

**DYNAMISCHES POSITIONIEREN ALS ASPEKT
IN DER FRÜHEN SCHIFFSENTWURFSPHASE**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Adele Lübcke

aus
Schwerin

2019

Vorsitzender des Prüfungsausschusses:

Prof. Dr.-Ing. Friedrich Wirz

Gutachter:

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud

Tag der mündlichen Prüfung:

01.02.2019

© Schriftenreihe Schiffbau der
Technischen Universität Hamburg
Am Schwarzenberg-Campus 4 (C)
21073 Hamburg
<https://www.tuhh.de/vss/>

Bericht-Nr.: 711

ISBN 978-3-89220-711-5

Danksagung

Mit der Fertigstellung meiner Dissertation möchte mich besonders bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger bedanken, der mich in all den Jahren zunächst als Student, später als wissenschaftliche Mitarbeiterin und auch über die Zeit am Institut hinaus immer gefordert und gefördert hat.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Abdel-Maksoud für die Betreuung meiner Arbeit als zweiter Gutachter und Prof. Friedrich Wirz als Vorsitzenden des Promotionsverfahrens.

Danken möchte ich außerdem meinen ehemaligen Kollegen, die mich alle auf ihre individuelle Art fachlich und menschlich im Rahmen meiner Dissertation unterstützt und mich hervorragend auf die Herausforderungen im Werftalltag vorbereitet haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinen Freunden, die mich auf meinem Weg durch das Studium und während der Erarbeitung meiner Dissertation begleitet haben. Dank eurer Motivation und eurer Unterstützung habe ich nie daran gezweifelt, diese Arbeit trotz aller schwieriger Umstände auch zum Abschluss zu bringen.

Kurzfassung

Für den Ausbau der Windenergieerzeugung auf hoher See werden neue Schiffstypen benötigt. In diesem Zusammenhang hat die Fähigkeit des dynamischen Positionierens als neuer elementarer Entwurfsaspekt an Bedeutung gewonnen. Mit der vorliegenden Arbeit werden zwei Methoden für den frühen Schiffsentwurf vorgestellt, um die Fähigkeit des Schiffes zum Halten der Position zu bewerten. Zur Verbesserung der Berechnungen werden Interaktionseffekte berücksichtigt, die mithilfe von Modellversuchen untersucht worden sind.

Abstract

Due to the expansion of offshore wind power generation new types of ships are needed. In this context, the capability of the dynamic positioning gains in importance as a new elementary design aspect. In the present work, two methods are presented to benchmark the ability to keep the vessel's position in the early design stage of ships. In order to improve the calculations interaction effects are taken into account, which have been studied by using model tests.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis		XI
Tabellenverzeichnis		XII
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis		XVI
1 Einleitung		1
1.1 Hintergrund		1
1.2 Positionshalten		3
1.3 Zielsetzung der Arbeit		4
1.4 Beispielschiff		6
2 Grundlegende Betrachtung des dynamischen Positionierens		8
2.1 Stand der Wissenschaft und Technik		8
2.1.1 Vergleich bestehender Schiffe		9
2.1.2 Betrachtung im Zeitbereich		12
2.1.3 DP-Fähigkeit in der frühen Schiffsentwurfsphase		13
2.2 Statische Betrachtung des DP-Vorgangs		13
2.2.1 Konventionelles Antriebskonzept		14
2.2.2 Schiffe mit nachgerüstetem DP-System		17
2.2.3 Antriebskonzept mit drehbaren Strahlern		17
2.2.4 Berechnung der DP-Fähigkeit für verschiedene Begegnungswinkel		18
2.3 Dynamische Betrachtung des DP-Vorgangs		19
2.4 Berücksichtigung der Fehlerszenarien		20
3 Berechnung der hydrodynamischen Kräfte		22
3.1 Berechnung der Rumpfkräfte		22
3.1.1 Bestimmung des Querwiderstandsbeiwertes		24
3.1.2 Validierung der Berechnungsmethoden		26
3.2 Bestimmung der Propellerkräfte		31
3.2.1 Verstellpropeller		31
3.2.2 Festpropeller		32

3.2.3	Azimuth-Antrieb	32
3.3	Ruderkraftberechnung	33
3.4	Querstrahlruder	35
4	Beeinflussung der hydrodynamischen Kräfte durch Interaktionseffekte	36
4.1	Interaktionen am Schiffsrumpf	37
4.1.1	Querstrahlruder	38
4.1.2	Propellerkräfte und Schultermoment	43
4.1.3	Drehbare Strahler	47
4.2	Interaktion durch die Schiffsbewegung und Strömung	49
4.2.1	Querstrahlruder	49
4.2.2	Drehbare Strahler	51
4.3	Interaktion durch Seegang	52
5	Umwelkräfte als Basis für die Berechnungsmethoden	53
5.1	Berechnung der Windkräfte	54
5.1.1	Beschreibung der Windgeschwindigkeit im Zeitbereich	55
5.1.2	Beschreibung der Windrichtung im Zeitbereich	58
5.1.3	Berechnung der Windkräfte im Zeitbereich	58
5.2	Berechnung der Wellendriftkräfte und -momente	60
5.2.1	Berechnungen im Frequenzbereich	61
5.2.2	Berechnungen im Zeitbereich	63
5.2.3	Mittlere Wellendriftkraft	65
5.2.4	Einfluss des Seegangsspektrums auf die Wellendriftkräfte	66
5.3	Berechnung der Strömungskräfte	68
6	Dynamisches Positionieren im Zeitbereich	69
6.1	Modell zur Bestimmung der Schiffsbewegung	69
6.2	Berücksichtigung der Maschinenanlage und Automation	71
6.2.1	Hauptmaschine	73
6.2.2	PTO-Generatoren/ Elektrischer Antrieb	75
6.3	Positions-Kontrollsystem	75
7	Einfluss von DP-Systemen auf den Schiffsentwurf	82
7.1	Einfluss des Überwasserschiffes	83
7.2	Bewertung verschiedener Propulsionskonzepte	85

7.3	Auswirkungen von Fehlerszenarien auf die DP-Fähigkeit	87
7.4	Beurteilung der DP-Operation unter realen Bedingungen	88
8	Zusammenfassung und Ausblick	90
8.1	Zusammenfassung	90
8.2	Ausblick	92
	Literatur	99
	Anhang	101
A	Lebenslauf	101

