gewünschten Wellenhöhe und Wellenlänge kann dann mittels Formel 2.20 die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  und mit Formel 2.21 die Kreisfrequenz  $\omega$  der Wellen berechnet werden.

$$c = \sqrt{\frac{\lambda g}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi t_w}{\lambda}\right)} \quad (2.20)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi t_w}{\lambda}\right)} \quad (2.21)$$

Hierbei ist  $\lambda$  die Wellenlänge und  $t_w$  die Wassertiefe an der betrachteten Stelle.



Mit Formel 2.22 wird schließlich die Kraft  $W$ , welche durch die Welle entsteht und auf den betrachteten Punkt wirkt, bestimmt.

$$W = (H \sin(\omega (t - t_0)) - z) \frac{A}{16} \rho_w g \quad (2.22)$$

mit

$$t_0 = a/c \quad (2.23)$$

Die Amplitude der Welle wird mit  $H$  bezeichnet,  $z$  ist die  $z$ -Koordinate des betrachteten Punktes,  $A$  die Fläche der Plattform und  $a$  der Abstand des betrachteten Punktes zum Ursprung. Die Gleichung ist für jeden Punkt identisch lediglich der Parameter  $a$  unterscheidet sich, da er die Lage des Punktes relativ zur Welle beschreibt. [6]

Die hier beschriebene Methode zur Berücksichtigung der Wellenkräfte, stellt eine Vereinfachung dar, bei der sowohl die Reflexion als auch die Diffraktion der Wellen vernachlässigt wird. Des Weiteren werden nichtlineare Kräfte, welche durch Wirbel und andere Effekte auftreten ebenfalls nicht berücksichtigt.

Reflexion bezeichnet hier das Zurückwerfen eines Teils einer Welle an einem Hindernis im Wasser. Unter Diffraktion versteht man die Beugung von Wellenfronten an den Kantenenden von sich im Wasser befindlichen Strukturen. [6]

Die hier beschriebenen Vereinfachungen führen zwar zu ungenaueren Ergebnissen, sind aber sinnvoll, da kurze Berechnungszeiten in der Konzeptionierungsphase von großer Bedeutung sind, da sehr viele unterschiedliche Systemkonfigurationen untersucht werden und daher viele Simulationen durchgeführt werden.

### **3. Konzepte für Verbindungselemente**

#### **3.1. Anforderungen und Grundsätzliche Überlegungen**

Der Ausgangspunkt für die Konzepterstellung ist die Formulierung der Anforderungen an die Verbindungselemente. Diese werden in zwingende und wünschenswerte Anforderungen unterteilt. Die zwingenden Kriterien müssen bis zu einem gewissen Grad von allen Konzepten erfüllt werden, um für eine detaillierte Betrachtung infrage zu kommen. Sofern die Mindestanforderungen erfüllt werden, sind die Kriterien nicht grundsätzlich wichtiger als die wünschenswerten Anforderungen. Konzepte, welche ein oder mehrere der folgenden fünf zwingenden Kriterien gar nicht erfüllen können, wurden bereits vor der Expertenbewertung verworfen.

Die fünf zwingenden Kriterien lauten:

1. Abstand zwischen den Elementen in definierten Grenzen halten
2. Ausreichende Nachgiebigkeit, um zu hohe Zwangskräfte zu vermeiden
3. Standhalten der größten auftretenden Kräfte
4. Geringe Stoßbelastung auf Elemente ausüben
5. Ausreichende Zeitfestigkeit in korrosiver Umgebung

Kriterium 1 „Abstand zwischen den Elementen in definierten Grenzen halten“ ist für alle Anwendungsmöglichkeiten der Plattformen von großer Bedeutung, da für Menschen und/oder Fahrzeuge stets die Möglichkeit bestehen muss, von einer Plattform auf eine andere zu kommen. Je größer der Abstand zwischen den Plattformen ist, beziehungsweise je schneller sich dieser verändert, desto schwieriger ist es, gute Konzepte für Verbindungsbrücken zu entwickeln.

Kriterium 2 „Ausreichende Nachgiebigkeit, um zu hohe Zwangskräfte zu vermeiden“, ist vor allem im Zusammenhang mit den mechanischen Belastungen zu betrachten. Da die Plattformen eine Kantenlänge von 45 m aufweisen und damit je nach Kraftangriffspunkt auch Hebelarme mit bis zu 45 m Kantenlänge für die Biegebelastungen relevant sind, werden die Biegemomente auch bei relativ kleinen Kräften schon sehr groß. Daher sind komplett biegesteife Verbindungselemente kaum umsetzbar und folglich zwangsweise vorhandene Freiheitsgrade in den Verbindungselementen notwendig.

Kriterium 3 „Standhalten der größten auftretenden Kräfte“ ist als Kriterium für die Verbindungselemente offensichtlich notwendig, um einen sicheren Betrieb des Plattformsystems zu garantieren. Es ist allerdings schwierig festzustellen zu welchem Zeitpunkt und an welcher Position die größten Belastungen in den Verbindungselementen auftreten. Einerseits ist es möglich, dass diese beim stärksten Seegang, also beim stärksten zu erwartenden Sturm im betrachteten Gewässer auftreten. Andererseits sind eine Vielzahl von verbundenen Plattformen ein äußerst komplexes Mehrkörpersystem welches zahlreiche Eigenfrequenzen hat. Diese können dazu führen, dass die maximale Belastung der Verbindungselemente nicht unbedingt beim stärksten Seegang auftritt. Wann dieser Resonanzfall, auftritt hängt von der Anzahl der Elemente, deren Anordnung, der Wellenhöhe und der Wellenfrequenz abhängig.

Kriterium 4 „Geringe Stoßbelastung auf Elemente ausüben“ ist sowohl relevant, um die Struktur der Plattform nicht zu stark zu belasten, als auch um die Aufbauten auf den Plattformen nicht zu überbeanspruchen. Besonders hohe, beziehungsweise sehr schwere,

Aufbauten, wie Windturbinen oder auch hoch aufgestapelte Frachtcontainer, stellen bei stoßartiger Belastung das größte Problem dar, da die Kräfte auf die Verbindung zwischen Aufbau und Plattform (z.B. Halterungen für Container) in diesem Fall am größten sind.

Kriterium 5 „Ausreichende Zeitfestigkeit in korrosiver Umgebung“ ist als einziges der 5 zwingenden Kriterien unabhängig von den anderen. Welche Zeitspanne hier als ausreichend anzusehen ist, wird hauptsächlich in einem ökonomischen Kontext betrachtet, da bei einer gewünschten Mindestlebensdauer des Gesamtsystems von 50 Jahren davon auszugehen ist, dass die Verbindungselemente mehrmals ersetzt werden müssen. Natürlich ist eine möglichst lange Lebensdauer der Verbindungselemente anzustreben, allerdings ist es bei einem sehr günstigen Element nicht so kritisch, wenn sie öfter ersetzt werden muss.

Da die Anregung des Gesamtsystems durch den Seegang von außen aufgeprägt ist und nicht beeinflusst werden kann, stehen die Kriterien 1-4 teilweise im Widerspruch zueinander. Der Wunsch nach einem möglichst kleinen und konstanten Abstand zwischen den Plattformen ist beispielsweise nicht vollständig mit den Kriterien 2 und 4 vereinbar, da um diese zu erfüllen, Relativbewegungen zwischen den Plattformen erforderlich sind. Außerdem werden die auftretenden Kräfte mit zunehmend eingeschränkter Relativbewegung größer, was wiederum Kriterium 3 betrifft.

Um realisierbare Konzepte zu erstellen, gilt es daher einen Kompromiss zwischen den Anforderungen zu finden, der technische Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit berücksichtigt.

In die Bewertung der Konzepte werden, wie bereits eingangs erwähnt, 4 weitere Kriterien einbezogen.

Diese sind:

1. Schwingungen dämpfen
2. Verwendung von Normteilen
3. Geringer Wartungsaufwand
4. Einfache Montage

Punkt 1 „Schwingungen dämpfen“ ist nur als wünschenswertes Kriterium angeführt, da das Gesamtsystem aufgrund des Strömungswiderstands ohnehin immer gedämpft ist. Daher ist der Dämpfungsgrad bei den Verbindungselementen auch nur dann relevant, wenn die Größenordnung der Dämpfung vergleichbar mit der Größenordnung der Dämpfung durch den Strömungswiderstand ist.

Das Kriterium „Verwendung von Normteilen“ basiert auf dem ökonomischen Grundgedanken, dass durch das Normteileprinzip eine Kostenreduktion ermöglicht wird.

Geringer Wartungsaufwand senkt die Betriebskosten des Systems und ist daher aus ökonomischer Sicht ein wichtiges Kriterium.

Eine einfache Montage der Verbindungselemente senkt die Baukosten, ist aber auch bis zu einem gewissen Grad technisch erforderlich, da für eine Offshore Montage aufgrund der schwierigen äußeren Bedingungen Montagehilfen erforderlich sein werden.

### 3.2. Ausarbeitung der Konzepte

Nach der Definition der Anforderungen und Festlegung der einsetzbaren Bauteile werden durch Kombination der unterschiedlichen Bauteile möglichst viele verschiedene Konzepte erstellt. Danach wird untersucht, ob die erstellten Konzepte die zwingenden Anforderungen erfüllen können, beziehungsweise unter welchen Umständen nicht.

Bei dieser Analyse stach das Problem des Ausweichens von in einer Linie angeordneten Verbindungselementen mit Gelenken an beiden Enden hervor. Dabei weichen die Verbindungselemente in eine Richtung aus, wodurch keine rückstellenden Kräfte, welche die Kollision der Plattformen verhindern sollten, auftreten. Wie in Abbildung 3 dargestellt, kann das Problem in zwei verschiedenen Formen auftreten. Durchgeführte Mehrkörpersimulationen mit nebeneinander angeordneten Verbindungselementen haben ergeben, dass das Ausweichproblem in der x-z Ebene bei großen Abständen zwischen den Plattformen oder niedrigen Wellen nicht auftritt. In der x-y Ebene (Ebene parallel zur Wasseroberfläche) hingegen kommt es bei nahezu jedem Seegang und unabhängig vom Plattformabstand zu diesem Problem. Daher wurden alle Konzepte welche, für die Problematik des Ausweichens der Verbindungselemente bei Druckbelastung keine Lösung haben, verworfen.

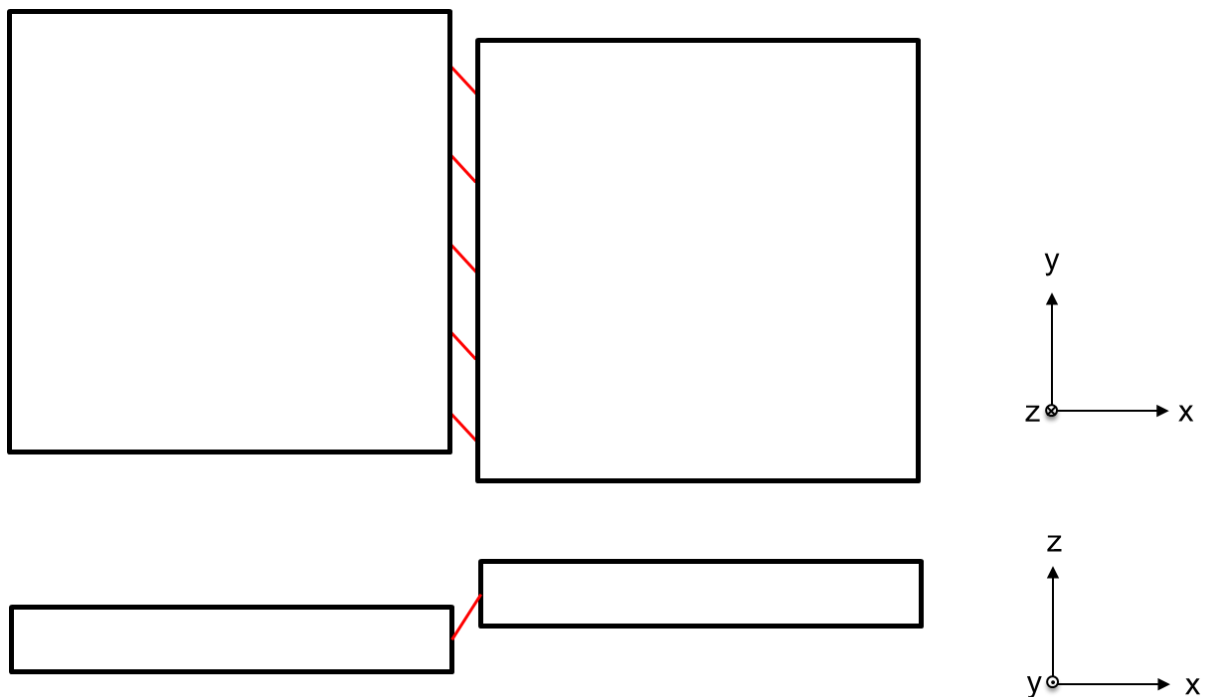


Abbildung 3: Visualisierung des Problems des Ausweichens bei Druckbelastung

Die sechs nachfolgend beschriebenen Konzepte erfüllen alle im Kapitel „Anforderungen und Grundsätzliche Überlegungen“ beschriebenen zwingenden Anforderungen. Daher wurde entschieden, diese 6 Konzepte von einer Expertenrunde bewerten zu lassen.

### 3.2.1. Konzept 1: Seile und Fender

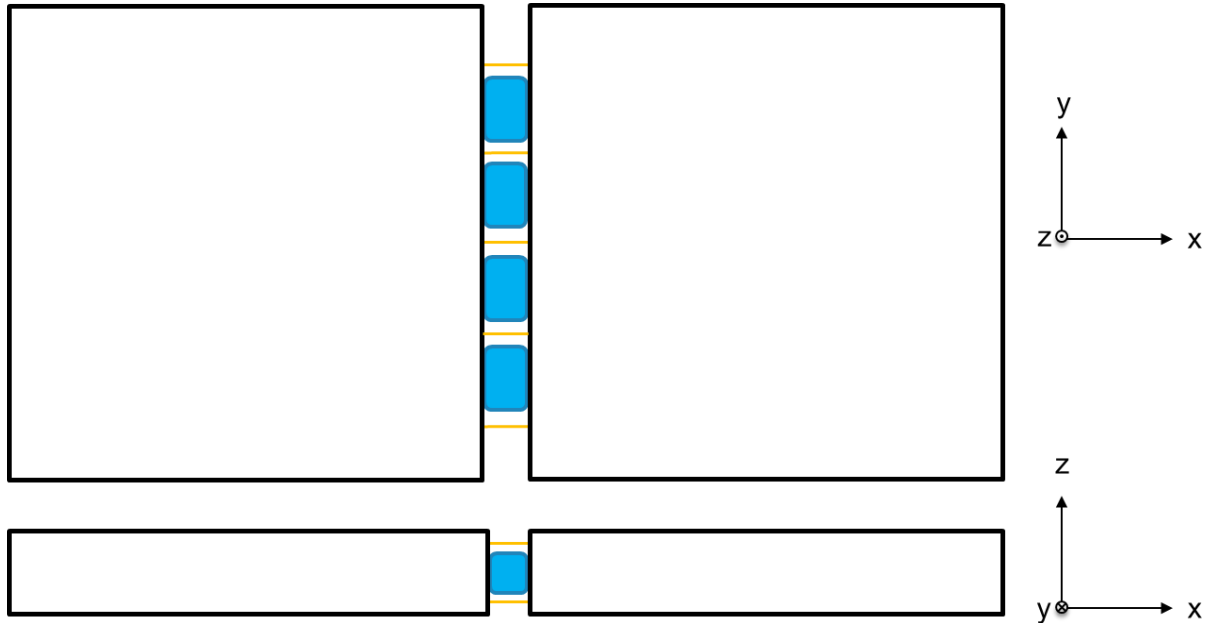


Abbildung 4: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit Seilen und Fendern. Seile sind in Gelb visualisiert und Fender in Blau.

Das Konzept „Seile und Fender“, welches in Abbildung 4 dargestellt ist, greift das Konzept mit dem Schiffe mit Kaimauern in Häfen verbunden werden auf und überträgt es auf die Verbindung der Plattformen. Die Übertragung der Zugkräfte wird von mehreren Seilen, welche in zwei unterschiedlichen Ebenen angeordnet sind, übernommen. Die Druckkräfte werden durch Fender übertragen. Diese können als pneumatische oder aber auch als Elastomer-Fender ausgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass Elastomer-Fender nur für kleine Spaltbreiten verfügbar sind und dass diese über eine fixe Feder- und Dämpferkonstante verfügen, wohingegen diese Konstanten beim pneumatischen Fender durch Änderung des Innendrucks verändert werden können.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile des „Seile und Fender“ Konzeptes

Vorteile	Nachteile
Technisch einfache Lösung die aus der Schifffahrt bekannt und bewährt ist	Bei Zugbelastungen kann es, je nach Beschaffenheit des Seils, zu stoßartigen Belastungen kommen
Bei reinem Winkelversatz der benachbarten Plattformen werden keine Kräfte übertragen	Schlechter Dämpfungsgrad bei Zugbelastung
Durch Vorspannung der Seile kann das Verhalten der Verbindung einfach beeinflusst werden	Beschränkte Lebensdauer der Fender
Günstige Lösung da ausschließlich Serienprodukte benötigt werden	
Gute Dämpfung bei Druckbelastung	

### 3.2.2. Konzept 2: Federnd gelagerte Seile mit Fendern

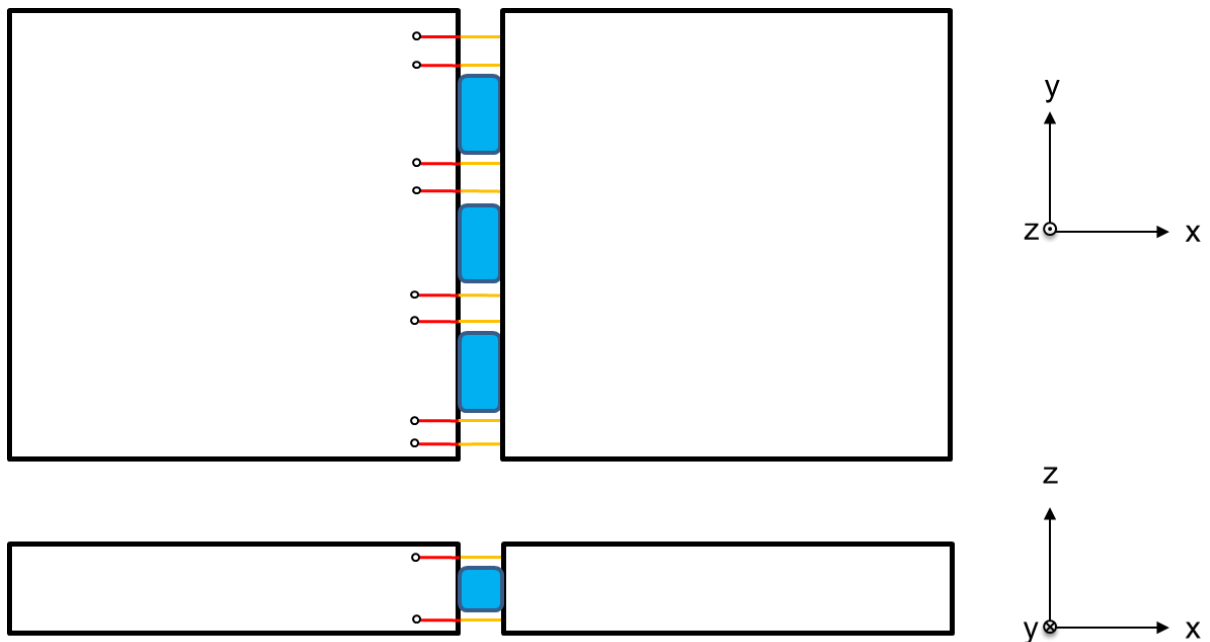


Abbildung 5: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit federnd gelagerten Seilen und Fendern. Seile sind in Gelb visualisiert, Fender in Blau und Feder-Dämpfer-Elemente in Rot.