Abbildungsverzeichnis

1	Genehmigte und geplante Offshore-Windparks nach Angaben der <i>Stiftung Offshore Windenergie (2014)</i>	1
2	Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren.	3
3	Seitenansicht des Offshore-Service-Schiffes.	7
4	Darstellung der DP-Fähigkeit für das Beispielschiff.	12
5	Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren eines Schiffes mit Zwei-Propeller-Anlage und Bugstrahlruder.	14
6	Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren eines Schiffes mit Zwei-Propeller-Anlage und Bugstrahlruder unter Berücksichtigung der Ruder.	15
7	Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren eines Schiffes mit Zwei-Propeller-Anlage und Bug- und Heckstrahlruder unter Berücksichtigung der Ruder.	16
8	Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren für ein Schiff mit nachgerüstetem DP-System.	17
9	Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren für ein Schiff mit drehbaren Strahlern.	18
10	Darstellung der Kräfte beim dynamischen Positionieren des Beispielschiffes für einen Winkel von 140° und einer Windgeschwindigkeit von 23,44 m/s.	20
11	DP-Fähigkeit bei Ausfall einer jeweils einer aktiven Komponente des Propulsionssystems des Beispielschiffs.	21
12	Beispielhafte Darstellung verschiedener Spantgeometrien und Recherchegebietes nach <i>Brütt (2015)</i>	24
13	Querwiderstandsbeiwerte aus den RANSE-Berechnungen.	25
14	Querwiderstandsbeiwerte mit spantformabhängiger Korrektur und Ausgleichsfunktion nach Gleichung 20.	26
15	Vergleich der Querwiderstandsbeiwerte - Regressionsformel, RANSE-Berechnung nach <i>Brütt (2015)</i> und Modellversuche.	28

16	Vergleich der Querkraft zwischen der Berechnungsmethode und den Ergebnissen der Modellversuche (Modell 1).	29
17	Vergleich der Querkraft zwischen der Berechnungsmethode und den Ergebnissen der Modellversuche (Modell 2).	30
18	Vergleich der Querkraft zwischen der Berechnungsmethode und den Ergebnissen der Modellversuche (Modell 3).	30
19	Freifahrt diagramm für einen Verstellpropeller.	31
20	Paneelgitter eines Ruders mit einem Anstellwinkel von 20° und einem festen Skeg mit Nachlaufpaneele (links) und Darstellung der zugehörigen Druckverteilung für das Beispielschiff bei einer Geschwindigkeit von 10kn (rechts).	33
21	Ruderquerkräfte als Funktion des Propellerschubes unter Pfahlzugbedingungen.	34
22	Versuchsanordnung und Ansicht des Hinterschiffs, aufgenommen von <i>MARIN (2013)</i>	37
23	Interaktionseffekte am Querstrahlruder.	38
24	Anordnung der Bugstrahlruder: Konfiguration 1 (links) mit drei Bugstrahlrudern und Konfiguration 2 (rechts) mit drei Bugstrahlrudern.	39
25	Interaktion der Bugstrahlruder.	39
26	Interaktion der Heckstrahlruder.	40
27	Einbaurichtung der Gondel des Bugstrahlruders.	41
28	Verschiebung des Kraftangriffspunktes der Bugstrahlruder.	42
29	Verschiebung des Kraftangriffspunktes der Heckstrahlruders.	42
30	Druckfelder auf den Rumpf mit nach außen drehenden (rechts oben) and nach innen drehenden (rechts unten) Festpropellern.	45
31	Interaktionen der Propeller.	46
32	Interaktion von drehbaren Strahler bei seitlicher Beeinflussung nach <i>Lehn (1980)</i>	48
33	Interaktion von drehbaren Strahler zueinander nach <i>Lehn (1980)</i>	49
34	Schubverluste durch Strömung nach <i>Brix (1993)</i>	50
35	Schubverluste durch Strömung nach <i>Cozjin et al. (1999)</i>	52
36	Verwendetes Koordinatensystem.	53

37	Windkräfte und -giermoment für ein Offshore-Versorgungsschiff nach <i>Blendermann (1993)</i>	55
38	Davenport-Spektrum zur Beschreibung der Windgeschwindigkeit.	56
39	Zeitlicher Verlauf der Windgeschwindigkeit für $\overline{v_w} = 6,84 \frac{m}{s}$, gemessen (rot) und berechnet (grün).	57
40	Energiedichtespektrum für die Windrichtung.	59
41	Zeitlicher Verlauf der Windrichtung für $\overline{v_w} = 6,84 \frac{m}{s}$, gemessen (rot) und berechnet (grün).	59
42	Windkräfte in Längs- und Querrichtung im Zeitbereich.	60
43	Koordinatensystem zur Beschreibung der Wellenkräfte.	61
44	Ergebnisse des Beispielschiffes der Wellendriftkraft in Querrichtung im Frequenzbereich.	62
45	Wellendriftkräfte in Längs- und Querrichtung für das Beispielschiff.	66
46	Zusammenhang zwischen signifikanter Wellenhöhe und mittlerer Wellenperiode.	67
47	Wellendriftkräfte für verschiedene Zusammenhänge von signifikanter Wellenhöhe und mittlerer Wellenperiode für das Beispielschiff.	67
48	Vereinfachte Darstellung des verwendeten Manövriermodells nach <i>Haack (2006)</i>	70
49	Regelungssystem der Maschinen- und Propulsionsanlage nach <i>Haack (2006)</i> , angepasst für DP-Operationen.	72
50	Blockschaltbild des Anlagenmodells nach <i>Haack (2006)</i>	72
51	Normiertes Maschinenkennfeld eines 4-Takt-Motors nach <i>Haack (2006)</i>	74
52	Vereinfachte Darstellung des Regelkreises zur Positionsregelung.	75
53	Zeitlicher Verlauf der y-Position mit einer Regelung mit kritischem Proportionalanteil und PD-Regelung nach <i>Ziegler und Nichols (1952)</i> für das Beispielschiff.	78
54	Zeitlicher Verlauf der Kräfte in y-Richtung mit einer Regelung mit kritischem Proportionalanteil für das Beispielschiff.	78
55	Zeitlicher Verlauf der x-Position mit einer Regelung mit kritischem Proportionalanteil und PD-Regelung nach <i>Ziegler und Nichols (1952)</i> für das Beispielschiff.	79
56	Zeitlicher Verlauf der Kräfte bei Umweltbedingungen im Zeitbereich für das Beispielschiff.	80

57	Zeitlicher Verlauf der Position, der Geschwindigkeit, des Gierwinkels und der Drehzahl bei Umweltbedingungen im Zeitbereich für das Beispielschiff.	81
58	Seitenansicht: Deckshaus vorne (oben) und hinten (unten).	83
59	DP-Fähigkeit bei verschiedenen Windlateralfächern.	85
60	DP-Fähigkeit bei verschiedenen Propulsionskonzepten.	86
61	DP-Fähigkeit bei Fehlerszenarien jeweils einer aktiven Komponente.	87
62	Zeitlicher Verlauf der Kräfte.	89
63	Zeitlicher Verlauf der y-Position.	89

Tabellenverzeichnis

1	Hauptabmessungen des Offshore-Service-Schiffs.	6
2	Zusammenhang von Wellenhöhe, Wellenperiode und Windgeschwindigkeit nach <i>IMCA (2000)</i>	10
3	Hauptabmessungen der Modelle (<i>HSVA (2015)</i>).	27
4	Querwiderstandsbeiwerte der Modelle (<i>HSVA (2015)</i>).	27
5	Querwiderstandsbeiwerte der Modelle (<i>HSVA (2015)</i>).	29
6	Hauptabmessung und Antriebskonzept (<i>MARIN (2013)</i>).	36
7	Verwendete Faktoren für die Beschreibung der Interaktionen an den Querstrahlrudern.	43
8	Verhältnis der Propellerdrehzahl bei Vor- und Rückwärtsschub. . .	44

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A_{Front}	Windlateralfläche
A_{Seite}	Windlateralfläche (Seitensicht)
A_{x0}	Fläche des mit Wasser benetzten Spiegels im Glattwasser
a, b, c	Koeffizienten des Energiedichtespektrums der Windrichtung
c_D	Querwiderstandsbeiwert
$C_{x,y,z}$	Windwiderstandskoeffizient für jede Richtung
d	Lokaler Tiefgang am betrachteten Spant
F	Kraftvektor, allgemein
F_{Umw}	Vektor der Umweltkräfte
$H_{1/3}$	Signifikante Wellenhöhe
I_z	Trägheitsmoment um die z-Achse
K	Faktor des Davenportspektrums
k_1	1. Korrektur der 3d-Umströmung
k_2	2. Korrektur der 3d-Umströmung
L	Schiffslänge
m	Schiffsmasse
m_x	Hydrodynamische Zusatzmasse pro Länge in Längsrichtung
N_{Wind}	Windgiermoment

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

\hat{p}_w	Komplexe Amplitude des Druckes auf Höhe der mittleren Wasseroberfläche
r	Drehrate
R_F	Reibungswiderstand des Schiffes
R_T	Schiffswiderstand
S	Energiedichtespektrum
t	Zeit
T_1	Mittlere Wellenperiode
T_p	Peakperiode
T_{Prop}	Vektor der Propulsionskräfte
u_S	Schiffsgeschwindigkeit in Längsrichtung
v_S	Schiffsgeschwindigkeit in Querrichtung
v_w	Windgeschwindigkeit
\vec{x}_G	Vektor des Gewichtsschwerpunktes
X_D	Faktor des Davenportspektrums
x_G	Gewichtsschwerpunkt in Längsrichtung
X_{vv}, X_{rr}, X_{vr}	Manövrierkoeffizienten
X_{Wind}	Windlängskraft
X, Y, N	Rumpfkkräfte für jede Richtung
x, y, z	Koordinatensystem
\hat{Y}_{1s}	Komplexe Übertragungsfunktion der Längsbewegung des Gewichtsschwerpunktes des Schiffes
\hat{Y}_{2s}	Komplexe Übertragungsfunktion der Querbewegung des Gewichtsschwerpunktes des Schiffes

\hat{Y}_{3s}	Komplexe Übertragungsfunktion der Tauchbewegung des Gewichtsschwerpunktes des Schiffes
\hat{Y}_4	Komplexe Übertragungsfunktion der Rollbewegung
\hat{Y}_5^*	Konjugiert-komplexe Übertragungsfunktion der Stampfbewegung
\hat{Y}_6^*	Konjugiert-komplexe Übertragungsfunktion der Gierbewegung
\hat{Y}_{zr}	Komplexe Übertragungsfunktion der vertikalen Relativbewegung zwischen Schiff und der Wasseroberfläche am Schiff
Y_{Wind}	Windquerkraft
y_w^+	Absolutwert der Wasserlinienbreite
z_{x0}	Vertikale Koordinate vom Mittelpunkt der Spiegelfläche

Griechische Buchstaben

α^2	Driftkraftbeiwert
α_0^2	Mittlerer Driftkraftbeiwert
α_w	Windangriffswinkel
ϵ	Phasenverschiebung eines Winkels
μ	Hydrodynamische Zusatzmasse pro Länge in Querrichtung
ω	Kreisfrequenz
ω_e	Begegnungsfrequenz zwischen Welle und Schiff
Ψ	Kurswinkel des Schiffes
ρ_L	Dichte der Luft
ρ_W	Dichte des Seewassers

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

$\hat{\zeta}$	Komplexe Wellenamplitude
ζ	Reale Wellenamplitude
ζ_a	Reale Wellenamplitude einer Elementarwelle

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Mit der Entscheidung der deutschen Bundesregierung zum Ausstieg aus der Atomkraft sind erneuerbare Energien ein wesentlicher Bestandteil zur Sicherung der Energieversorgung in Deutschland. Nach Angaben des *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017)* beläuft sich der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien momentan auf etwa 30 %. Zu den erneuerbaren Energieträgern zählen Windkraft, Wasserkraft, Photovoltaik und auch die Nutzung von Biomasse und Hausmüll. Einen großen Anteil stellt die Windkraft mit 12 % dar. Die Erzeugung von Strom mit Hilfe von Windkraft kann sowohl an Land als auch auf hoher See erfolgen. Im Jahr 2010 ist die Offshore-Windenergieerzeugung mit der Inbetriebnahme des Offshore-Windparks „alpha ventus“ als kommerzielles Testobjekt gestartet. Um einen Eindruck über den Umfang der geplanten und vorhandenen Windparks zu bekommen, sind diese in Abbildung 1 für den relevanten Bereich der Nord- und Ostsee dargestellt. Die Offshore-Windparks liegen zumeist außerhalb der 12-Meilen-Zone im deutschen Hoheitsgebiet.