Das Konzept „Federnd gelagerte Seile mit Fendern“ versucht mittels Kombination der Seile mit Feder-Dämpfer Elementen die Probleme des Konzeptes „Seile und Fender“ zu beheben, welches ausschließlich Seile zur Zugkraftübertragung benutzt. Dazu sollen die Seile, wie in Abbildung 5 dargestellt, nicht direkt mit der Plattform verbunden, sondern an Feder-Dämpfer Elementen aufgehängt werden, welche wiederum über Gelenke mit den Plattformen verbunden werden. Die Feder-Dämpfer Elemente sollen bei Zugbelastung einerseits für Dämpfung sorgen und andererseits Stöße abfedern und so die Belastungen auf die Plattformen und deren Aufbauten reduzieren. Diese verbesserten Eigenschaften sind allerdings mit deutlich größerem technischem und damit auch finanziellem Aufwand verbunden. Die größte Herausforderung stellt dabei das Feder-Dämpfer Element dar, da es in der geforderten Größe nicht in als Serienbauteil erhältlich ist.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit federnd gelagerten Seilen und Fendern

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
Gute Dämpfung bei Zug und bei Druckbelastung	Beschränkte Lebensdauer der Fender
Bei reinem Winkelversatz der benachbarten Plattformen werden keine Kräfte übertragen	Es gibt keine Serienprodukte für den nötigen Kraftbereich der Feder-Dämpfer Elemente, daher teuer
Durch Vorspannung der Seile kann das Verhalten der Verbindung einfach beeinflusst werden	

### 3.2.3. Konzept 3: Feder-Dämpfer Elemente in X-Anordnung

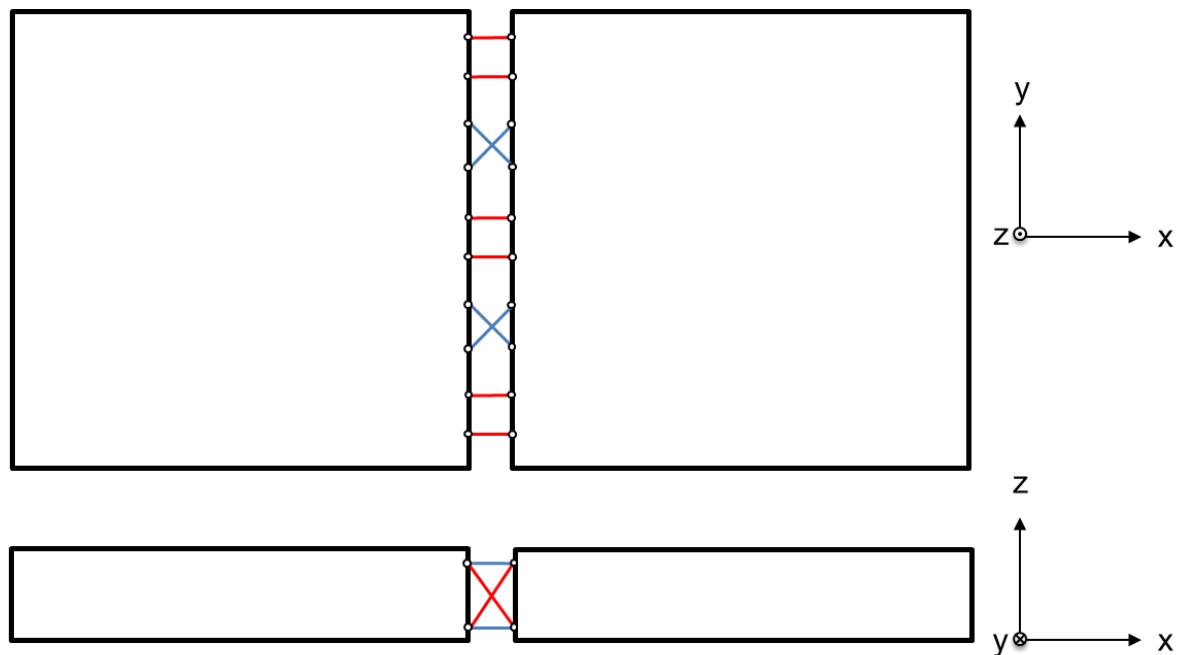


Abbildung 6: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit X-förmig angeordneten Feder-Dämpfer Elementen. Feder-Dämpfer-Elemente in vertikaler X-Anordnung sind in Rot visualisiert und Feder-Dämpfer-Elemente in horizontaler X-Anordnung in Blau.

Dieses Konzept, wie in Abbildung 6 dargestellt, benutzt ausschließlich Feder-Dämpfer Elemente und umgeht das in Kapitel 3.1 beschriebene Problem des Ausweichens bei Druckkräften durch die X-Anordnung der Elemente. Dabei wirkt jeder Bewegung der Plattformen eine entsprechende Kraft entgegen und eine ausreichend hoch gewählte Federsteifigkeit führt dazu, dass die Plattformen nie kollidieren. Bei diesem Konzept üben die Verbindungselemente, bei reinem Winkelversatz von zwei benachbarten Elementen, Kräfte auf die Plattformen aus, welche dem Winkelversatz entgegenwirken. Dadurch ist die Gesamtbelastung der Verbindungselemente höher und sie müssen größer dimensioniert werden.

Tabelle 3: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen in X-Anordnung

Vorteile	Nachteile
Gute Dämpfungseigenschaften bei jeder Belastung	Es gibt keine Serienprodukte für den nötigen Kraftbereich der Feder-Dämpfer Elemente, daher teuer
Abstand zwischen den Elementen kann in engen Grenzen gehalten werden	Reiner Winkelversatz führt zu Kräften im benachbarten Element
	Schwer gegen Korrosion zu schützen



### 3.2.4. Konzept 4: Feder-Dämpfer Elemente mit Fendern

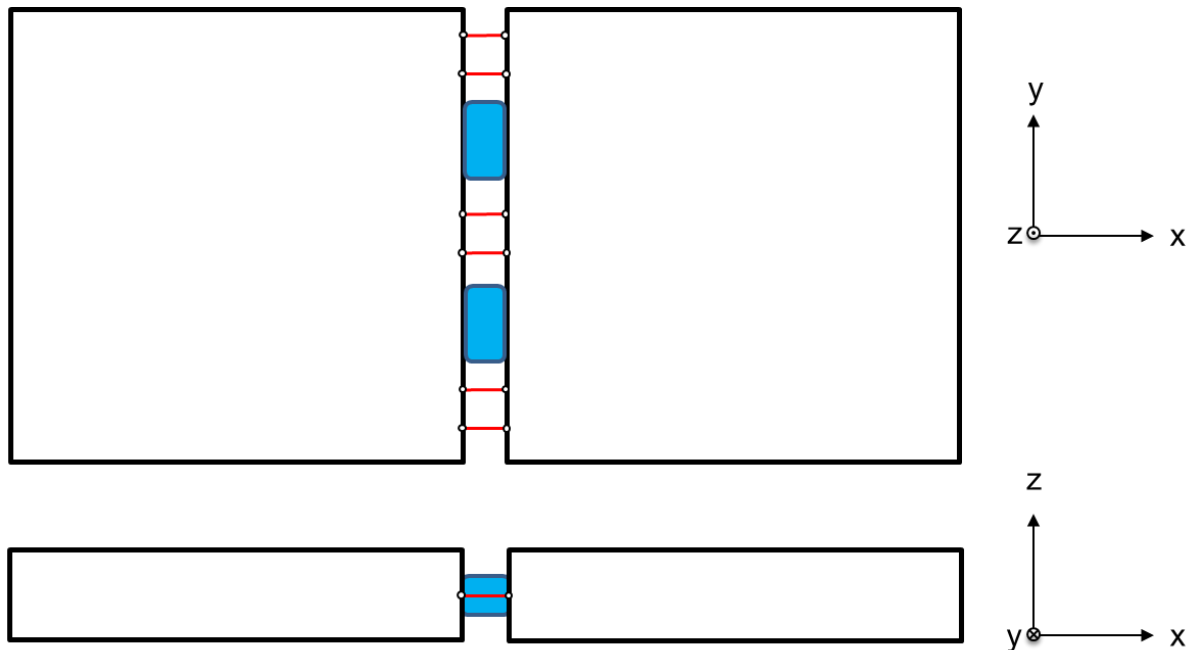


Abbildung 7: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen und Fendern. Feder-Dämpfer-Elemente sind in Rot visualisiert und Fender in Blau.

Bei diesem Verbindungskonzept werden im Gegensatz zu Konzept 3 die Feder-Dämpfer-Elemente, wie in Abbildung 7 dargestellt, nebeneinander angeordnet, wodurch ein Ausweichen der Elemente bei Druckbelastung möglich ist. Um trotzdem eine Kollision in jedem Fall auszuschließen, werden zusätzlich Fender eingesetzt. Dadurch wird bei Druckbelastung, je nach Winkellage der Feder-Dämpfer Elemente, die Belastung zwischen Fendern und Feder-Dämpfer Elementen aufgeteilt. Zugbelastungen werden von den Feder-Dämpfer Elementen aufgenommen.

Tabelle 4: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen und Fendern

Vorteile	Nachteile
Bei reinem Winkelversatz werden keine Kräfte übertragen	Es gibt keine Serienprodukte für den nötigen Kraftbereich der Feder-Dämpfer Elemente, daher teuer
Gute Dämpfungseigenschaften bei jeder Belastung	Schwer gegen Korrosion zu schützen
	Beschränkte Lebensdauer der Fender

### 3.2.5. Konzept 5: Feder-Dämpfer Elemente mit Drehfedern

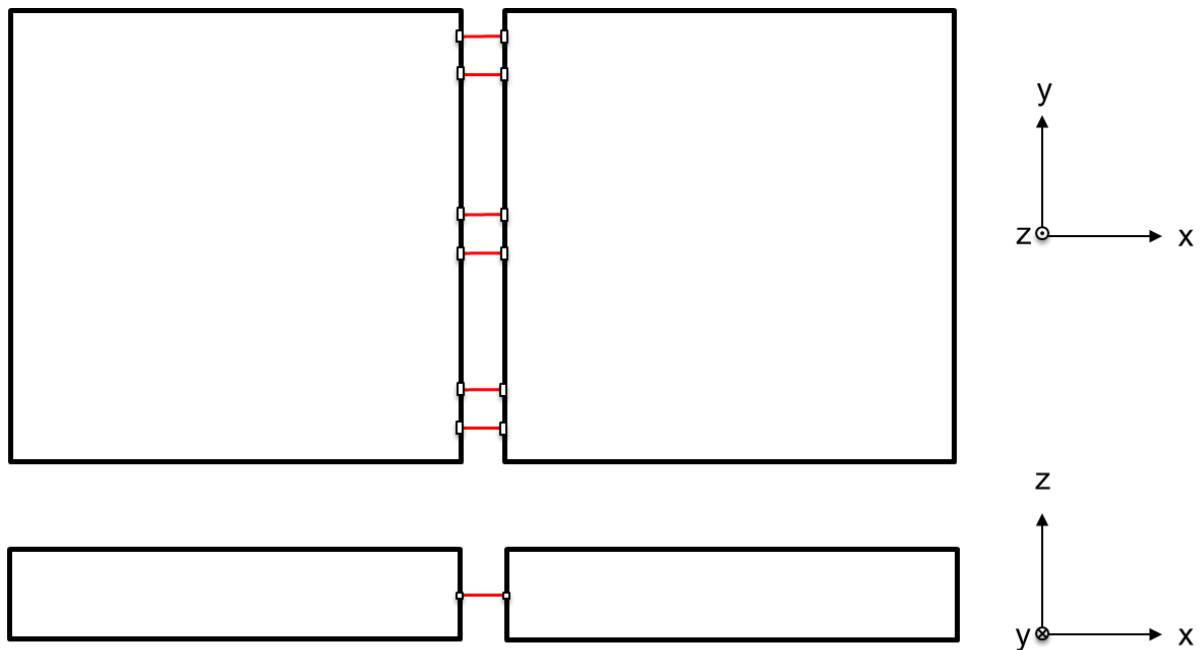


Abbildung 8: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen und Drehfedern. Feder-Dämpfer-Elemente sind in Rot visualisiert.

Dieses Konzept benutzt Drehgelenke, welche die Drehfreiheit um die z-Achse komplett einschränken daher einen Freiheitsgrad weniger zulassen als Konzepte 1-4. Dies führt dazu, dass Drehfedern und Drehdämpfer, welche in den Gelenken verbaut werden und der Drehung um die y-Achse Kräfte entgegensetzen, ausreichend sind um Kollisionen auszuschließen. Abbildung 8 stellt dies schematisch dar. Problematisch ist, dass das Einschränken dieses Freiheitsgrades zu großen Kräften in den Gelenken führen kann, welche dadurch groß dimensioniert werden müssen. Außerdem werden für dieses Konzept sowohl Feder-Dämpfer Elemente als auch Drehfedern und Drehdämpfer benötigt, welche alle im geforderten Kräftebereich nicht serienmäßig verfügbar sind.

Tabelle 5: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen und Drehfedern

Vorteile	Nachteile
Die eingeschränkte Bewegung der Plattformen macht Brückenkonzepte einfacher	Es gibt keine Serienprodukte für den nötigen Kraftbereich der Feder-Dämpfer Elemente, der Drehfedern und Drehdämpfer, daher sehr teuer
Gute Dämpfungseigenschaften	Die Gelenke müssen aufgrund des eingeschränkten Freiheitsgrades große Kräfte aufnehmen
	Schwer gegen Korrosion zu schützen

### 3.2.6. Konzept 6: Starre Verbindung mit Drehfedern

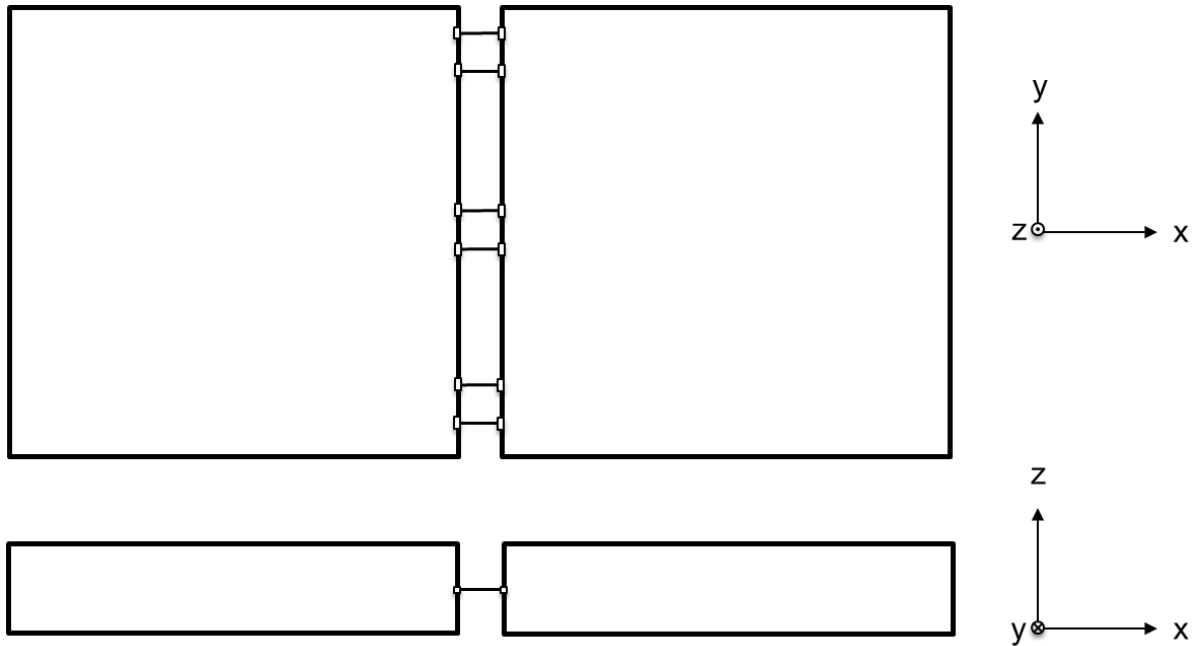


Abbildung 9: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit starren Elementen und Drehfedern. Die starren Verbindungselemente sind als schwarze Striche dargestellt.