Abbildung 1: Genehmigte und geplante Offshore-Windparks nach Angaben der *Stiftung Offshore Windenergie (2014)*.

1.1 Hintergrund

Die Windenergieerzeugung auf hoher See stellt nicht nur an die Windkraftanlagen, sondern auch an den Bau und die Erschaffung der zugehörigen Infrastruktur neue Herausforderungen. Aufgrund der geografischen Lage ergeben sich Wassertiefen von 20 bis 50 Metern bei einer Entfernung von der Küste von 30 bis 100 Kilometern. Um den Ausbau der Offshore-Windenergie weiter voran zu treiben und umzusetzen, werden Schiffe benötigt, die das Aufstellen der Windenergieanlagen, die Anbindung ans Landstromnetz und die Wartung der Anlagen ermöglichen.

Die Realisierung dieser Aufgaben führte in den letzten Jahren zu neuen Entwicklungen in der Schiffbaubranche. In den Anfängen wurden für die Installation der Windenergieanlagen zunächst noch Hubinseln eingesetzt, die mit Hilfe von Schleppern auf Position gebracht werden. Aufgrund der großen Entfernung zu den Häfen war dieses Vorgehen nicht wirtschaftlich. Weiterhin stießen die Hubinseln bei größeren Wassertiefen und den rauen Umweltbedingungen schnell an ihre Einsatzgrenzen.

Im nächsten Schritt wurden umgebaute Frachtschiffe eingesetzt, die zusätzlich mit einem Hubsystem, bestehend aus elektrisch oder hydraulisch betriebenen Beinen, ausgestattet wurden. Durch die verhältnismäßig geringen Krankapazitäten war ihre Einsatzfähigkeit stark begrenzt.

Aus diesen Erfahrungen entstand ein neuer Schiffstyp. Bereits in der Planungsphase konnten die Anforderungen an das Schiff berücksichtigt werden. Zu den wichtigsten Aspekten zählen die ausreichende Krankapazität, ein System zum Halten der Position und auch eine möglichst große Decksfläche. In *Vorhölter et al. (2012)* und *Hochhaus (2012)* werden die neuen Anforderungen und mögliche Lösungen beschrieben.

Neben den Schiffen für die Installation der Windkraftanlagen haben sich noch weitere Schiffstypen entwickelt, um eine funktionierende Infrastruktur für die Offshore-Windparks zu gewährleisten. Dazu zählen unter anderem Schiffe für die Unterkunft der Installateure, Versorgungseinheiten und Kabellegerschiffe zur Erstellung der Landstromanbindung. Auch diese Schiffstypen benötigen die Fähigkeit, ihre Position zu halten, um die genannten Arbeiten durchzuführen.

1.2 Positionshalten

Das Halten der Position beschreibt die Fähigkeit eines Schiffes, einen Referenzpunkt und den Kurswinkel zu halten. Eine Positions- und Kurswinkelabweichung wird durch auf das Schiff wirkende äußere Lasten verursacht. Um dem entgegen zu wirken, bestehen im Wesentlichen zwei Möglichkeiten: Das Schiff wird mit einem Ankersystem auf Position gehalten. Die Alternative besteht darin, das Antriebssystem zu nutzen. Die Wahl des Systems zum Halten der Position hängt von der Aufgabe, dem Einsatzgebiet und der Dauer des Einsatzes ab.

Für kurze Einsatzzeiten stellt das Positionshalten mit dem eigenem Antriebssystem die bevorzugte Wahl dar. Diese Fähigkeit wird als „*dynamisches Positionieren*“ (DP) bezeichnet. Es wird durch den Gleichgewichtszustand von äußeren Lasten und den Kräften des Propulsionssystems mit Gleichung 1 beschrieben.

$$\Sigma \vec{F} = 0 = \vec{F}_{Umw} + \vec{F}_{Prop} \quad (1)$$

Bei den äußeren Lasten handelt es sich um Umweltkräfte, die durch Wind, Seeegang und Strömung verursacht werden. Um das Kräftegleichgewicht zu gewährleisten, ist die Kombination unterschiedlichster Propulsionskomponenten denkbar. Beispielhaft zeigt Abbildung 2 eine vereinfachte Darstellung für ein Schiff mit Zweischauber-Antrieb und Bug- und Heckstrahler.

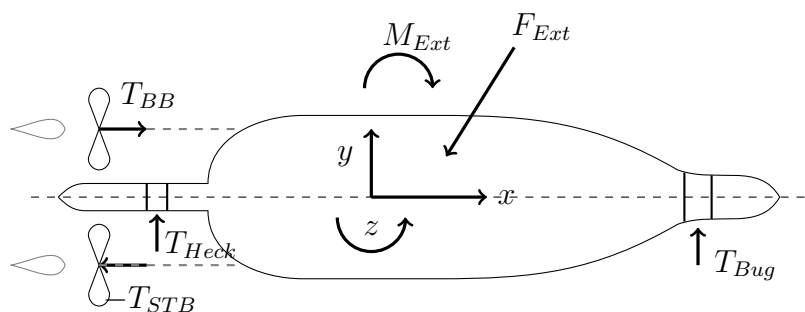


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Als typische Anwendungen für dynamisches Positionieren können folgende Beispiele genannt werden:

- Kranoperationen
- Jacking-Operationen
- virtuelles Ankern

Folglich benötigen sämtliche Schiffe, die in Offshore-Windparks im Einsatz sind, die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Für die Umsetzung der Energiewende und die Errichtung von Offshore-Windparks werden neuartige Schiffe benötigt, die die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren besitzen müssen. Um diese Eigenschaft sinnvoll in ein Schiff zu integrieren, ist eine frühzeitige Einbindung dieser Problematik in den Schiffsentwurfsprozess notwendig. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, wird ein schnelles, stabiles und annähernd genaues numerisches Berechnungsverfahren zur Bewertung der Fähigkeit zum dynamischen Positionieren benötigt. Die Entwicklung dieses Verfahrens ist Ziel der vorliegenden Arbeit.

Mit dem Verfahren soll die Lücke zwischen den Herstellern von DP-Systemen und dem frühen Schiffsentwurf geschlossen werden. Für die Bewertung der DP-Fähigkeit müssen folgende Fragen zuverlässig beantwortet werden können:

- Wo liegen die Einsatzgrenzen des Schiffes beim dynamischem Positionieren?
- Welches Propulsionskonzept ermöglicht die geforderten Einsatzgrenzen?

Die Umsetzung erfordert Berechnungen auf Grundlage der Daten des Schiffes, die bereits im frühen Schiffsentwurf feststehen. Modellversuche und aufwändige, zeitintensive Simulationen mit viskosen Verfahren sind für die Beantwortung der Frage nicht sinnvoll, da im frühen Schiffsentwurf der Vergleich verschiedener Varianten sowie die Optimierung des Systems möglich sein müssen.

Prinzipiell wird eine Unterscheidung zur Bewertung und Vorhersage des dynamischen Positionieren in eine vereinfachte statische Methode und ein Verfahren im Zeitbereich vorgenommen.

Für beide Berechnungsverfahren wird eine Formulierung der Umweltkräfte benötigt. Als Teil der Fragestellung wird auch hierfür eine Beschreibung der Wind-, Wellen- und Strömungskräfte jeweils für die zwei verschiedenen Betrachtungsweisen gegeben. Ziel ist es, ein Berechnungsverfahren zu nutzen bzw. zu entwickeln, welche alle wichtigen Parameter eines Schiffes berücksichtigt. Dazu zählt unter anderem die Rumpfform, die Beladung, das Propulsionssystem, die Maschinenanlage und das Automationssystem.

Dem statischen Verfahren liegen zeitlich konstante Umweltkräfte zugrunde. Folglich sind auch die Kräfte der Propulsionskomponenten konstant. Dieses Gleichgewicht ergibt sich aus dem maximalen Schub der einzelnen Propulsionskomponenten und gibt zunächst eine Aussage über die maximal zulässigen Umweltkräfte. Diese Methode zielt auf den Vergleich verschiedener Antriebskonzepte und lässt eine qualitative Bewertung des Propulsionssystems zu.

Die zweite Möglichkeit stellt reale Bedingungen dar, indem die Umweltlasten als zeitlich veränderlich berücksichtigt werden. Bei dieser Methode ist nicht nur der maximale Schub der einzelnen Propulsionskomponenten entscheidend, sondern auch die Maschinendynamik von Bedeutung, also die Zeit zur Veränderung der Schübe. Dafür wird eine Regelung des DP-Systems abhängig von der Position des Schiffes entwickelt. Folglich sind Aussagen über das reale Verhalten des Schiffes und die zugehörigen Positionsabweichungen während der DP-Operation schon im frühen Schiffsentwurf möglich.

Ein weiterer Aspekt für eine verbesserte Aussage über die DP-Fähigkeit ist die Berücksichtigung von Interaktionseffekten. Beispielsweise wird der Schub der Propulsionskomponenten durch Strömung reduziert. Aber auch der Rumpf hat einen Einfluss auf den resultierenden Schub. Um die Qualität der Ergebnisse zu verbessern, werden Modelle entwickelt, die diese Effekte beim dynamischen Positionieren mit einbeziehen.

1.4 Beispielschiff

Um den Zusammenhang von Schiffsentwurf und der Fähigkeit zum dynamischen Positionieren zu verdeutlichen, werden anhand eines Beispielschiffes die Wechselwirkungen mit Hilfe der entwickelten Berechnungsverfahren aufgezeigt. Dabei werden verschiedene Entwurfparameter, wie die Lage des Deckshauses und die Wahl des Propulsionskonzeptes, variiert und deren Einfluss auf die DP-Fähigkeit verglichen.

Das Verfahren wird in der Schiffsentwurfsumgebung E4 implementiert. Die Software wird am Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit der Technischen Universität Hamburg-Harburg gemeinsam mit Partnern aus der deutschen Schiffbauindustrie, unter anderem der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG, entwickelt. Diese Umgebung bietet direkten Zugriff auf das Datenmodell des kompletten Schiffes. Weiterhin enthält es bereits eine Vielzahl implementierter Rechenalgorithmen. Eine detailliertere Beschreibung der Schiffsentwurfsumgebung E4 kann in *Krüger et al. (1999)* gefunden werden.

1.4 Beispielschiff

Die vorgestellten Berechnungsmethoden werden anhand eines Beispielschiffes vorgestellt und erprobt. Bei dem Projekt handelt es sich um ein Serviceschiff für Offshore-Windparks, welches für kleinere Transportaufgaben und die Unterkunft der Installateure auf hoher See zur Verfügung steht. Um die genannten Aufgaben zu erfüllen, haben sich die folgenden Hauptabmessungen ergeben.

Tabelle 1: Hauptabmessungen des Offshore-Service-Schiffs.

Länge über Alles	79,00 m
Länge zw. den Loten	71,80 m
Breite auf Spanten	17,90 m
Entwurfstiefgang	5,80 m

Das Schiff bietet für 60 Techniker und die Crew ausreichend Platz. In Abbildung 3 ist die Seitenansicht des Offshore-Service-Schiffs dargestellt. Bei diesem

Schiffsentwurf ist das Deckshaus vorne angeordnet. Die freie Decksfläche und der Kran findet achtern Platz.

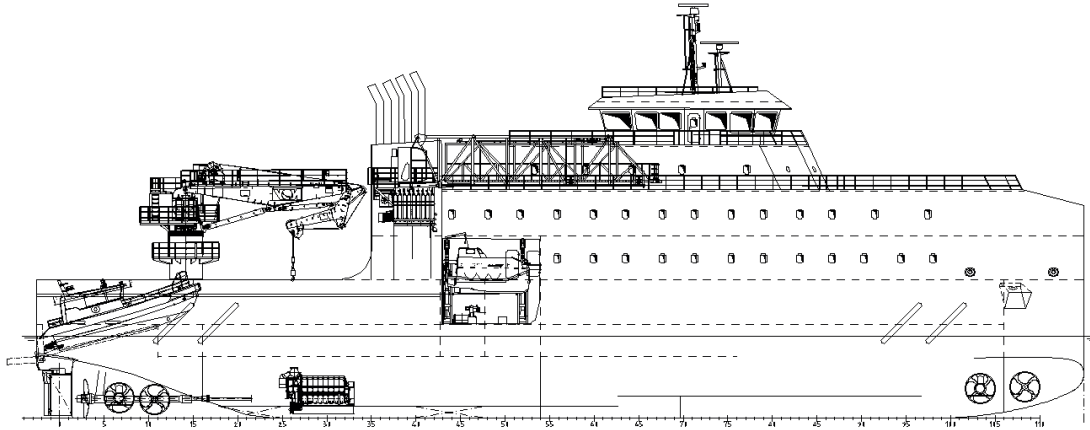


Abbildung 3: Seitenansicht des Offshore-Service-Schiffes.