Konzept 6: Starre Verbindung mit Drehfedern (darstellt in Abbildung 9) ist ähnlich wie Konzept 5. Es unterscheidet sich dadurch, dass statt den Feder-Dämpfer Elementen eine starre Verbindung zwischen den Drehgelenken verbaut wird. Dadurch fällt ein technisch komplexes Bauteil weg, dies ist allerdings mit dem Nachteil verbunden, dass die Verbindungselemente bei reiner Zug- oder Druckbelastung Stöße übertragen.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit starren Elementen und Drehfedern

Vorteile	Nachteile
Die eingeschränkte Bewegung der Plattformen macht Brückenkonzepte einfacher	Es gibt keine Serienprodukte für den nötigen Kraftbereich der Drehfedern und Drehdämpfer, daher teuer
	Die Gelenke müssen aufgrund des eingeschränkten Freiheitsgrades große Kräfte aufnehmen
	Bei reiner Zug- oder Druckbelastung kann es, kann es zu stoßartigen Belastungen kommen

### **3.3. Bewertung der Konzepte**

Das Verfahren welches für die Bewertung der in Kapitel 3.2 beschriebenen Konzepte herangezogen wurde ist an „VDI 2220 Produktplanung; Ablauf, Begriffe und Organisation“ angelehnt. Es bezieht sich auf die in der VDI 2220 beschriebene Vorgehensweise für eine Grobbewertung auf der Basis der Erfahrungswerte der Teilnehmer. Das für diese Arbeit angewendete Bewertungsverfahren orientiert sich allerdings nur grob an der Richtlinie, da die VDI 2220 für die Bewertung von Produktideen gedacht ist und daher einige Punkte hier nicht anwendbar sind. Die Bewertung wurde wie in der VDI vorgeschlagen ohne Einführung von Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Kriterien durchgeführt. [7]

Die Bewertung wurde von einer Expertenrunde, bestehend aus 5 Personen, durchgeführt. Alle Teilnehmer haben eine akademische Ausbildung, welche mit dem Diplomingenieur in Maschinenbau betitelt wird, und befinden sich gerade im Doktorratsstudium, beziehungsweise haben bereits die tertiäre Ausbildungsstufe abgeschlossen.

Den Teilnehmern wurden die 6 Konzepte neutral, also ohne Fokussierung auf die Vor- und Nachteile, präsentiert, um eine möglichst unbefangene Bewertung zu erhalten. Nach der Präsentation haben alle Teilnehmer einen Fragebogen mit den in Kapitel 3.1 vorgestellten Kriterien erhalten und haben nach dem Schulnotensystem bewertet, wie gut die Anforderungen vom jeweiligen Konzept erfüllt werden. Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse dieser Bewertung, wobei hier bereits der Durchschnittswert aus den 5 einzelnen Bewertungen angegeben ist.

Tabelle 7: Ergebnistabelle der Expertenbewertung nach Schulnotensystem

	<b>Konzept 1</b>	<b>Konzept 2</b>	<b>Konzept 3</b>	<b>Konzept 4</b>	<b>Konzept 5</b>	<b>Konzept 6</b>
Abstand zwischen den Elementen in definierten Grenzen halten	1,8	2	2	1,8	2	1,4
Ausreichend Freiheitsgrade um zu hohe Zwangskräfte zu vermeiden	2,4	1,6	2	2	2,8	3,4
Standhalten der größten auftretenden Kräfte	2,2	1,8	2,4	3,2	3,4	4
Geringe Stoßbelastung auf Elemente ausüben	2,5	2,4	2	2,3	2,2	4
Ausreichende Zeitfestigkeit in korrosiver Umgebung	1,6	3,2	3,8	3	3,6	3
Schwingungen dämpfen	2	2	2,6	2	3	4,4
Verwendung von Normteilen	1,6	2,8	4,2	3	3,8	2,4
Geringer Wartungsaufwand	2,2	3	3,8	3,2	3,2	2
Einfache Montage	2,2	3	3,6	3	3,6	2,6
Gesamtnote	2,056	2,422	2,933	2,611	3,067	3,022

### **3.4. Ausgewähltes Konzept**

Bei der Expertenbefragung hat Konzept 1: Seile und Fender mit recht deutlichem Abstand die beste Durchschnittsbewertung erhalten. Das Ergebnis wird auch dadurch bestätigt, dass Konzept 2, welches eine leicht abgewandelte Form von Konzept 1 ist am zweitbesten abgeschnitten hat.

Daher wird Konzept 1 nun mittels Mehrkörpersimulation genauer untersucht. Dabei wird berechnet, wie sich das Gesamtsystem verhält. Es werden die maximal auftretenden Kräfte in den Verbindungselementen und die Relativbewegungen zwischen den Plattformen bestimmt. Die Simulation wird mit unterschiedlicher Anregung und mit unterschiedlichen

Werten für relevante Parameter wie der Federsteifigkeit der Seile oder auch des Plattformabstandes durchgeführt.

Abbildung 10 zeigt beispielhaft das ausgeführte Konzept an vier Plattformen. In der Simulation wie auch im eigentlichen Projekt werden allerdings mehr Plattformen zu einem Gesamtsystem verbunden.

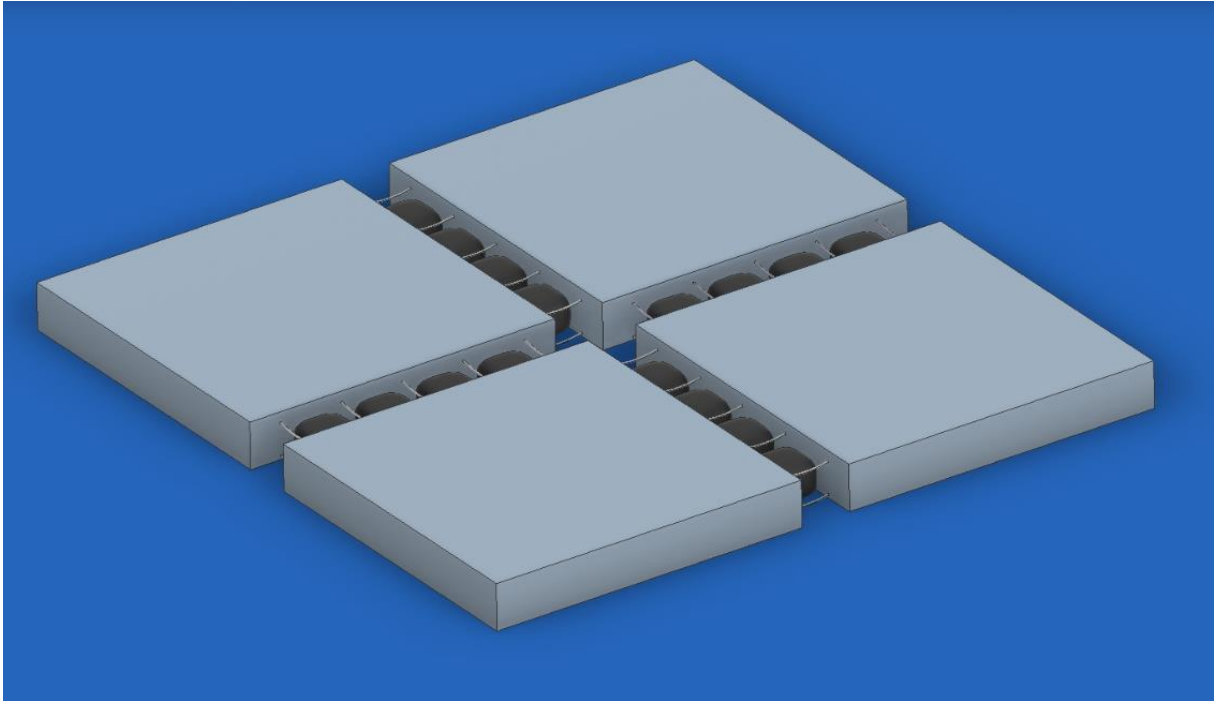


Abbildung 10: Visualisierung vom Verbindungskonzept mit Seilen und Federn beispielhaft dargestellt an vier verbundenen Plattformen

## 4. Simulation des Konzeptes

### 4.1. Aufbau der Simulation

Wie in Kapitel 2 beschrieben basiert die Simulation auf der Methode nach Newton-Euler und wird mit dem Programm „Matlab“ durchgeführt. Die zentralen Elemente sind daher die Kräfte und Momentengleichgewichte der Plattformen. Durch numerische Integration der Gleichgewichte kann die Veränderung der Schwerpunktkoordinate und die Ausrichtung aller Plattformen berechnet werden. Die, für die Gleichgewichtsbedingungen benötigten, Kräfte und Momente werden in separaten „Matlab“ Funktionen bestimmt.

Die Kräfte, die die Verbindungselemente auf die Plattformen ausüben, werden berechnet, indem die Abstände der jeweiligen Anknüpfungspunkte, sowie die Veränderungsrate dieser Abstände, in jedem Zeitschritt bestimmt werden. Durch Multiplikation mit Feder- und Dämpfungskonstanten können daraus die Kräfte, beziehungsweise bei Multiplikation mit den entsprechenden Hebelarmen auch die Momente, bestimmt werden.

Für diese Berechnungen ist es notwendig die Lage und die Geschwindigkeit aller Anknüpfungspunkte in einem globalen Koordinatensystem zu kennen. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, müssen, um diese zu ermitteln, die Vektoren der Anknüpfungspunkte im lokalen Plattformkoordinatensystem aufgestellt und anschließend durch Multiplikation mit Drehmatrizen ins globale Koordinatensystem gedreht werden. Diese Transformation wird mithilfe der Software „Wolfram Mathematica 11“ durchgeführt und die Ortsvektoren der Anknüpfungspunkte und deren Geschwindigkeitsvektoren im globalen Koordinatensystem werden in einer „Matlab“ Funktion gespeichert.

Auf dieselbe Weise werden die Abstände der Anknüpfungspunkte zum jeweiligen Schwerpunkt der Plattform bestimmt und in globalen Koordinaten in einer „Matlab“ Funktion gespeichert. Mit dieser Funktion können die Hebelarme, welche für das Aufstellen der Momentengleichgewichte notwendig sind, bestimmt werden.

Da bei dem ausgewählten Konzept Seile und Fender als Verbindungselemente zum Einsatz kommen, wird mithilfe von if-Abfragen überprüft, ob der aktuelle Abstand der Anknüpfungspunkte dazu führt das Seile auf Druck oder Fender auf Zug belastet würden. Ist das der Fall wird die entsprechende Kraft auf null gesetzt.

Die Auftriebskraft und die dadurch auftretenden Momente, der Strömungswiderstand der Plattformen sowie die Kräfte, welche durch die einfallenden Wellen entstehen, werden für jeden Zeitschritt berechnet. Dazu werden die in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Formeln verwendet.

Die Ausgabe der Simulation erfolgt durch Graphen, welche den Verlauf des Schwerpunktes beziehungsweise der einzelnen Drehwinkel über der Zeit auftragen. Weiters wird ein Video erstellt, welches die Bewegungen der Plattformen darstellt.

Den wichtigsten Output stellen allerdings die Werte der maximal auftretenden Kräfte in den Verbindungselementen dar, da so die Umsetzbarkeit des Konzepts überprüft werden kann. Diese Kräfte werden, obwohl sie bereits während der eigentlichen Lösung der Differentialgleichungen berechnet werden müssen, nachfolgend erneut bestimmt. Das ist notwendig, da die in „Matlab“ integrierten Löser für Differentialgleichungen adaptive Schrittweiten benutzen, welche große Zeitschritte anwenden, um die Änderungsrate der Systemgrößen zu bestimmen. Ist die Änderungsrate zu groß, wird anschließend, vom gleichen Ausgangspunkt, aber mit einem kleineren Zeitschritt, erneut die Änderungsrate des Systems berechnet. Dies wird solange wiederholt, bis die Änderungsrate innerhalb

einer gewissen Toleranz liegt. Wenn die maximalen Kräfte also bereits während der Integration ermittelt werden, sind diese aufgrund dieser Testschritte fälschlicherweise viel zu groß.

Der Verlauf der Abstände der Plattformen, beziehungsweise deren Maximum, wird ebenfalls nach beendeter Integration bestimmt. Der vertikale Abstand ist von besonderem Interesse, da dieser für Brückenkonstruktionen zwischen den Plattformen besonders relevant ist.

## 4.2. Simulation des ausgewählten Konzeptes

### 4.2.1. Eingabeparameter der Simulation des Ausgangsentwurfs

Für die erste Simulation wird, wie in Abbildung 11 dargestellt, ein System von Plattformen in einer fünf mal fünf Anordnung verwendet. Diese Anordnung wurde gewählt, da eine quadratische Anordnung bei den meisten Anwendungsszenarien des Space@Sea Projektes bevorzugt wird. Die Entscheidung für die Größe von fünf mal fünf ermöglicht einerseits kurze Rechenzeiten der Simulation, andererseits ist die Größe ausreichend um relevante Wechselwirkungen zwischen den Plattformen abzubilden.

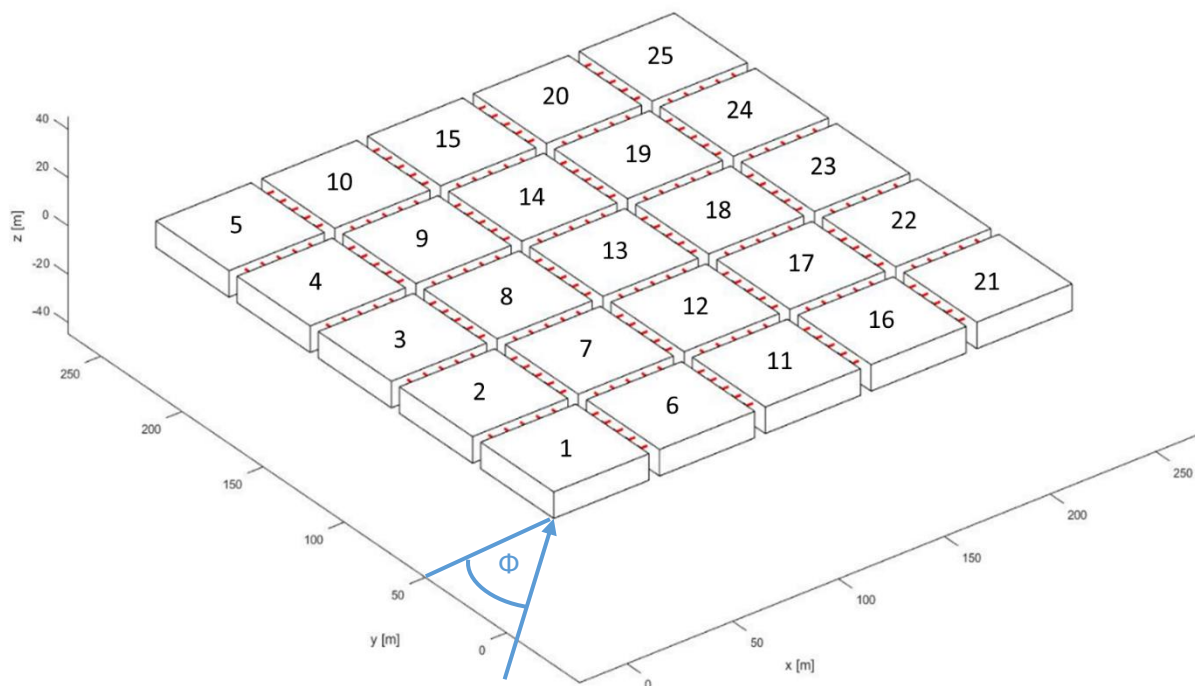


Abbildung 11: Darstellung der in Simulation verwendete Anordnung der Plattformen, mit Nummerierung der Plattformen und Wellenströmungsrichtung (blauer Pfeil mit Winkel  $\Phi$ ). In Rot sind die Plattformen verbindende Seile abgebildet.

Die Dimensionen der Plattformen entsprechen mit 45 m x 45 m x 11 m und einer Masse von 6427 t den Vorgaben des Space@Sea Projektes. Der Abstand zwischen den Plattformen wird für diese Simulation auf 7,5 m festgelegt. Der Einfluss unterschiedlicher



Abstände wird in Kapitel 4.2.4 näher untersucht. Die Seile sind wie in Kapitel 3.2.1 „Konzept 1: Seile und Fender“ beschrieben in 2 Ebenen übereinander angeordnet, da dadurch die Relativbewegungen der Plattformen stärker eingeschränkt werden können, als bei einer Anordnung aller Seile nebeneinander. Für die Federsteifigkeit der Seile wurde ein Wert von 56.000.000 N/m verwendet, welcher mit Gleichung 4.1 berechnet wird.

$$k = \frac{E_{stahl} A_{Seil} C}{l} \quad (4.1)$$

Dabei ist  $E_{stahl}$  das Elastizitätsmodul des Stahls, aus dem das Seil gefertigt ist, welcher hier mit 200 GPa angenommen wird.  $A_{Seil}$  ist die Summe der Querschnittsfläche aller Drähte des Seils und  $C$  ist ein Korrekturfaktor, durch den der Aufbau des Seils berücksichtigt wird. Dieser hängt vom Aufbau des Seils ab, die Höhe des Korrekturfaktors variiert bei unterschiedlichen Seiltypen aber nur gering. Daher wird  $C$  bei allen Simulationen mit 0.7 angenommen. [8]

Die Kraft, welche die Fender auf die Plattformen ausüben, wird unter der Annahme isentroper Kompression beziehungsweise Expansion wie folgt berechnet:

$$F_{Fender} = p_{i0} A_{Fender} \left( \frac{d_0}{d} \right)^\kappa \quad (4.2)$$

$p_{i0}$  ist der Innendruck des entspannten Fenders als Differenzdruck gegenüber Atmosphärendruck angegeben.  $A_{Fender}$  entspricht der Auflagefläche des Fenders an der Plattform, welche bei zylindrischen Fendern allerdings von der Kompression des Fenders abhängig und daher keine Konstante ist.  $d_0$  ist die Dicke des entspannten Fenders,  $d$  die aktuelle Dicke des Fenders und  $\kappa$  steht für den isentropen Exponenten. Das Dickenverhältnis kann hier anstatt des Volumenverhältnisses verwendet werden, da davon ausgegangen wird, dass sich der Fender in einen elliptischen Zylinder verformt und das Volumenverhältnis sich daher auf  $d_0/d$  vereinfachen lässt.

Die Dämpfungskonstante der Seile wird für die erste Simulation mit  $10^6$  kg/s angenommen. Da diese aber sehr stark vom Aufbau des Seiles abhängt und auch keine empirischen Daten über die Höhe des Wertes vorliegen, wird dieser Wert in Kapitel 4.2.5 variiert, um seine Auswirkung auf das Gesamtsystem zu untersuchen.

Die Dämpfungskonstante pro  $m^2$  Auflagefläche des Fenders, welche sich je nach Belastung des Fenders verändert, wird mit  $1,2 \cdot 10^5$  kg/s· $m^2$  angenommen. Dieser Wert stützt sich auf Herstellerangaben der Firma Yokohama für die Energieabsorption von pneumatischen Fendern. [9]

Das System befindet sich vor dem Auftreffen der Wellen in Ruhe, um Effekte, welche bei plötzlich auftretenden großen Anregungen auftreten, ebenfalls berücksichtigen zu können.

Als Höhe für die, das System anregende, Welle wird ein Wert von 28.8 Metern gewählt. Dieser ist einer Studie, über die Wellenhöhe eines statistisch alle 100 Jahre vorkommenden Sturms, im sogenannten „Forties Field“, einem Ölfeld in der Nordsee, östlich von Schottland, entnommen. [10] Angesichts der Tatsache, dass die Nordsee im Space@Sea Projekt als wahrscheinlicher Einsatzort gehandhabt wird, stellt dieser Wert für eine erste Analyse, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wird, eine gute Basis dar

Die Strömungsrichtung der Wellenfront weist einem Winkelversatz von  $30^\circ$  zur y-Achse auf (siehe Abbildung 11). Dieser Wert wurde gewählt, da er einen möglichst allgemeinen Fall darstellt. Sowohl eine gerade als auch eine um  $45^\circ$  versetzte Wellenfront regen das

System symmetrisch an und stellen daher einen seltenen Spezialfall dar. Nichtsdestotrotz werden in Kapitel 4.2.3 verschiedene Anströmungsrichtungen untersucht.

#### 4.2.2. Ergebnisse der Simulation des Ausgangsentwurfs

Das Auflösen des Differentialgleichungssystems liefert den Verlauf der Schwerpunkte und Schwerpunktgeschwindigkeiten aller Plattformen. Abbildung 12 und Abbildung 13 stellen zwei ausgewählte Verläufe über eine Zeitdauer von 30 Sekunden dar.

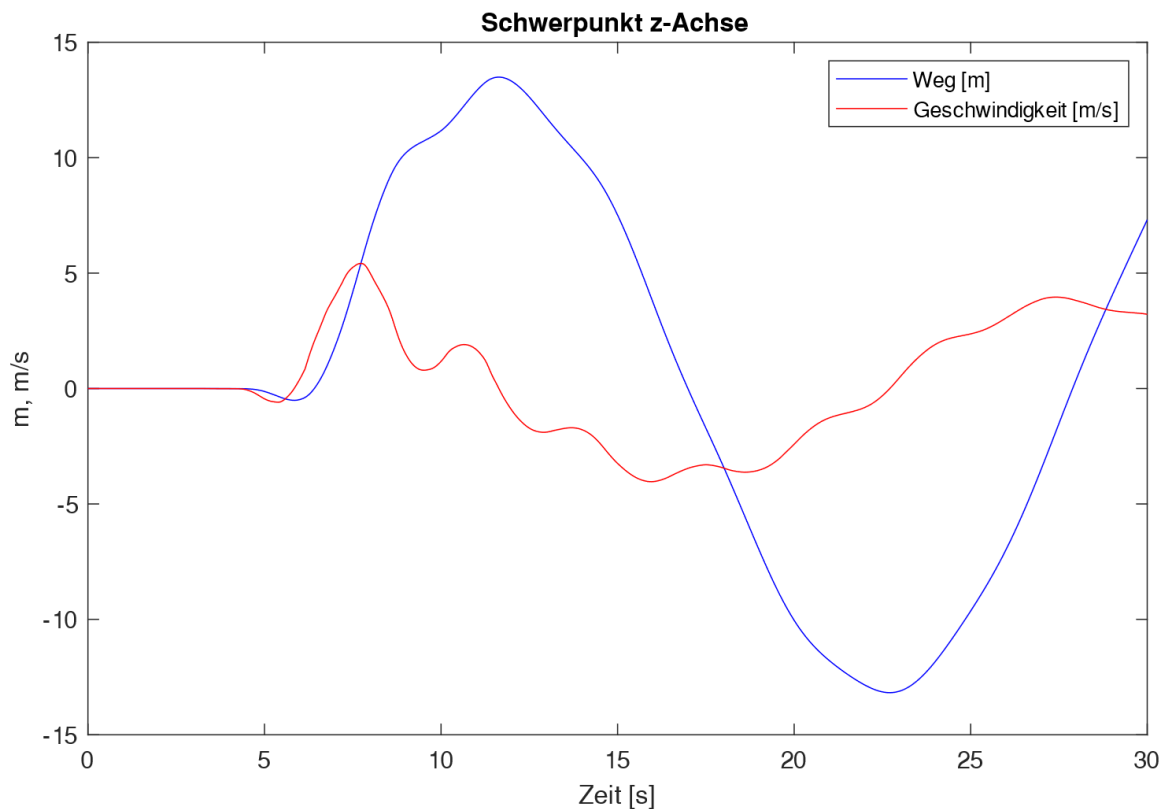


Abbildung 12: Verlauf der z-Koordinate des Schwerpunktes und der Schwerpunktgeschwindigkeit des mittleren (13.) Elements

Abbildung 12 zeigt den Verlauf der z - Koordinate des Schwerpunktes für die mittlere Plattform (Nummer 13) des Plattformsystems und die Geschwindigkeit des selbigen. Man kann klar erkennen, dass die Welle nach etwa 5 Sekunden an der betrachteten Plattform ankommt und diese anhebt. Am Geschwindigkeitsverlauf kann man erkennen, dass es danach zu einem Einschwingvorgang kommt, welcher dazu führt, dass sich die z - Koordinate immer mehr an die Bewegung der Welle annähert.

Abbildung 13 zeigt den Drehwinkel des 1. Elements um die y-Achse und die dazugehörige Winkelgeschwindigkeit. Wie auch schon beim Verlauf des Schwerpunktes, kann man auch hier sehen, dass nach dem Auftreffen der Welle eine Phase mit sehr rasch aufeinanderfolgenden Geschwindigkeitsänderungen folgt. In dieser Phase treten auch die höchsten Kräfte in den Verbindungselementen auf. Danach kommt es auch hier, durch dämpfende Effekte, zu einer Anpassung an die von der Welle aufgeprägte Lage.

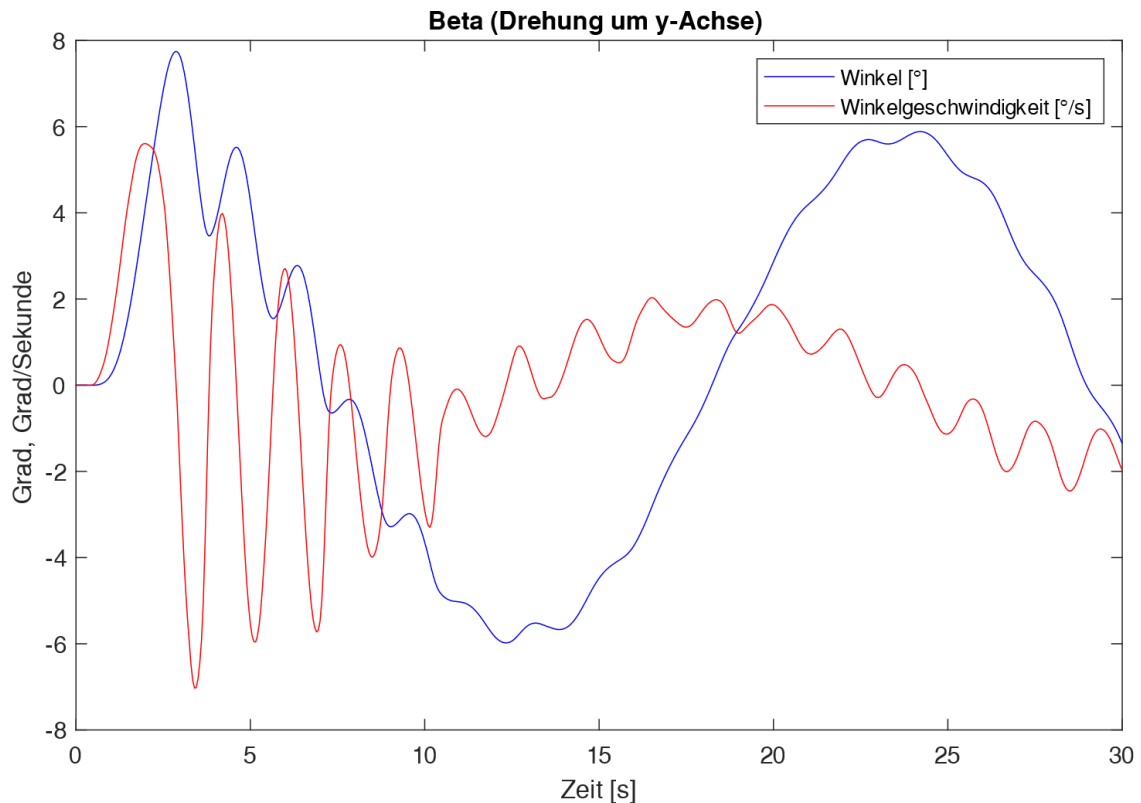


Abbildung 13: Verlauf des Winkels ( $\beta$ ) und der Winkelgeschwindigkeit um die y-Achse des Eckelements (1. Element)

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, sind die maximal auftretenden Kräfte in den Verbindungselementen die wesentlichen Ergebnisse der Mehrkörpersimulation, da diese Aussagen, über die Realisierbarkeit des Verbindungskonzeptes, erlauben. In den nachstehenden Tabellen werden die jeweiligen Maxima der in den Verbindungselementen auftretenden Kräfte gezeigt. Die Nummerierung der Plattformen ist in Abbildung 11 angegeben.

Tabelle 8 zeigt die maximal auftretenden Kräfte der oberen Seilreihe (1-5) und Tabelle 9 jene der unteren Reihe (6-10). Beide Tabellen geben die Belastungen der Elemente der B-Seite (siehe Abbildung 1), also jener Seite welche normal auf die y-Achse steht, an. Für die Darstellung der Ergebnisse wird hier die B - Seite betrachtet, da dort höhere Kräfte als auf der A - Seite auftreten. Bei den Plattformen mit den Nummern 5, 10, 15, 20 und 25 steht jeweils der Wert 0, da diese auf der B - Seite keine Nachbarplattform und daher auch keine Verbindungselemente haben. Anzumerken ist, dass auf der D - Seite der jeweiligen Nachbarplattform dieselben Kräfte wirken. Dasselbe gilt auch für A und C Seite.

Tabelle 8: Maximal auftretende Kräfte in der oberen Reihe der Seile auf der B-Seite der Plattformen. Alle Werte sind in Newton angeben.

<b>Seil</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Plattform</b>	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
<b>1</b>	6.370.353	3.532.949	1.813.743	2.571.957	7.648.797
<b>2</b>	8.902.215	4.984.979	2.500.214	3.030.985	7.381.219
<b>3</b>	8.806.992	4.863.200	1.799.531	2.489.252	8.003.706
<b>4</b>	12.216.075	2.684.020	2.120.181	3.731.378	8.349.566
<b>5</b>	0	0	0	0	0
<b>6</b>	7.364.181	2.470.897	2.318.425	3.544.525	6.075.464
<b>7</b>	8.078.731	4.686.235	2.313.610	2.887.475	7.922.793
<b>8</b>	5.979.366	1.775.823	1.145.417	1.615.199	8.919.586
<b>9</b>	7.464.966	3.730.055	2.006.147	5.837.601	12.907.404
<b>10</b>	0	0	0	0	0
<b>11</b>	7.090.459	2.066.093	1.879.492	3.350.835	8.388.442
<b>12</b>	7.329.500	3.104.623	2.427.152	3.077.266	9.703.749
<b>13</b>	6.189.464	1.228.144	1.535.251	2.152.490	11.334.261
<b>14</b>	6.845.153	2.619.596	1.986.615	3.055.233	14.707.108
<b>15</b>	0	0	0	0	0
<b>16</b>	7.774.887	3.296.624	1.529.670	2.323.467	7.027.690
<b>17</b>	11.052.344	5.284.266	986.091	1.011.470	6.971.159
<b>18</b>	7.684.867	2.092.931	1.529.358	1.115.229	7.699.785
<b>19</b>	5.763.616	3.901.707	2.048.882	3.585.166	13.096.607
<b>20</b>	0	0	0	0	0
<b>21</b>	7.954.852	3.857.156	4.153.412	4.889.108	14.064.907
<b>22</b>	11.902.753	5.962.720	3.397.627	4.317.638	16.442.923
<b>23</b>	10.399.521	2.961.899	1.865.392	1.673.046	19.260.234
<b>24</b>	19.143.720	9.043.050	1.676.435	3.904.055	27.895.797
<b>25</b>	0	0	0	0	0
<b>Maximum</b>	19.143.720	9.043.050	4.153.412	5.837.601	27.895.797

Tabelle 9: Maximal auftretende Kräfte in der unteren Reihe der Seile auf der B-Seite der Plattformen. Alle Werte sind in Newton angegeben.

Seil	6	7	8	9	10
Plattform	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
1	3.166.114	1.759.205	1.049.395	2.466.382	6.580.171
2	3.567.220	1.595.250	995.570	1.912.854	5.923.211
3	3.535.235	1.169.245	1.201.531	1.748.259	5.921.318
4	4.740.369	1.562.650	779.971	1.333.670	5.559.364
5	0	0	0	0	0
6	4.279.500	1.008.897	2.348.674	5.026.513	9.042.956
7	5.357.167	2.265.098	1.395.713	3.222.998	7.276.488
8	5.525.379	2.490.608	2.740.254	3.064.713	7.617.695
9	3.985.078	2.097.591	1.581.178	3.489.966	8.989.546
10	0	0	0	0	0
11	6.586.387	1.897.360	2.501.102	5.183.015	8.584.979
12	6.512.307	2.394.213	1.923.299	3.467.744	7.977.298
13	6.070.716	2.938.256	2.582.202	3.435.435	8.260.131
14	7.851.244	1.412.831	1.493.065	2.551.830	11.314.297
15	0	0	0	0	0
16	4.987.667	1.691.985	2.551.130	4.717.482	7.777.547
17	5.913.172	2.815.637	1.634.935	3.982.680	8.747.743
18	4.815.082	2.309.688	2.391.072	3.885.991	8.620.424
19	5.142.055	1.743.606	1.053.280	3.564.644	9.332.197
20	0	0	0	0	0
21	8.697.362	5.012.981	3.397.671	5.648.868	10.912.225
22	5.161.572	2.585.361	1.600.607	3.821.281	10.145.183
23	11.399.302	9.544.542	7.698.756	6.263.166	9.728.297
24	15.618.891	3.656.880	2.910.221	2.846.186	14.994.546
25	0	0	0	0	0
<b>Maximum</b>	15.618.891	9.544.542	7.698.756	6.263.166	14.994.546

Die Nummerierung der Seile und Fender erfolgt von kleiner zu größerer x- beziehungsweise y-Koordinate. Es zeigt sich, dass die Seile, welche außen an der Plattform befestigt sind, also jene mit den Nummern 1 und 5 beziehungsweise 6 und 10 einer höheren Belastung ausgesetzt sind. Dies lässt sich durch den Umstand erklären, dass diese Seile bei Drehungen der Plattform um die z-Achse am meisten beansprucht werden.

Laut Herstellerangaben des Herstellers „Teufelberger“ liegt die Mindestbruchlast eines Stahlseils mit 80 mm Durchmesser bei 5.887.000 Newton und damit deutlich unter den, bei den Berechnungen auftretenden, Kräften. [11] Aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Kapiteln unterschiedliche Variationen am System vorgenommen, um zu untersuchen ob die Belastungen reduziert werden können.

Tabelle 10: Maximal auftretende Kräfte in den Fendern auf der A-Seite der Plattformen. Alle Werte sind in Newton angeben.

Fender	1	2	3	4
Plattform	[N]	[N]	[N]	[N]
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	3.351.746	2.782.303	3.072.784	3.560.538
7	3.377.354	3.119.518	3.396.892	3.855.679
8	3.522.252	3.222.657	3.485.413	3.750.766
9	3.603.849	3.385.009	3.528.452	3.855.706
10	3.314.569	3.409.601	4.064.831	4.752.013
11	3.200.284	3.034.937	3.625.118	4.287.590
12	3.340.747	3.694.122	4.106.043	4.535.448
13	3.414.584	3.738.007	4.094.090	4.490.248
14	3.748.101	3.578.753	4.035.902	4.510.984
15	3.582.102	4.039.195	4.986.827	6.004.019
16	3.894.580	3.656.272	4.314.446	5.005.453
17	4.029.482	4.374.599	4.814.426	5.297.845
18	4.206.170	4.669.780	5.141.637	5.628.292
19	4.032.336	4.518.581	5.017.216	5.528.200
20	4.119.462	5.153.011	6.245.615	7.403.170
21	4.827.631	3.755.118	4.259.191	5.051.129
22	4.547.447	4.600.336	5.233.097	5.887.824
23	4.428.007	4.666.405	5.070.399	5.481.639
24	4.753.095	4.317.869	4.793.472	5.281.167
25	6.134.063	5.976.174	6.480.660	7.584.387
<b>Maximum</b>	6.134.063	5.976.174	6.480.660	7.584.387

Tabelle 10 zeigt die auf die Fender einwirkenden Kräfte. Hier wird allerdings die A-Seite der Plattformen betrachtet, da bei den Fendern hier die größere Belastung auftritt. Es ist zu erkennen, dass die Kräfte um ein Vielfaches unter den Seilkräften liegen, obwohl nur vier Fender zum Einsatz kommen. Bei einigen Plattformen ist ein Anstieg der Kräfte vom Fender 1 zum Fender 4 hin oder umgekehrt zu beobachten. Dieser Effekt tritt auf, da manche Plattformen, aufgrund der Wellenanregung, eine Drehrichtung um die z-Achse bevorzugen und daher die Fender auf einer Seite stärker belasten.