Aufgrund der Art und der Dauer der Einsätze wird die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren benötigt. Die DP-Fähigkeit kann mit verschiedenen Propulsionskonzepten realisiert werden. In der Seitenansicht ist zunächst ein Konzept mit einer Zwei-Propeller-Anlage mit je zwei Querstrahlruder im Bug- und Heckbereich vorgesehen.

Als Besonderheit dieses Schiffes ist die Gangway für den Übertritt der Techniker vom Schiff zu den Windkraftanlagen zu nennen. Für dieses Manöver ist speziell die Fähigkeit des dynamischen Positionierens von großer Bedeutung, da die Positionsabweichung $\pm 0,5$ m nicht überschreiten darf.

2 Grundlegende Betrachtung des dynamischen Positionierens

Um die Bedeutung von Systemen zum dynamischen Positionieren im Schiffsentwurf zu beurteilen, wird in diesem Kapitel die grundlegende Betrachtung des dynamischen Positionierens vorgestellt. Zunächst wird der Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben. Im nächsten Abschnitt wird die statische Berechnungsmethode für verschiedene Propulsionskonzepte vorgestellt, um die Beurteilung des Systems vorzunehmen. Anschließend wird eine genauere Herangehensweise gezeigt. Zum Ende des Kapitels wird die Berücksichtigung von Fehlerszenarien dargestellt.

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Dynamisches Positionieren beschreibt die Fähigkeit eines Schiffes, mit Hilfe des eigenen Antriebskonzepts die Position und den vorgegebenen Kurswinkel oder einen vorgegebenen Kurs entgegen angreifender äußerer Lasten zu halten. Mit äußeren Lasten sind Umweltkräfte gemeint, die durch Wind, Wellen und Strömung verursacht werden. Das System zum dynamischen Positionieren (*kurz: DP-System*) besteht aus den folgenden Komponenten:

- Das *Stromversorgungssystem* wird durch die Hauptmaschinen, die Hilfsmotoren, Generatoren, die Schalttafeln und die Verteilerkomponenten gewährleistet. Es beinhaltet auch das Automationssystem mit der Drehzahl- und Steigungsregelung.
- Das *Antriebssystem* besteht je nach Wahl des Propulsionskonzepts beispielsweise aus den Hauptpropellern, Querstrahlrudern, Rudern und drehbaren Strahler.
- Das *Positionskontrollsystem* ist die Komponente, die sich aus der Kopplung von Sensoren, einem Referenzsystem und einem Darstellungssystem zusammensetzt.

Diese Definition ist auch in den Richtlinien für Schiffe mit dynamischen Positioniersystemen von der *IMO (1994)* gegeben. Eine ähnliche Beschreibung ist auch

im MODU-Code (*IMO (2008)*) zu finden.

Bei der Bewertung von DP-Systemen sind die folgenden drei Aspekte von Bedeutung:

- Der *Vergleich bestehender Schiffe* wird mit einer statischen Methode vorgenommen. Diese ist in internationalen Empfehlungen und in Klassifikationsvorschriften beschrieben.
- Die *Betrachtung des DP-Problems im Zeitbereich* stellt eine genauere Herangehensweise dar und dient zur konkreten Planung kritischer Situationen und zur Entwicklung der Positionskontrollsysteme sowie des Automationssystems (Drehzahl- und Steigungs-Regelung).
- Im *Schiffsentwurf* muss der Aspekt des dynamischen Positionierens bereits frühzeitig bei der Entwicklung des Konzeptes berücksichtigt werden, wenn die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren bauvertragsrelevant ist. Dazu werden die beiden vorher genannten Betrachtungsweisen herangezogen.

In den folgenden Abschnitten werden die Aspekte vorgestellt.

2.1.1 Vergleich bestehender Schiffe

Die Bewertung eines Systems zum dynamischen Positionieren wird zunächst mit Hilfe des statischen Gleichgewichts aus den Umweltlasten und den Propulsionskräften vorgenommen. Hierbei stellen die Propulsionskräfte, begrenzt durch die zur Verfügung stehende Leistung, die limitierende Größe dar.

Nach internationalen Empfehlungen wird die sogenannte ERN, *Environmental Regularity Number (IMCA (2000))* genutzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Wind, die Strömung und die Wellen mit konstanter Größe seitlich auf das Schiff, also senkrecht zur Schiffslängsachse, wirken. Abhängig von der installierten Leistung der Propulsionskomponenten, die die Querkraft erzeugen, ergibt sich daraus die maximal zulässige Umweltlast.

Nach den Empfehlungen der International Marine Contractors Association (*IMCA (2000)*) ergibt sich der Anteil für die anzusetzende Strömung aus einer konstanten Geschwindigkeit von 0,75 m/s. Die Kraftanteile aus der Windgeschwindigkeit

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik

und dem Seegang, definiert durch die Wellenhöhe und -periode, sind gekoppelt und werden iterativ ermittelt. Die Korrelation von Windgeschwindigkeit und Wellenparameter wird nach *IMCA (2000)*, wie in Tabelle 2 dargestellt, vorgenommen. Die Klassifikationsgesellschaften geben ein ähnliches Vorgehen an (z. Bsp. *DNVGL (2015)*).

Tabelle 2: Zusammenhang von Wellenhöhe, Wellenperiode und Windgeschwindigkeit nach *IMCA (2000)*.