Laut Angaben des Fender Herstellers „Yokohama“ liegen die berechneten Maximalkräfte unter der Belastungsgrenze eines marktüblichen Fenders dieser Größe. [9]

Tabelle 11 zeigt die maximalen vertikalen Abstände zwischen den Befestigungspunkten der Seile der oberen Reihe der B-Seite der Plattformen.

Man erkennt, dass die vertikalen Abstände große Werte annehmen und dass daher Personen- oder Fahrzeugverkehr zwischen den Plattformen nicht durchführbar ist. Es ist allerdings anzumerken, dass es sich bei den hier simulierten Bedingungen um einen

statistisch alle 100 Jahre vorkommenden Sturm handelt und keine Bedingungen, bei denen der Plattformbetreiber normal aufrechterhalten werden muss.

Tabelle 11: Maximal auftretender vertikaler Abstand zwischen den Befestigungspunkten der Seile der oberen Reihe der B-Seite der Plattformen. Alle Werte sind in Meter angegeben.

Seil	1	2	3	4	5
<b>Plattform</b>	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
<b>1</b>	1,69	1,48	1,40	1,70	2,17
<b>2</b>	1,63	1,40	1,31	1,71	2,24
<b>3</b>	1,64	1,46	1,43	1,76	2,26
<b>4</b>	1,93	1,77	1,77	2,05	2,50
<b>5</b>	0	0	0	0	0
<b>6</b>	1,49	1,24	1,31	1,76	2,25
<b>7</b>	1,48	1,24	1,43	1,97	2,54
<b>8</b>	1,53	1,39	1,50	2,01	2,56
<b>9</b>	1,74	1,44	1,64	2,17	2,76
<b>10</b>	0	0	0	0	0
<b>11</b>	1,75	1,45	1,32	1,84	2,48
<b>12</b>	1,74	1,43	1,55	2,07	2,70
<b>13</b>	1,73	1,45	1,67	2,15	2,79
<b>14</b>	1,90	1,46	1,71	2,24	2,94
<b>15</b>	0	0	0	0	0
<b>16</b>	1,86	1,57	1,45	1,86	2,46
<b>17</b>	1,81	1,55	1,53	2,08	2,76
<b>18</b>	1,64	1,44	1,66	2,18	2,81
<b>19</b>	1,82	1,42	1,78	2,31	3,08
<b>20</b>	0	0	0	0	0
<b>21</b>	2,39	1,99	1,61	1,95	2,75
<b>22</b>	2,62	2,18	1,76	2,28	3,12
<b>23</b>	2,71	2,30	1,96	2,45	3,34
<b>24</b>	2,58	2,02	1,96	2,99	4,09
<b>25</b>	0	0	0	0	0
<b>Maximum</b>	2,71	2,30	1,96	2,99	4,09

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Simulation des ersten Entwurfs zeigt, dass der Einsatz von Fender bezogen auf die maximalen Kräfte ein gangbares Konzept darstellt. Hingegen ist der Einsatz von Stahlseilen in der hier untersuchten Anordnung nicht möglich, da die Kräfte die Belastbarkeitsgrenze der Seile weit übersteigen.

#### 4.2.3. Vergleich unterschiedlicher Anströmwinkel der Wellen

In diesem Kapitel wird die Antwort des Systems auf unterschiedliche Richtungen der Wellenströmung untersucht. Dazu wird der Winkel  $\Phi$  (siehe Abbildung 11) in  $10^\circ$  Schritten verändert. Zusätzlich wird auch der Fall mit  $45^\circ$  betrachtet, da in diesem eine symmetrische Anregung vorliegt. Tabelle 12 zeigt die maximalen Belastungen der Verbindungselemente bei Anregung aus unterschiedlichen Richtungen.

Tabelle 12: Maximale Belastung der Verbindungselemente in Abhängigkeit des Anströmwinkels der Wellen.

	<b>Seile A-Seite</b>	<b>Seile B-Seite</b>	<b>Fender A-Seite</b>	<b>Fender B-Seite</b>
<b><math>\Phi=0^\circ</math></b>	14.448.211	97	6.961.506	1.108
<b><math>\Phi=10^\circ</math></b>	21.386.732	7.657.533	7.911.181	1.752.778
<b><math>\Phi=20^\circ</math></b>	20.579.302	12.685.098	7.573.322	3.759.141
<b><math>\Phi=30^\circ</math></b>	18.690.829	27.895.797	7.584.387	5.810.122
<b><math>\Phi=40^\circ</math></b>	26.839.610	34.561.199	7.677.334	7.670.801
<b><math>\Phi=45^\circ</math></b>	27.556.676	26.920.705	7.969.930	6.876.186
<b><math>\Phi=50^\circ</math></b>	31.342.577	21.365.921	8.906.438	7.306.593
<b><math>\Phi=60^\circ</math></b>	25.362.967	18.952.628	7.657.173	7.083.882
<b><math>\Phi=70^\circ</math></b>	14.928.933	22.316.983	4.232.870	8.282.398
<b><math>\Phi=80^\circ</math></b>	8.098.301	22.727.546	1.970.772	8.756.971
<b><math>\Phi=90^\circ</math></b>	125	14.333.971	0	6.230.932

Abbildung 14 und Abbildung 15 stellen den Verlauf der Belastung der Verbindungselemente bei variierendem Richtungswinkeln der Wellenströmung dar. In Abbildung 14 erkennt man, dass die Belastung der Seile bei gerader Anströmung am geringsten ist. Zudem wird ersichtlich, dass die Belastung im Bereich zwischen  $30^\circ$  und  $60^\circ$  die höchsten Werte annimmt. In Abbildung 15 sieht man, dass die Belastungen der Fender bei  $\Phi=90^\circ$  und bei  $\Phi=0^\circ$  kleiner sind und über den restlichen Winkelbereich einigermaßen konstant verlaufen.

Bei  $\Phi=90^\circ$  und bei  $\Phi=0^\circ$  werden die Kräfte einer Seite, jeweils durch die symmetrische Anregung, zu null. Die Simulation ergibt, wie in Tabelle 12 ersichtlich, teilweise kleine Werte, welche allerdings ungleich null sind. Dieser Umstand ist auf numerische Ungenauigkeiten zurückzuführen.



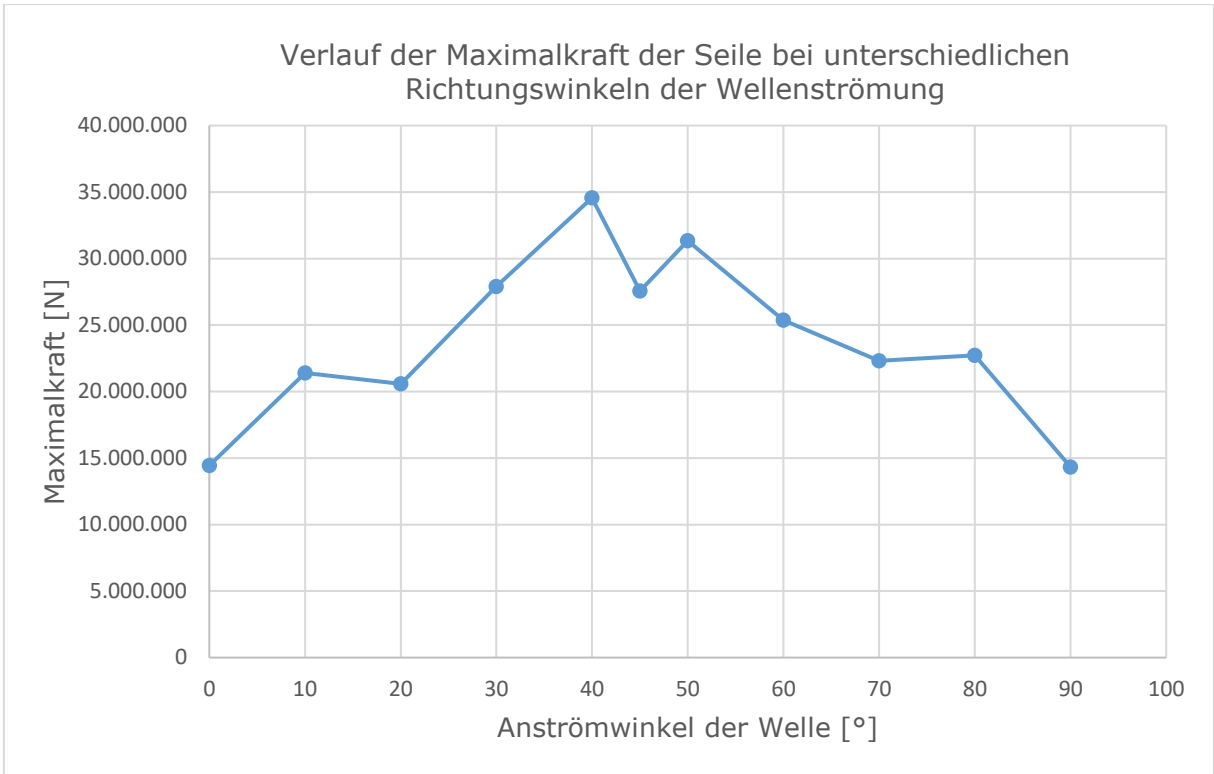


Abbildung 14: Verlauf der maximal auftretenden Belastung der Fender bei variierendem Winkel der Strömung der Welle.

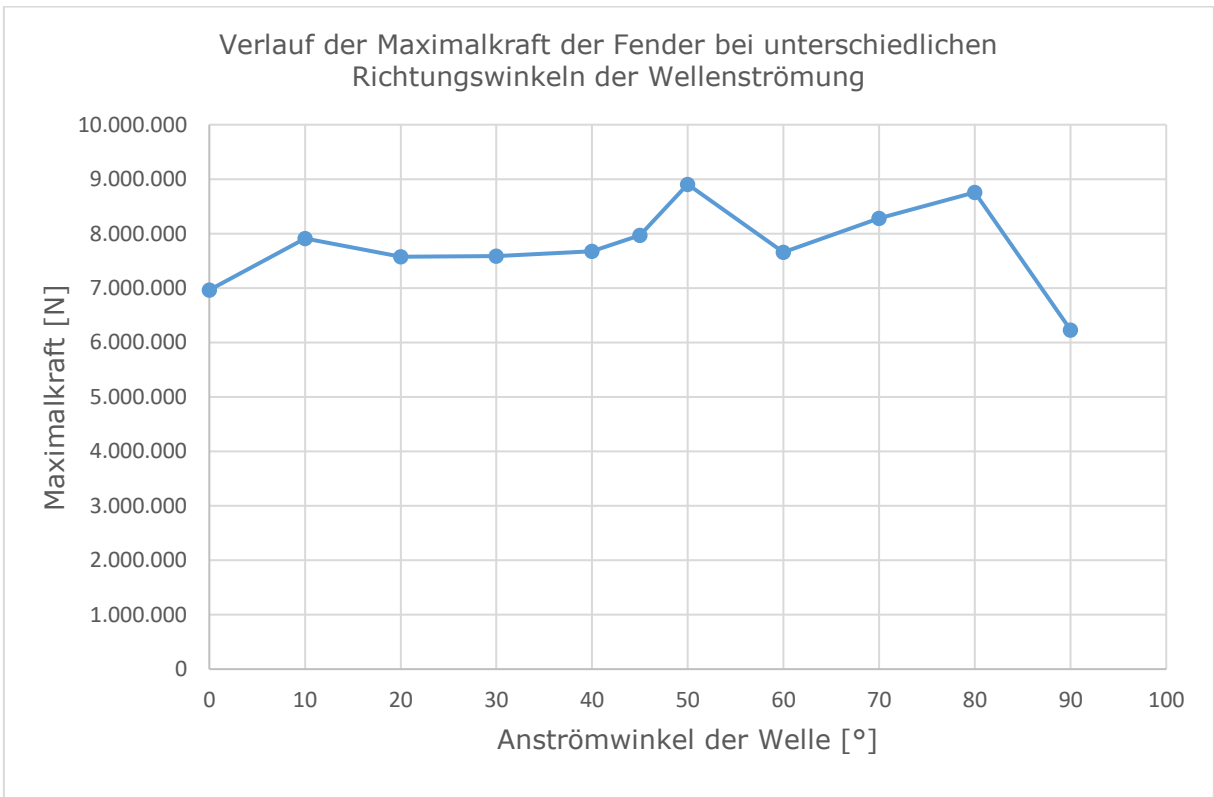


Abbildung 15: Verlauf der maximal auftretenden Belastung der Fender bei variierendem Winkel der Strömung der Welle.

#### 4.2.4. Vergleich unterschiedlicher Abstände der Plattformen zueinander

Der Abstand der Plattformen zueinander ist ein entscheidender Parameter, welcher das dynamische Verhalten des Systems beeinflusst. In weiterer Folge sind auch die Kräfte auf die Verbindungselemente betroffen. In Tabelle 13 sind die maximalen Belastungen der Verbindungselemente bei unterschiedlichem Plattformabstand eingetragen.

Tabelle 13: Maximal auftretende Kräfte in den Verbindungselementen, bei variierendem Plattformabstand. Alle Werte sind in Newton angeben.

	<b>Seile A-Seite</b>	<b>Seile B-Seite</b>	<b>Fender A-Seite</b>	<b>Fender B-Seite</b>
<b>2,5 m</b>	66.122.876	85.384.054	10.863.234	7.067.330
<b>5 m</b>	30.137.513	42.965.330	6.743.761	7.155.048
<b>7,5 m</b>	18.690.829	27.895.797	7.584.387	5.810.122
<b>10 m</b>	14.810.139	20.643.175	8.079.901	4.867.470
<b>12,5 m</b>	11.672.677	16.556.454	8.370.880	4.420.054

Es ist ersichtlich, dass bei einem Plattformabstand von 2,5 m beziehungsweise 5 m die Kräfte auf die Seile sehr groß sind. Dies lässt sich durch die proportionale Abhängigkeit der Federsteifigkeit zur Länge der Seile erklären. In Abbildung 16 ist der Verlauf der maximalen Belastung der Seile und in Abbildung 17 der Verlauf der maximalen Belastung der Fender in Abhängigkeit zum Plattformabstand dargestellt. In beiden Abbildungen ist der stark nichtlineare Zusammenhang dieser Größen erkennbar.

Die Kräfte in den Fendern werden durch den Plattformabstand deutlich weniger beeinflusst. Es ist allerdings zu bedenken, dass die Größe der Fender vom Abstand zwischen den Plattformen abhängt und größere Fender höheren Kräften widerstehen können.

Weiters zeigt sich, dass, bei zunehmender Vergrößerung des Plattformabstandes, die Abnahme der Seilkräfte immer schwächer wird. Da es notwendig ist die Plattformen für Personen und Fahrzeuge mit Brückenkonstruktionen zu verbinden, stellen große Abstände außerdem einen vergrößerten Konstruktionsaufwand dar. Daher ist ein Kompromiss zwischen Kräften in den Verbindungselementen und Abstand der Plattformen notwendig.

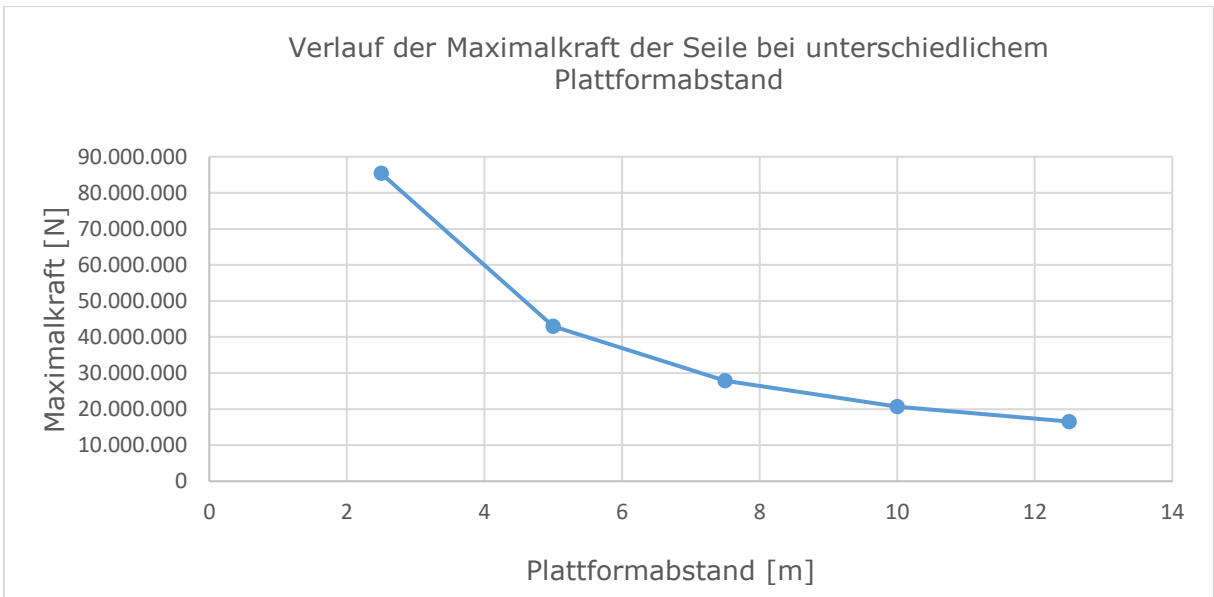


Abbildung 16: Verlauf der maximal auftretenden Belastung der Seile bei variierendem Plattformabstand.

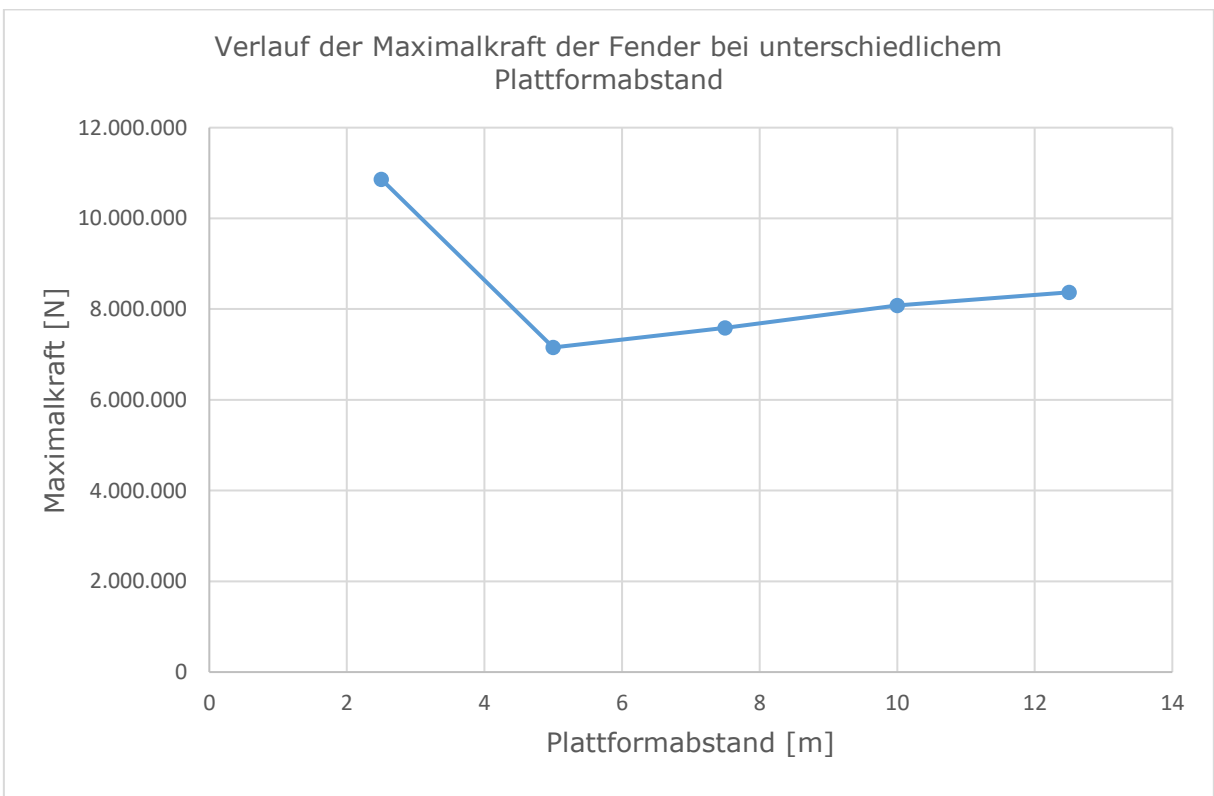


Abbildung 17: Verlauf der maximal auftretenden Belastung der Fender bei variierendem Plattformabstand.

#### 4.2.5. Variation der Dämpfungskonstante der Seile

Da, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, keine empirischen Daten über die Höhe des Dämpfungsgrades eines Stahlseils vorliegen, wird dieser Parameter in diesem Kapitel variiert, um zu untersuchen wie stark er die Ergebnisse der Berechnungen beeinflusst.

Tabelle 14 zeigt die Werte der maximalen Belastung der Verbindungselemente. Man erkennt, dass die Variation des Dämpfungsgrades der Seile sowohl Einfluss auf die Belastung der Seile, als auch der Fender hat. Die relative Veränderung bei den Fendern ist jedoch, wie in Abbildung 19 ersichtlich, vernachlässigbar klein. Bei den Seilen sticht lediglich der Wert der oberen A-Seite bei  $D=5 \cdot 10^6$  heraus. Dieser Ausreißer beeinflusst die Bewertung des Konzeptes allerdings nicht grundlegend, da, wie Abbildung 18 zeigt, die bei Betrachtung beider Seiten, größte in den Seilen auftretende Kraft nur geringfügig höher ist.

Tabelle 14: Maximal auftretende Kräfte in den Verbindungselementen, bei variierender Dämpfungskonstante der Seile. Alle Werte sind in Newton angegeben.

	Seile oben A-Seite	Seile unten A-Seite	Seile oben B-Seite	Seile unten B-Seite	Fender
<b>D=2·10<sup>5</sup></b>	18.992.541	12.000.412	29.177.077	19.057.085	7.786.321
<b>D=5·10<sup>5</sup></b>	18.922.669	11.102.287	28.217.238	17.599.670	7.594.723
<b>D=10<sup>6</sup></b>	18.690.829	10.494.982	27.895.797	15.618.891	7.584.387
<b>D=2·10<sup>6</sup></b>	19.654.639	10.220.862	27.422.729	15.269.038	7.640.685
<b>D=5·10<sup>6</sup></b>	29.031.057	11.185.689	30.808.893	15.880.677	7.687.498

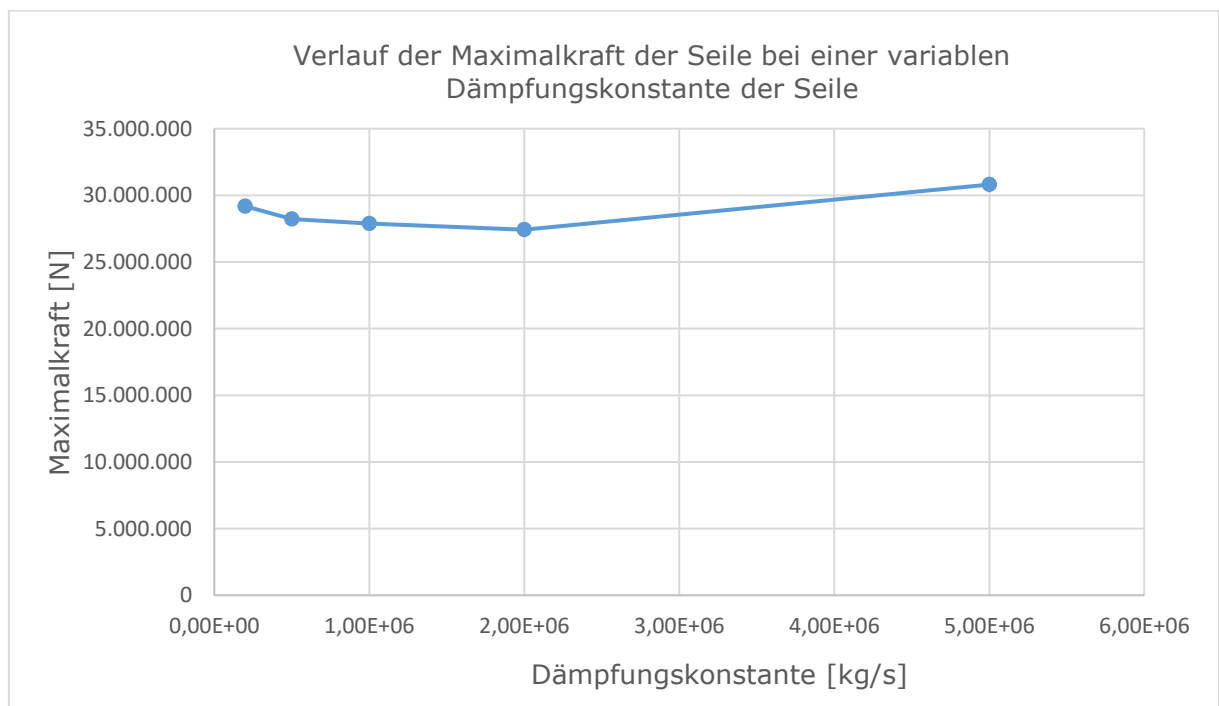


Abbildung 18: Maximal auftretende Belastung der Seile bei unterschiedlichem Dämpfungsgrad der selbigen.

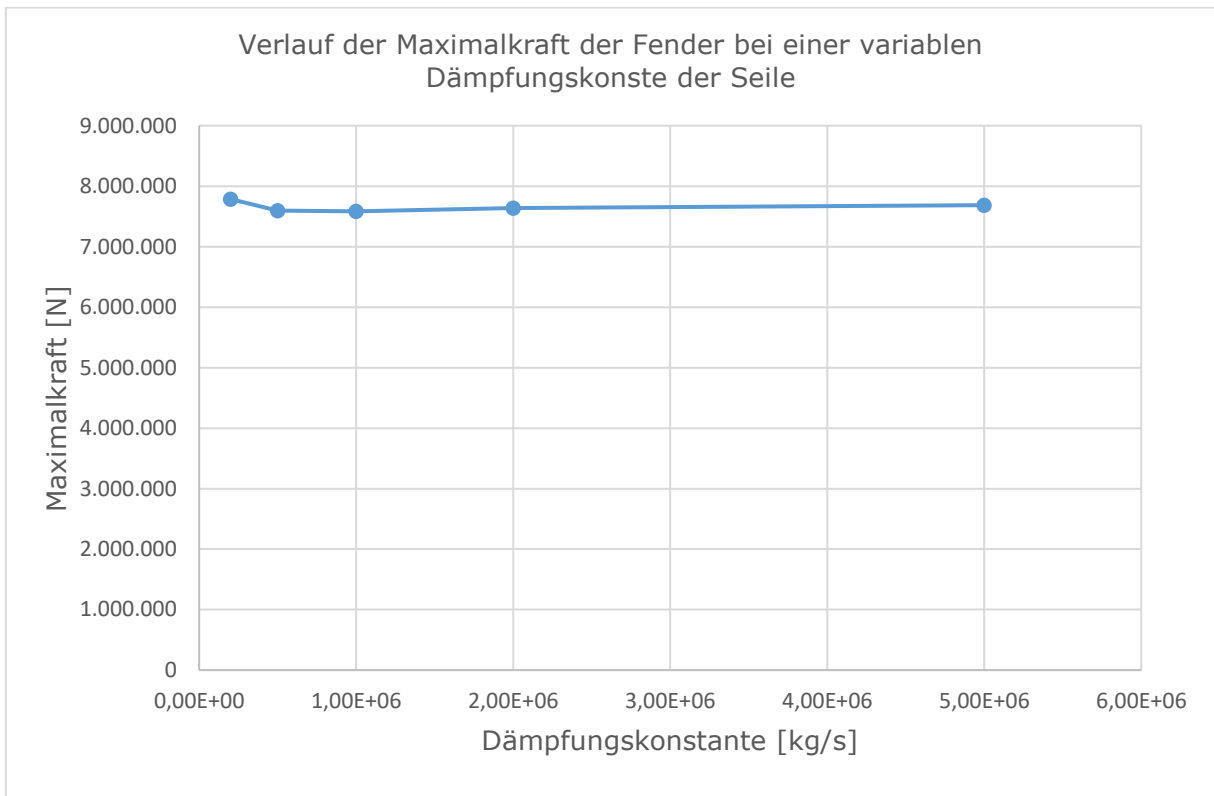


Abbildung 19: Maximal auftretende Belastung der Fender bei unterschiedlichem Dämpfungsgrad der Seile.

Der Bereich, in dem die Dämpfungskonstante variiert wird, ist auf einen sinnvollen Bereich eingeschränkt. Höhere Werte führen zu einem System, das von Dämpfungskräften dominiert wird. Kleinere Werte lassen die Dämpfungskräfte, im Verhältnis zu den Federkräften, vernachlässigbar klein werden, was zu einem System mit nahezu ungedämpften Schwingungen führt. Beide Szenarien sind für ein Stahlseil nicht realistisch.

In den durchgeführten Berechnungen hat der Dämpfungsgrad der Seile nur geringen Einfluss auf die Belastung der Verbindungselemente. Die Annahme des Dämpfungsgrades beeinflusst die Gesamtbewertung des Konzeptes daher nur begrenzt.

#### 4.2.6. **Ergebnisse der Simulation von Seilen im Verbund**

Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, sind die im System auftretenden Belastungen für einzelne Seile zu groß. Es wird daher versucht, statt einem einzelnen Seil, einen Verbund von mehreren zu verwenden. Das bedeutet, dass die Feder- und Dämpferkonstanten mit dem Faktor  $x$  multipliziert werden, wobei  $x$  der Anzahl der Seile im Verbund entspricht.

Die maximale Belastbarkeit dieses Verbundes steigt im Fall, dass die Last gleichmäßig auf alle Seile verteilt wird, auch um den Faktor  $x$ . Die maximale Belastung eines einzelnen Seils liegt laut „Teufelberger“ bei 5.887.000 Newton. [11]

Die maximal auftretenden Kräfte sind in Tabelle 15 für eine unterschiedliche Anzahl von 2 bis 10 Seilen im Verbund aufgelistet und in Abbildung 20 graphisch dargestellt.

Tabelle 15: Maximale, auf die Verbindungselemente wirkende, Kräfte beim Einsatz von mehreren Seilen im Verbund ( $K_0 = 56.000.000 \text{ N/m}$ ). Alle Werte sind in Newton angegeben.

	Seile oben A-Seite	Seile unten A-Seite	Seile oben B-Seite	Seile unten B-Seite	Feder
<b><math>K=2 \cdot K_0</math></b>	27.640.624	14.928.885	39.956.326	25.228.339	7.643.917
<b><math>K=4 \cdot K_0</math></b>	43.333.811	20.205.836	54.629.433	35.339.980	7.897.620
<b><math>K=6 \cdot K_0</math></b>	52.923.465	27.087.111	62.558.072	39.477.579	7.952.212
<b><math>K=8 \cdot K_0</math></b>	61.537.274	38.646.584	65.985.072	49.016.545	7.901.370
<b><math>K=10 \cdot K_0</math></b>	70.767.343	39.946.929	75.861.244	58.960.684	8.043.083

In Abbildung 20 wird gezeigt, dass selbst bei einem Verbund aus zehn Seilen, die auftretenden Kräfte zu hoch sind. Obwohl im untersuchten Bereich noch kein Schnittpunkt zwischen der Kurve der auftretenden Kräfte und jener der Belastungsgrenze aufgetreten ist, wurden keine weiteren Berechnungen durchgeführt, da die Kräfte, welche bei einem Verbund von bereits zehn Seilen auftreten, so groß sind, dass die Einleitung der Kräfte in die Plattform kaum realisierbar ist.

Der Einsatz von Seilen im Verbund stellt nach diesen Untersuchungen keine praktikable Lösung für die Verbindung der Plattformen darstellt.

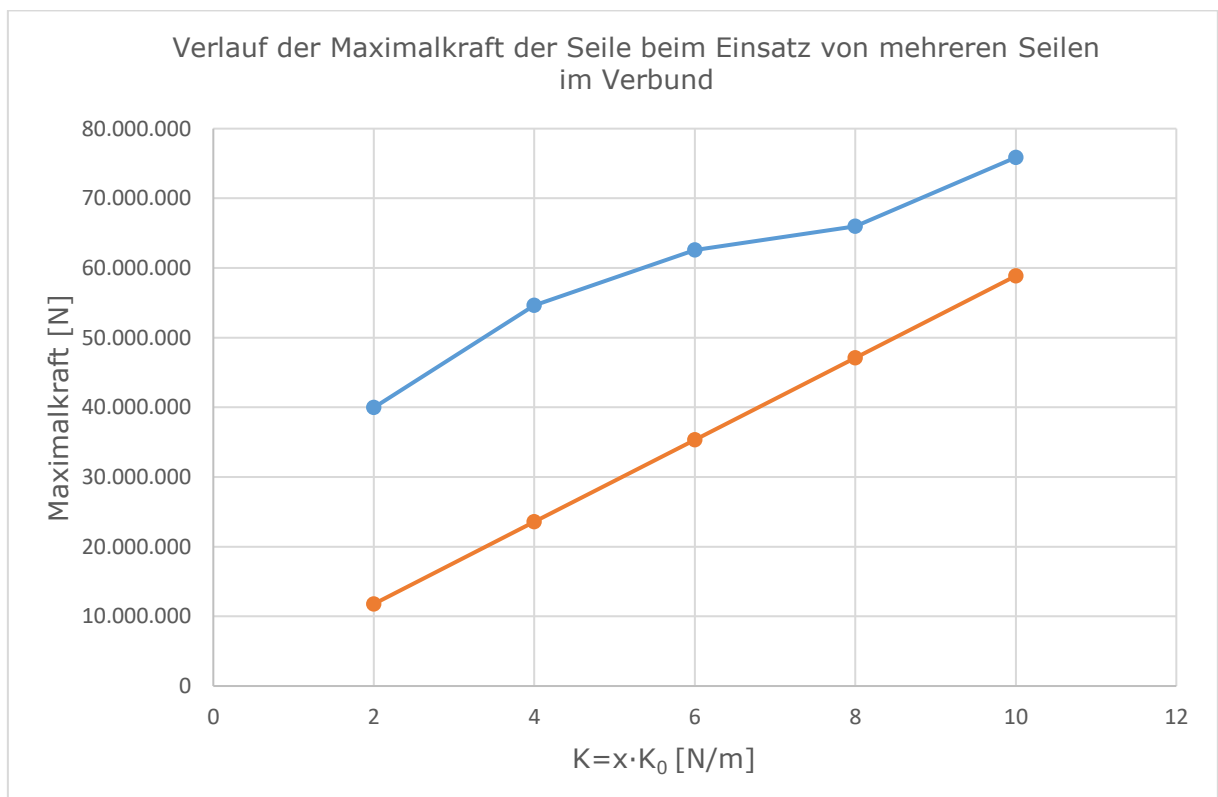


Abbildung 20: Verlauf der Maximalkraft der Verbindungselemente beim Einsatz von mehreren Seilen im Verbund, aufgetragen über Vielfachen von  $K_0 = 56.000.000 \text{ N/m}$ . In blau sind die berechneten Kräfte dargestellt, in orange die maximale Belastbarkeit der Seile.