$H_{1/3}$ [m]	T_z [s]	T_p [s]	v_w [m/s]	ERN [-]
1.78	4.89	6.26	5	20
3.21	6.57	8.41	10	60
5.07	8.25	10.56	15	90
7.26	9.87	12.64	20	98
9.75	11.44	14.65	25	99

Ein weiterer Aspekt zum Vergleich der DP-Systeme bestehender Schiffe erfolgt mit der qualitativen Unterteilung in verschiedene DP-Klassen. Beispielsweise nehmen die *IMCA (2000)* und Klassifikationsgesellschaften wie der *DNVGL (2015)* eine Einstufung von DP-Systemen abhängig von der Redundanz der Komponenten vor. Das betrifft die Redundanz aller aktiven Propulsionskomponenten. Weiterhin kann die Maschinenanlage redundant ausgelegt werden. Die höchste Sicherheit wird mit redundanten Komponenten in unabhängigen wasser- und feuerdichten Abteilungen erzielt.

Für die qualitative Bewertung von Ausfällen werden folgende Szenarien untersucht:

- Ausfall einer Komponente
- Ausfall einer aktiven Komponente
- Ausfall aller Komponenten in einem wasserdichten Bereich oder innerhalb einer Feuerzone

Daraus ergeben sich nach dem Vorgehen der *IMCA (2000)* folgende vier Kennwerte für die Bewertung der Fehlerszenarien, die mit der ERN quantifiziert werden:

- a: Intaktfall, ohne Ruder
- b: bester Fehler aktive Komponente, mit Ruder
- c: schlechtester Fehler aktive Komponente, mit Ruder
- d: schlimmster Fehler, meist Hauptschalttafel, mit Ruder

Neben der Beurteilung des DP-Systems mit Hilfe der ERN wird die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren in einem Polardiagramm charakterisiert. Dabei werden die Einsatzgrenzen für jede Richtung mit Hilfe der Windgeschwindigkeit beschrieben, bei der die Gleichgewichtsbedingung nach Gleichung 2

$$\Sigma \vec{F} = 0 = \vec{F}_{Umw} + \vec{F}_{Prop} \quad (2)$$

mit dem Propulsionssystem und der installierten Leistung erfüllt wird. Die Strömungsgeschwindigkeit wird entsprechend den Einsatzbedingungen festgelegt. Der Seegang wird entweder mit der Windgeschwindigkeit gekoppelt oder fest vorgegeben. In Abbildung 4 ist eine typische Darstellung der DP-Fähigkeit gegeben.

Für die Berechnung der Umweltkräfte hat sich bis jetzt kein einheitliches Verfahren etabliert. Bei der Berechnung der Windkräfte ist die Verwendung von Windkraftkoeffizienten sehr verbreitet, für die beispielsweise auf die Ergebnisse von *Blendermann (1996)* zurückgegriffen wird. Die Strömungs- und Wellenkräfte können zum Beispiel mit aufwändigen viskosen Rechnungen oder Modellversuchen bestimmt werden.

Nach den Vorschriften erfolgt die Berechnung der Umweltkräfte aus den Angaben zur projizierten Fläche des Über- und Unterwasserschiffes, der Wasserlinienfläche und der Breite des Schiffes. Somit spiegelt die Berechnung der Umweltkräfte nach den Vorschriften nicht die Realität wieder. Der Schiffstyp und die Rumpfform haben einen erheblichen Einfluss auf die Kräfte durch Wind, Strömung und Seegang. Daher ist dieses Vorgehen zu überdenken.

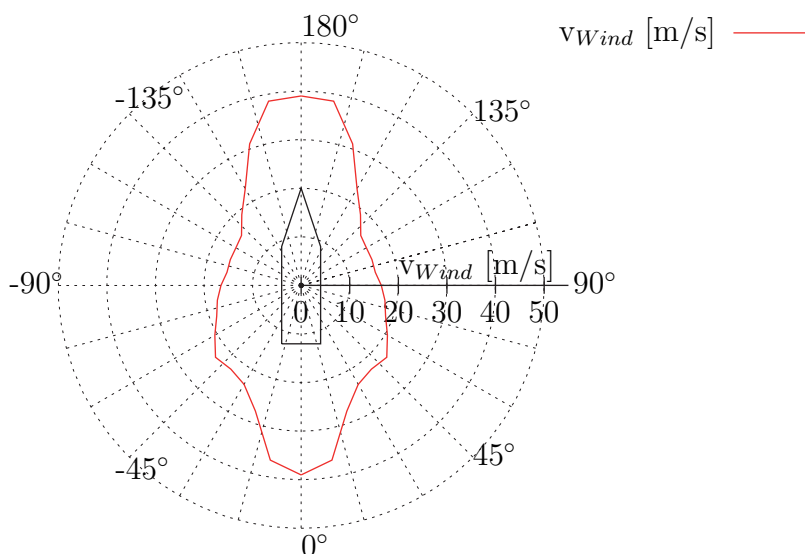


Abbildung 4: Darstellung der DP-Fähigkeit für das Beispielschiff.

2.1.2 Betrachtung im Zeitbereich

Die bisher vorgestellten Methoden berücksichtigen in jedem Fall nur zeitlich mittlere Umweltkräfte. Die zeitlichen Schwankungen werden vernachlässigt. Sowohl die Windgeschwindigkeit als auch der Seegang führen jedoch zu zeitlich veränderten Kräften. Das wiederum hat zur Folge, dass sich der erforderliche Schub der Propulsionskomponenten im Verlauf einer DP-Operation verändert. Um die in der Automation hinterlegte Steuerung des Schubes zu ermöglichen, wird auch die Maschinenanlage und deren Verhalten in der Zeit berücksichtigt. Diese Herangehensweise ermöglicht eine vollständige und realitätsnahe Abbildung des Problems. Dafür werden Modelle zur Beschreibung der Umweltlasten im Zeitbereich und der Maschinendynamik benötigt. Die Reaktion des Schiffes wird durch die positionsabhängige Regelung der Maschinenanlage gewährleistet. Aus Sicht der Regelungstechnik stellt diese Problematik keine besondere Herausforderung dar.

Für die Regelung der Position gibt es zwei Ansätze. Die meist verwendete Herangehensweise ist die Regelung als Reaktion auf eine Positionsabweichung. Diese Betrachtungsweise wird beispielsweise von *van't Veer und Gachet (2011)* angegeben. Weitere Möglichkeiten liefern *Detlefsen et al. (2015)* und *Serraris (2009)*. Jedoch liegt bei den Verfahren der Fokus nicht auf der Integration in den Entwurfsprozess.