#### 4.2.7. Ergebnisse der Simulation von gefedert gelagerten Seilen

In diesem Kapitel wird untersucht, ob durch Herabsetzung der Federsteifigkeit, die Kräfte, welche auf die Seile wirken reduziert werden können. Dies ist daher eine Untersuchung des Konzeptes 2 (Kapitel 3.2.2), welches bei der Bewertung durch die Expertengruppe den zweiten Platz belegt hat. Die Dämpfungskonstante wird für diese Berechnungen konstant gehalten.

Wie in Abbildung 21 und Tabelle 16 ersichtlich, zeigt sich, durch das Herabsetzen der Federsteifigkeit, ein näherungsweise linearer Abfall der Kräfte. Zwischen den Werten  $K=K_0/6$  und  $K=K_0/8$  kann auch der maximale Belastungswert eines einzelnen Seils unterschritten werden.

Tabelle 16: Maximale auf die Verbindungselemente wirkende Kräfte beim Einsatz von gefedert gelagerten Seilen. ( $K_0= 56.000.000$  N/m) Alle Werte sind in Newton angegeben.

	<b>Seile oben A-Seite</b>	<b>Seile unten A-Seite</b>	<b>Seile oben B-Seite</b>	<b>Seile unten B-Seite</b>	<b>Fender</b>
<b><math>K=K_0/2</math></b>	12.104.279	8.591.203	15.611.257	9.740.764	7.630.798
<b><math>K=K_0/4</math></b>	8.605.224	7.151.930	7.102.043	6.346.085	7.062.256
<b><math>K=K_0/6</math></b>	6.472.405	6.233.397	5.573.436	5.107.257	6.390.831
<b><math>K=K_0/8</math></b>	5.676.644	5.548.171	4.830.982	4.315.399	5.865.673
<b><math>K=K_0/10</math></b>	5.468.939	5.054.356	4.333.265	3.765.647	5.438.249

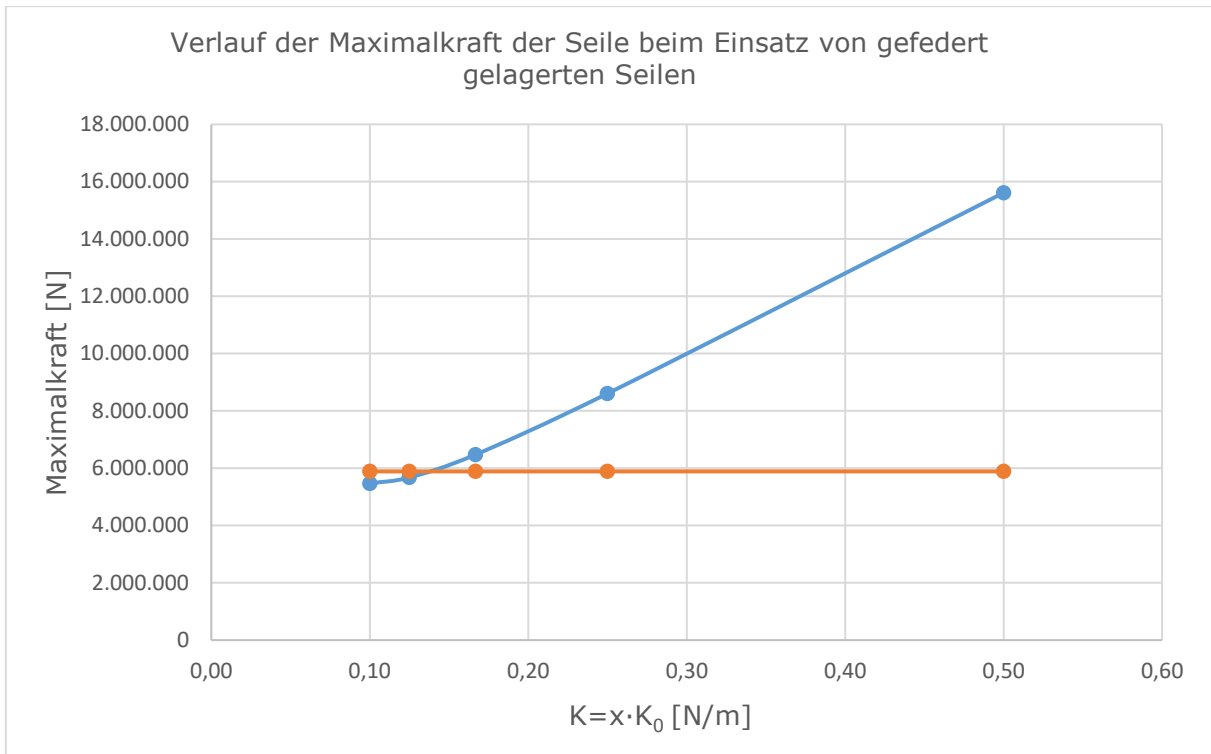


Abbildung 21: Verlauf der Maximalkraft der Verbindungselemente beim Einsatz von gefedert gelagerten Seilen, aufgetragen über Vielfachen von  $K_0 = 56.000.000 \text{ N/m}$ . In blau sind die berechneten Kräfte dargestellt, in orange die maximale Belastbarkeit eines einzelnen Seils.

Realisierbar wäre so eine Herabsetzung der Federsteifigkeit zum Beispiel durch den Einsatz von Blattfedern bei der Lagerung der Seile. Auch eine Verlängerung des Seils führt zu einer niedrigeren Federsteifigkeit, allerdings bedarf dies auch einer Führung des Seils (z.B.: durch Flaschenzüge), setzt man voraus, dass der Abstand zwischen den Plattformen nicht erhöht werden soll.

#### 4.2.8. Untersuchung des Systems mit vorgespannten Seilen

Im ersten Entwurf hat sich gezeigt, dass die Belastung am Beginn der Anregung am höchsten ist, da dort die größten Beschleunigungen auftreten. Eine denkbare Strategie, um dem entgegenzuwirken, ist daher das Vorspannen der Seile beziehungsweise Fender. Dieses wird in diesem Kapitel untersucht.

Dabei werden Fender mit 7,5 m Durchmesser durch 5 m lange Seile vorgespannt. Da die Federsteifigkeit der Seile größer ist, befindet sich das System bei einer Seildehnung von wenigen Zentimetern im Gleichgewicht. Dieses Gleichgewicht wird auch als Startbedingung für die Berechnung benutzt.



Tabelle 17: Vergleich der maximal auf die Verbindungselemente wirkenden Kräfte eines Systems mit vorgespannten Verbindungselementen und eines ohne Vorspannung.

	<b>Seile A-Seite</b>	<b>Seile B-Seite</b>	<b>Fender A-Seite</b>	<b>Fender B-Seite</b>
<b>Vorspannung</b>	36.563.987	41.362.016	20.040.290	17.349.432
<b>Ohne Vorspannung</b>	18.690.829	27.895.797	7.584.387	5.810.122

Anhand der Werte aus Tabelle 17 kann man erkennen, dass das Vorspannen der Verbindungselemente zu keiner Reduktion, sondern zu einem Anstieg der Seilbelastung führt. Man sieht ebenfalls den zu erwartenden Anstieg der Belastung der Fender.

Das Vorspannen der Verbindungselemente hat in den Simulationen zu höheren Belastungen geführt und wird daher nicht als praktikabel angesehen.

#### 4.2.9. **Untersuchung auf Resonanzfälle**

In diesem Kapitel wird das System aus Plattformen auf Resonanzfälle untersucht. Das bedeutet, dass überprüft wird, ob gewisse Wellenlängen zu größeren Belastungen in den Verbindungselementen führen.

Die Wellenlänge von 105 Metern ist von besonderem Interesse, da diese genau der doppelten Plattformlänge, mit dazugehörigem Abstand zur nächsten, entspricht. Da Wellenlängen von 105 m jedoch mit der linearen Wellentheorie nicht in Kombination mit 28,8 m hohen Wellen betrachtet werden können, muss hier eine geringe Wellenhöhe zur Berechnung herangezogen werden.

Es werden 5 Meter hohe Wellen für diese Berechnungen benutzt, weshalb die Ergebnisse nicht mit den Ergebnissen der anderen Kapitel vergleichbar sind.

Tabelle 18 zeigt die maximal auf die Verbindungselemente wirkenden Kräfte. Bei dieser Berechnung wurde zusätzlich auch der eingeschwungene Zustand des Systems untersucht, da dieser, für eine Resonanzbetrachtung, von besonderem Interesse ist. Eingeschwungen bedeutet hier, dass das alle Effekte des ersten Auftreffens der Welle auf das ruhende System abgeklungen sind und das System harmonisch schwingt.

Tabelle 18: Vergleich der maximal auf die Verbindungselemente wirkenden Kräfte bei unterschiedlichen Wellenlängen der Anregung

	<b>Seile A-Seite</b>	<b>Fender A-Seite</b>	<b>Seile A-Seite eingeschwungen</b>	<b>Fender A-Seite eingeschwungen</b>
<b>L=80 m</b>	9.881.367	3.662.073	4.532.024	1.916.161
<b>L=105 m</b>	12.489.805	5.201.042	11.745.885	3.593.519
<b>L=130 m</b>	7.246.965	3.676.329	4.960.877	2.543.709

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse für Seilkräfte graphisch dargestellt. Man sieht, dass die Kräfte bei einer Wellenlänge von 105 Metern deutlich höher sind als bei kleineren oder

größeren Wellenlängen. Außerdem erkennt man, dass, bei einer Wellenlänge von 105 Metern, die Kräfte für den eingeschwungen Zustand fast gleich groß sind wie für die Anregung aus der Ruhe.

Abbildung 23 zeigt die Ergebnisse für die Fenderkräfte. Auch hier zeigen sich die höchsten Kräfte bei einer Wellenlänge von 105 Metern deutlich.

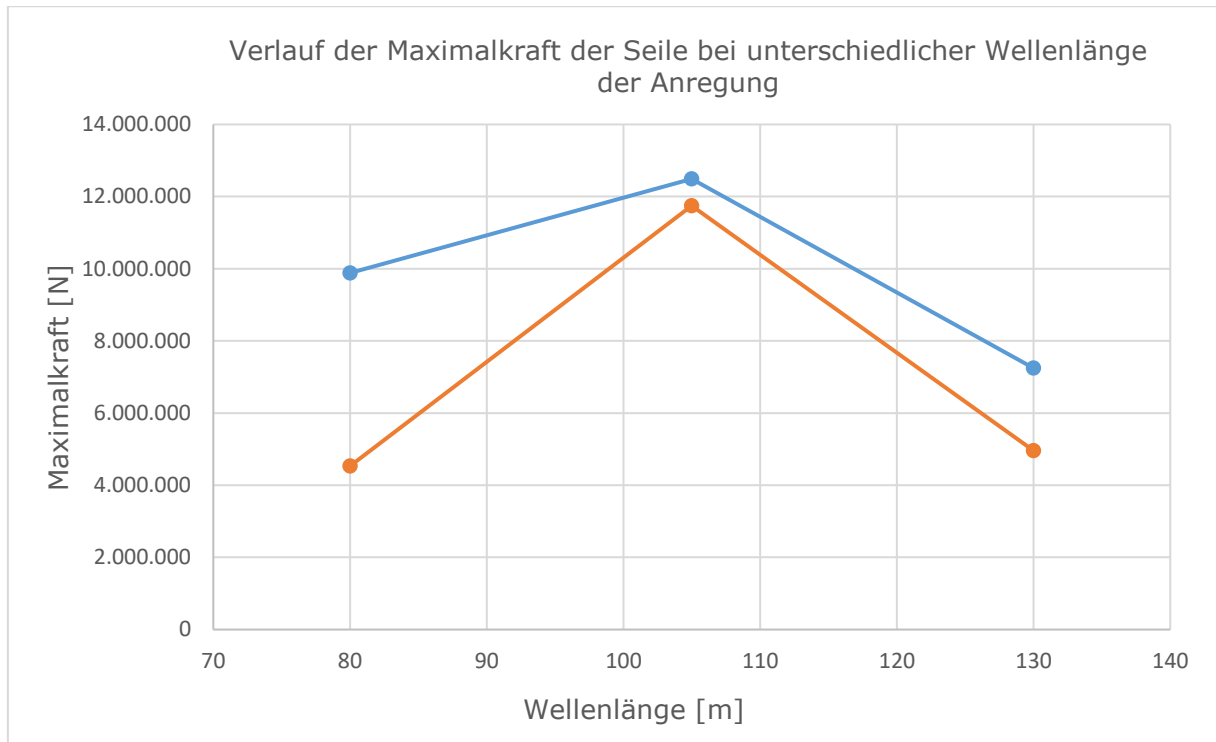


Abbildung 22: Verlauf der Maximalkraft in den Seilen bei unterschiedlichen Wellenlängen der Anregung. In Blau: Systemanregung aus der Ruhe, in Orange: Werte für den Eingeschwungen Zustand.

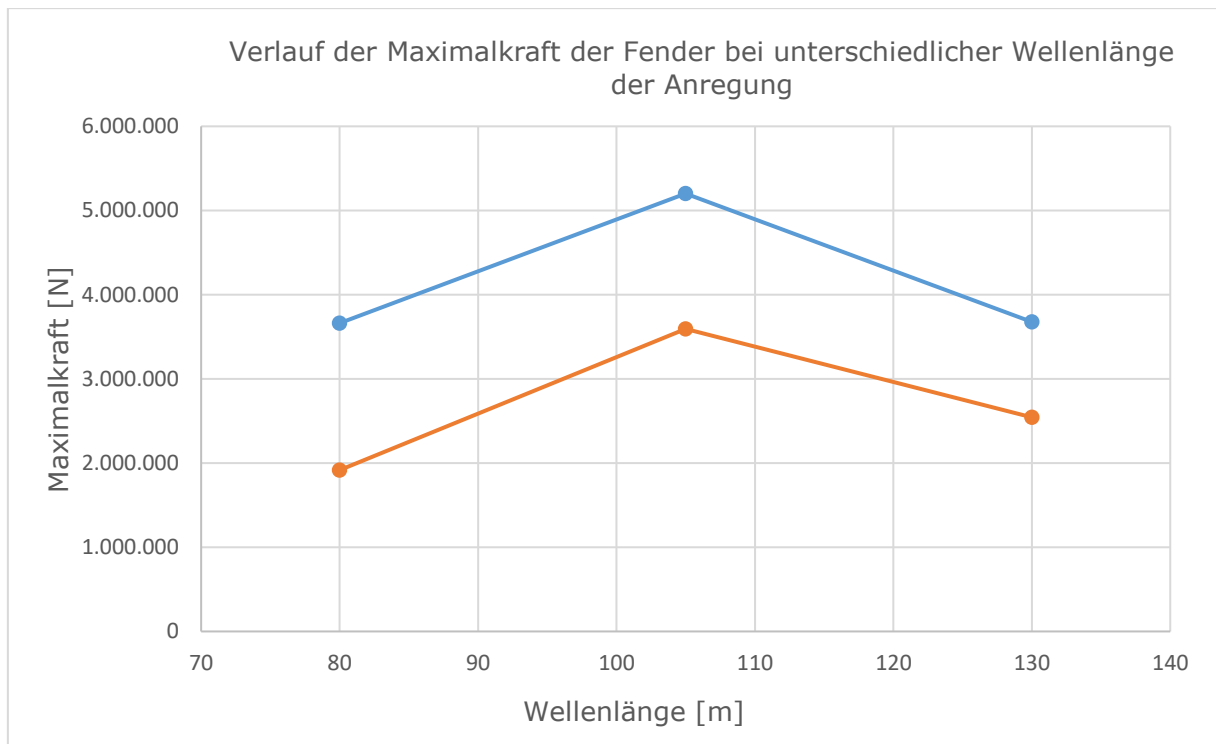


Abbildung 23: Verlauf der Maximalkraft in den Federn bei unterschiedlichen Wellenlängen der Anregung. In Blau: Systemanregung aus der Ruhe, in Orange: Werte für den Eingeschwungenen Zustand.

### 4.3. Vergleich unterschiedlicher numerischer Lösungsverfahren

„Matlab“ bietet zum Lösen von Differentialgleichungssystemen unterschiedliche Funktionen an, welche auf unterschiedlichen mathematischen Methoden beruhen. Die Lösungen numerischer Berechnungen sind Prinzip bedingt immer mit einem gewissen Fehler behaftet. Diese Fehler sind je nach Verfahren unterschiedlich groß, daher bietet sich ein Vergleich an, um abschätzen zu können, in welcher Größenordnung sich der Fehler befindet. In dieser Arbeit wurde für die Berechnungen der ODE 45 Solver benutzt. Dieser basiert auf einem Runge - Kutta Verfahren 4. Ordnung, welches ein explizites Einschrittverfahren ist.

Die beiden Solver ODE 113 und ODE 15s, welche zum Vergleich herangezogen werden, sind beides Mehrschrittverfahren und haben eine variable Ordnung. ODE 15s ist im Gegensatz zu ODE 113 allerdings speziell für besonders steife Differentialgleichungssysteme ausgelegt. [12]

Es wurden dieselben Randbedingungen wie in Kapitel 4.2.1 benutzt um einen Vergleich der unterschiedlichen Solver durchzuführen.

Tabelle 19: Vergleich der Ergebnisse, der Berechnung, der maximalen Kräfte in den Fendern mit unterschiedlichen numerischen Lösungsverfahren. Alle Werte sind in Newton angeben.

	<b>Position 1</b>	<b>Position 2</b>	<b>Position 3</b>	<b>Position 4</b>
<b>ODE 45</b>	6.134.063	5.976.174	6.480.660	7.584.387
<b>ODE 113</b>	6.157.781	6.002.576	6.488.099	7.588.222
<b>ODE 15S</b>	6.155.130	5.995.991	6.476.786	7.580.084

Tabelle 20: Vergleich der Ergebnisse, der Berechnung, der maximalen Kräfte in den Seilen, der oberen Reihe mit unterschiedlichen numerischen Lösungsverfahren. Alle Werte sind in Newton angegeben.

	<b>Position 1</b>	<b>Position 2</b>	<b>Position 3</b>	<b>Position 4</b>	<b>Position 5</b>
<b>ODE 45</b>	19.143.720	9.043.050	4.153.412	5.837.601	27.895.797
<b>ODE 113</b>	19.152.248	9.058.584	4.192.678	5.846.225	27.903.942
<b>ODE 15s</b>	19.160.184	9.066.778	4.208.228	5.831.475	27.881.487

Tabelle 19 und Tabelle 20 zeigen die Ergebnisse der maximalen Kräfte, jeweils mit einem unterschiedlichen Solver berechnet. Man sieht, dass es zu Abweichungen zwischen den Lösungen kommt, diese aber sehr gering sind. Tabelle 21 zeigt diesen Umstand mit einer prozentuellen Darstellung der Abweichungen.

Tabelle 21: Prozentuell Abweichung der Ergebnisse der Berechnung der maximalen Kräfte in den Seilen der oberen Reihe mit unterschiedlichen numerischen Lösungsverfahren, im Vergleich mit dem ODE 45 Solver.

	<b>Position 1</b>	<b>Position 2</b>	<b>Position 3</b>	<b>Position 4</b>	<b>Position 5</b>
<b>ODE 113</b>	0,04%	0,17%	0,95%	0,15%	0,03%
<b>ODE 15s</b>	0,09%	0,26%	1,32%	-0,10%	-0,05%

Der, durch die numerische Berechnung entstehende, Fehler ist klein genug, um ihn im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigen zu müssen.

## **5. Schlussbetrachtungen**

### **5.1. Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse**

Die hier dargestellten, mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführten, Simulationen des Systems aus schwimmenden Plattformen liefern Ergebnisse aus denen zahlreiche Schlussfolgerungen gezogen werden können.

Zunächst wurden sechs unterschiedliche Konzepte erstellt, die von einer Expertenkommission beurteilt wurden. Das Konzept 1 Seile und Fender wurde am besten bewertet. Daraufhin wurde eine Simulation mit einer fünf mal fünf Anordnung der Plattformelemente erstellt. Das Konzept wurde hinsichtlich der in den Verbindungselementen auftretenden Kräfte bei einer 28,8m hohe Wellen untersucht.

Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung von Fendern, unter Berücksichtigung der auftretenden Belastung, eine gangbare Möglichkeit darstellt den Plattformabstand in Grenzen zu halten. Die Lebensdauer der Fender, unter den Bedingungen des hier untersuchten Konzeptes, ist ein Punkt der weiteren Untersuchungen bedarf.

Der Einsatz von Stahlseilen ist, unter den hier untersuchten Bedingungen nur dann möglich, wenn die Aufhängung der Seile gefedert ausgeführt wird und damit die Steifigkeit deutlich gemindert wird. Es hat sich also gezeigt, dass Konzept 1 (Kapitel 3.2.1) für extreme Belastungen nicht geeignet ist, Konzept 2 (Kapitel 3.2.2) kann allerdings auch diesen Bedingungen standhalten.

Der Einsatz von mehreren Seilen in einem Verbund anstelle eines einzigen ist ebenfalls nicht zweckmäßig, da einerseits sehr viele Seile notwendig wären und andererseits da die Kräfte, welche auf die Plattformen übertragen werden, viel zu groß sein würden.

Das Vorspannen der Verbindungselemente hatte nicht den gewünschten Effekt der Kräfteminderung, sondern führt im Gegenteil zu höheren Belastungen und ist daher nicht empfehlenswert.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass ein großer Plattformabstand zu deutlich niedrigeren Maximalkräften in den Seilen führt. Allerdings ist dieser Effekt stark nichtlinear, daher ist eine Vergrößerung des Abstandes nur bis zu einem gewissen Grad sinnvoll. Die Kräfte in den Fendern werden durch den Plattformabstand nur geringfügig beeinflusst. Weiters ist ein großer Plattformenabstand im Zusammenhang mit möglichen Brückenkonstruktionen ungünstig.

Die Untersuchung unterschiedlicher Anströmwinkel der Wellen hat gezeigt, dass eine gerade Anströmung der Plattformen am günstigsten für das System ist. Die Untersuchung auf Resonanzfälle hat ergeben, dass Wellenlängen, welche der doppelten Plattformlänge mit dazugehörigem Abstand zur nächsten entsprechen, zu höheren Belastungen führen. Dieser Umstand ist für 45 m lange Plattformen allerdings nur bedingt kritisch, da Wellen mit großer Amplitude in einem anderen Wellenlängenbereich vorkommen.

### **5.2. Limitationen der Ergebnisse**

Die Simulationsergebnisse dieser Arbeit beruhen auf einigen vereinfachenden Annahmen, welche die Genauigkeit der Ergebnisse einschränken. Beispielsweise wird, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, die Bewegung der Plattformen im Wasser durch ein vereinfachtes Modell

beschrieben. Die Annahme einer linearen Feder und Dämpferkennlinie der Seile stellt eine weitere vereinfachende Annahme dar. Daraus folgt, dass alle berechneten Werte einen gewissen Fehler gegenüber den real auftretenden Werten aufweisen.

Trotzdem können aus den berechneten Werten wertvolle Erkenntnisse gezogen werden. Einerseits liefern die Ergebnisse Auskunft über die Größenordnung der Kräfte in den unterschiedlichen Verbindungselementen. Dadurch lässt sich abschätzen ob das Konzept unter den gewählten Bedingungen umsetzbar ist, oder ob die Belastungen so hoch sind, dass eine Realisierung nicht möglich ist. Des Weiteren kann, durch Vergleiche der Berechnungsergebnisse, erkannt werden, ob gewisse Änderungen am Konzept zu positiven oder negativen Auswirkungen auf die Belastungssituation führen.

Als weiterer limitierender Faktor muss hier die Abhängigkeit der Ergebnisse von der anregenden Welle, angeführt werden. Die Kräfte, die bei der hier betrachteten 28,8 Meter hohen Welle, welche statistisch alle 100 Jahre in den „Forties Fields“ in der Nordsee auftritt, entstehen, können nicht zwangsläufig auf andere Standorte übertragen werden. Die 28,8 Meter hohe Welle stellt für Standorte in europäischen küstennahen Bereichen einen extremen Wert dar, wodurch man mit dieser Herangehensweise auf der sicheren Seite ist.

### **5.3. Relevanz der Simulation für das Space@Sea Projekt und Ausblick**

In diesem Kapitel soll der Zusammenhang der in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse mit dem Space@Sea Projekt hergestellt werden. Außerdem soll eine Empfehlung für die weiteren Schritte, bezugnehmend auf die Auslegung der Verbindungselemente, gegeben werden.

Zuerst soll erwähnt werden, dass der Vorteil, der im Zuge dieser Arbeit erstellten Simulation gegenüber kommerziell verfügbaren Programmen ist, dass die Berechnung deutlich weniger Zeit in Anspruch nimmt. Dieser Vorteil kann genutzt werden, um Parameterstudien durchzuführen, welche aufgrund der großen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten der Parameter meist durch die Rechenzeit begrenzt werden.

Der Geschwindigkeitsvorteil dieser Simulation ist mit einer geringeren Genauigkeit der Simulation verbunden. Um besser abschätzen zu können in welchem Genauigkeitsbereich die Ergebnisse dieser Simulation liegen, ist es sinnvoll diese mit Ergebnissen einer kommerziellen Software, welche im Bereich der Strömungssimulation der Welle genauer arbeitet, zu vergleichen.

Die Simulation kann durch geringe Adaptionen auch zur Untersuchung anderer Verbindungskonzepte verwendet werden. Weiters kann mit dieser Simulation, nach kleinen Anpassungen, auch die Belastung einer Verankerung untersucht werden, beziehungsweise die Zusammenhänge zwischen Verankerung und Verbindungselementen untersucht werden.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lässt sich zudem ableiten, dass das in dieser Arbeit untersuchte Konzept zur Verbindung der Plattformen mit Seilen und Fendern (Konzept 1: Kapitel 3.2.1), nur in Bereichen einsetzbar ist, in denen höhere Wellen ausgeschlossen werden können. Daher ist eine genaue Untersuchung dieses Konzeptes nur dann sinnvoll, wenn die Plattformen ausschließlich hinter separaten Wellenbrechern installiert werden. Für den Fall, dass die Plattformen, ohne zusätzliche Schutzmechanismen, Stürmen standhalten sollen, sollte Konzept 1: Seile und Fender verworfen werden, da die in den Seilen auftretenden Kräfte zu groß sind.

Weiters wurde festgestellt, dass Konzept 2: Federnd gelagerte Seile mit Fendern, welches in Kapitel 4.2.7 numerisch untersucht wurde, auch für Wellenhöhen eines statistisch alle 100 Jahre in der Nordsee vorkommenden Sturms, ohne zusätzliche Schutzmechanismen, geeignet ist. Eine genauere Betrachtung des Systems ist daher vielversprechend. Für eine praktische Durchführung dieses Konzepts wird allerdings unter anderem noch eine detaillierte Betrachtung der Umsetzung der gefederten Lagerung der Seile benötigt.

## Literaturverzeichnis

- [1] M. Flikkema und W. Murtinu – van Schagen, „Space@Sea,“ 2017. [Online]. Available: <https://spaceatsea-project.eu>. [Zugriff am 15 04 2019].
- [2] C. Woernle, Mehrkörpersysteme - Eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper, Rostock: Springer, 2011.
- [3] K. Ellermann, Mehrkörperdynamik Skriptum zur Vorlesung, Graz, 2016.
- [4] R. S. Robert E. Roberson, Dynamics of Multibody Systems, Berlin: Springer, 1988.
- [5] A. A. Shabana, Einführung in die Mehrkörperdynamik, Weinheim: Wiley-VCH, 2016.
- [6] M. E. McCormick, Ocean Wave Energy Conversion, New York: Dover Publications, 1981.
- [7] V.-F. T. V. u. Produktmanagement, „VDI 2220: Produktplanung; Ablauf, Begriffe und Organisation,“ VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, 1980.
- [8] T. J. D. M. Raoof, „Simple determination of the axial stiffness for large-diameter independent wire rope core or fibre core wire ropes,“ Civil and Building Engineering Department, Loughborough University, Loughborough, Leicestershire, UK, 2001.
- [9] Yokohama, „Yokohama,“ Yokohama, [Online]. Available: <https://www.y-yokohama.com/global/product/mb/pneumatic/performance/>. [Zugriff am 25 04 2019].
- [10] M. K. A. Husain, „Determination of the 100-year waveheight for the Forties Fields in the North Sea,“ Department of Engineering University of Liverpool, Liverpool, 2006.
- [11] Teufelberger, „Teufelberger,“ Teufelberger, [Online]. Available: <https://www.teufelberger.com/de/evolution-tk18-oil-gas.html>. [Zugriff am 03 05 2019].
- [12] The MathWorks, Inc., „Mathworks Documentation,“ The MathWorks, Inc., [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>. [Zugriff am 19 05 2019].



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung des Freischnitts einer Plattform, F steht für Kräfte der Verbindungselemente, G für die Gewichtskraft der Plattform und A für die Auftriebskraft des Wassers .....	5
Abbildung 2: Darstellung aller 3 Elementardrehungen mit Kardanwinkeln eines Koordinatensystems. Der Index gibt die Anzahl der bereits durchgeführten Drehungen an. ....	8
Abbildung 3: Visualisierung des Problems des Ausweichens bei Druckbelastung .....	13
Abbildung 4: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit Seilen und Fendern. Seile sind in Gelb visualisiert und Fender in Blau. ....	14
Abbildung 5: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit federnd gelagerten Seilen und Fendern. Seile sind in Gelb visualisiert, Fender in Blau und Feder-Dämpfer-Elemente in Rot. ....	15
Abbildung 6: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit in x-förmig angeordneten Feder-Dämpfer Elementen. Feder-Dämpfer-Elemente in vertikaler X-Anordnung sind in Rot visualisiert und Feder-Dämpfer-Elemente in horizontaler X-Anordnung in Blau. ....	17
Abbildung 7: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen und Fendern. Feder-Dämpfer-Elemente sind in Rot visualisiert und Fender in Blau. ....	18
Abbildung 8: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen und Drehfedern. Feder-Dämpfer-Elemente sind in Rot visualisiert. ....	19
Abbildung 9: Darstellung des Verbindungskonzeptes mit starren Elementen und Drehfedern. Die starren Verbindungselemente sind als schwarze Striche dargestellt. ...	20
Abbildung 10: Visualisierung vom Verbindungskonzept mit Seilen und Fendern beispielhaft dargestellt an vier verbundenen Plattformen .....	23
Abbildung 11: Darstellung der in Simulation verwendete Anordnung der Plattformen, mit Nummerierung der Plattformen und Wellenströmungsrichtung (blauer Pfeil mit Winkel $\Phi$ ). In Rot sind die Plattformen verbindende Seile abgebildet. ....	25
Abbildung 12: Verlauf der z-Koordinate des Schwerpunktes und der Schwerpunktgeschwindigkeit des mittleren (13.) Elements .....	27
Abbildung 13: Verlauf des Winkels ( $\beta$ ) und der Winkelgeschwindigkeit um die y-Achse des Eckelements (1. Element).....	28
Abbildung 14: Verlauf der maximal auftretenden Belastung der Fender bei variierendem Winkel der Strömung der Welle. ....	34
Abbildung 15: Verlauf der maximal auftretenden Belastung der Fender bei variierendem Winkel der Strömung der Welle. ....	34
Abbildung 16: Verlauf der maximal auftretenden Belastung der Seile bei variierendem Plattformabstand. ....	36
Abbildung 17: Verlauf der maximal auftretenden Belastung der Fender bei variierendem Plattformabstand. ....	36
Abbildung 18: Maximal auftretende Belastung der Seile bei unterschiedlichem Dämpfungsgrad der selbigen.....	37

Abbildung 19: Maximal auftretende Belastung der Fender bei unterschiedlichem Dämpfungsgrad der Seile. ....	38
Abbildung 20: Verlauf der Maximalkraft der Verbindungselemente beim Einsatz von mehreren Seilen im Verbund, aufgetragen über Vielfachen von $K_0 = 56.000.000 \text{ N/m}$ ...	39
Abbildung 21: Verlauf der Maximalkraft der Verbindungselemente beim Einsatz von gefedert gelagerten Seilen, aufgetragen über Vielfachen von $K_0 = 56.000.000 \text{ N/m}$ .....	41
Abbildung 22: Verlauf der Maximalkraft in den Seilen bei unterschiedlichen Wellenlängen der Anregung. In Blau: Systemanregung aus der Ruhe, in Orange: Werte für den Eingeschwungen Zustand. ....	43
Abbildung 23: Verlauf der Maximalkraft in den Fendern bei unterschiedlichen Wellenlängen der Anregung. In Blau: Systemanregung aus der Ruhe, in Orange: Werte für den Eingeschwungen Zustand. ....	44

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile des „Seile und Fender“ Konzeptes.....	15
Tabelle 2: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit federnd gelagerten Seilen und Fendern .....	16
Tabelle 3: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen in X-Anordnung .....	17
Tabelle 4: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen und Fendern .....	18
Tabelle 5: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit Feder-Dämpfer Elementen und Drehfedern .....	19
Tabelle 6: Vor- und Nachteile des Konzeptes mit starren Elementen und Drehfedern ...	20
Tabelle 7: Ergebnistabelle der Expertenbewertung nach Schulnotensystem.....	22
Tabelle 8: Maximal auftretende Kräfte in der oberen Reihe der Seile auf der B-Seite der Plattformen. Alle Werte sind in Newton angeben.....	29
Tabelle 9: Maximal auftretende Kräfte in der unteren Reihe der Seile auf der B-Seite der Plattformen. Alle Werte sind in Newton angeben.....	30
Tabelle 10: Maximal auftretende Kräfte in den Fendern auf der A-Seite der Plattformen. Alle Werte sind in Newton angeben. ....	31
Tabelle 11: Maximal auftretender vertikaler Abstand zwischen den Befestigungspunkten der Seile der oberen Reihe der B-Seite der Plattformen. Alle Werte sind in Meter angeben. ....	32
Tabelle 12: Maximale Belastung der Verbindungselemente in Abhängigkeit des Anströmwinkels der Wellen.....	33
Tabelle 13: Maximal auftretende Kräfte in den Verbindungselementen, bei variierendem Plattformabstand. Alle Werte sind in Newton angeben. ....	35
Tabelle 14: Maximal auftretende Kräfte in den Verbindungselementen, bei variierender Dämpfungskonstante der Seile. Alle Werte sind in Newton angeben. ....	37
Tabelle 15: Maximale, auf die Verbindungselemente wirkende, Kräfte beim Einsatz von mehreren Seilen im Verbund ( $K_0 = 56.000.000 \text{ N/m}$ ). Alle Werte sind in Newton angeben. ....	39
Tabelle 16: Maximale auf die Verbindungselemente wirkende Kräfte beim Einsatz von gefedert gelagerten Seilen. ( $K_0 = 56.000.000 \text{ N/m}$ ) Alle Werte sind in Newton angeben.	40
Tabelle 17: Vergleich der maximal auf die Verbindungselemente wirkenden Kräfte eines Systems mit vorgespannten Verbindungselementen und eines ohne Vorspannung. ....	42
Tabelle 18: Vergleich der maximal auf die Verbindungselemente wirkenden Kräfte bei unterschiedlichen Wellenlängen der Anregung .....	42
Tabelle 19: Vergleich der Ergebnisse, der Berechnung, der maximalen Kräfte in den Fendern mit unterschiedlichen numerischen Lösungsverfahren. Alle Werte sind in Newton angeben. ....	45

Tabelle 20: Vergleich der Ergebnisse, der Berechnung, der maximalen Kräfte in den Seilen, der oberen Reihe mit unterschiedlichen numerischen Lösungsverfahren. Alle Werte sind in Newton angegeben. .... 45

Tabelle 21: Prozentuell Abweichung der Ergebnisse der Berechnung der maximalen Kräfte in den Seilen der oberen Reihe mit unterschiedlichen numerischen Lösungsverfahren, im Vergleich mit dem ODE 45 Solver. .... 45