Eine weitere Herangehensweise bietet die Regelung anhand der Vorhersage der Positionsabweichung auf Grundlage der ankommenden Umweltbedingungen. Speziell für Kranoperationen ist diese Betrachtung sehr sinnvoll. So kann aus der Vorhersage das Zeitfenster mit kleinen Schiffsbewegungen bestimmt werden. *Clauss et al. (2015)* gibt für diese Betrachtungsweise eine Vorgehensweise an.

2.1.3 DP-Fähigkeit in der frühen Schiffsentwurfsphase

Für die Berücksichtigung der Fähigkeit zum dynamischen Positionieren im frühen Schiffsentwurf wird im Wesentlichen ein Vergleich verschiedener Varianten des Schiffsentwurfs vorgenommen. In einer ersten Abschätzung kann die ERN zur Beurteilung verwendet werden. Jedoch wird der Vergleich verschiedener Varianten auf Grundlage aller Einflussfaktoren benötigt. Dazu zählt die Form des Über- und Unterwasserschiffes, der Ladefall und das Propulsionssystem. Erste Überlegungen zu der schiffsabhängigen Integration und dem Entwurf von DP-Systemen werden von *Krüger und Vorhölter (2012)* gegeben.

2.2 Statische Betrachtung des DP-Vorgangs

Um die Fähigkeit des dynamischen Positionierens überhaupt bewerten zu können, wird das DP-Manöver zunächst statisch betrachtet. Eine statische Betrachtung beinhaltet, dass die Umweltkräfte vereinfacht konstant mit einem zeitlichen Mittelwert berücksichtigt werden. Daraus ergeben sich die Schübe der Propulsionskomponenten ebenfalls zu konstanten Werten. Im Folgenden werden zunächst die zu lösenden Gleichungen für die relevanten Propulsionskonzepte vorgestellt. Dabei sind die Umweltlasten vorgegeben. Im Anschluss an die Gleichungen wird das Berechnungsverfahren zur Bestimmung der maximal zulässigen Umweltlasten vorgestellt.

In den folgenden Gleichungen wird auf die Beschreibung von Interaktionskräften der Propulsionskomponenten wie beispielsweise Sogeffekte aufgrund der Übersichtlichkeit zunächst verzichtet. In Abschnitt 4 werden die Interaktionen beschrieben und die Einbindung in die Berechnungen vorgestellt.

2.2 Statische Betrachtung des DP-Vorgangs

2.2.1 Konventionelles Antriebskonzept

Zunächst werden konventionelle Antriebssysteme betrachtet. Diese meinen im Folgenden ein Propulsionskonzept bestehend aus einer Zwei-Propeller-Anlage als Hauptantrieb. Die Idee, Schiffe mit einem solchen Antriebskonzept für dynamisches Positionierens zu verwenden, ist aus dem Anlegemanöver von Fähren abgeleitet.

Bugstrahlruder Das einfachste Propulsionskonzept stellt eine zwei-Propeller-Anlage mit einem Bugstrahlruder dar. In Abbildung 5 sind vereinfacht die Schübe der Propulsionskomponenten (rot) und die resultierende externe Kraft und das Moment dargestellt.

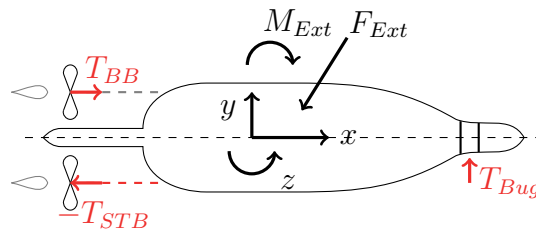


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren eines Schiffes mit Zwei-Propeller-Anlage und Bugstrahlruder.

Mit den folgenden Gleichungen werden die Längs- und Querkraft und das Giermoment bestimmt:

$$\sum F_x = 0 = T_{BB} + T_{STB} + F_{x, Ext} \quad (3)$$

$$\sum F_y = 0 = T_{Bug} + F_{y, Ext} \quad (4)$$

$$\sum M_z = 0 = (T_{BB} + T_{STB}) \cdot y_{Prop} + T_{Bug} \cdot x_{Bug} + M_{z, Ext} \quad (5)$$

Damit besteht das System aus drei Unbekannten und drei Gleichungen. Es ist mathematisch bestimmt und kann einfach gelöst werden.

Dieses Konzept ermöglicht keine Redundanzen und stellt damit ein DP-System der Klasse DP-0 dar. Schiffe mit geringen DP-Operationszeiten sowie viele Passagierschiffe werden mit diesem Konzept ausgerüstet.

Berücksichtigung der Ruder Eine zwei-Propeller-Anlage ist grundsätzlich mit Rudern ausgestattet, um die Manövrierfähigkeit der Schiffe zu gewährleisten. Die entstehenden Ruderkräfte können beim dynamischen Positionieren eingesetzt werden und erhöhen die DP-Fähigkeit. Die Ruderkräfte sind in Abbildung 6 zusätzlich eingezeichnet. Dabei ist nur die Kraft des Ruders hinter dem vorwärts drehenden Propeller relevant, da dieses durch den Propeller angeströmt wird. Das Ruder hinter dem rückwärts drehenden Propeller erzeugt nur sehr geringe Kräfte und wird nicht berücksichtigt.

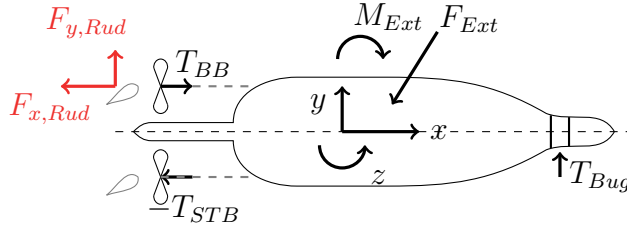


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren eines Schiffes mit Zwei-Propeller-Anlage und Bugstrahlruder unter Berücksichtigung der Ruder.

Demnach erweitern sich die Gleichungen 3 bis 5 um die Komponente der Ruderkraft des Backbord-Propellers. Die Ruderkraft setzt sich aus einem Längs- und Queranteil zusammen:

$$\sum F_x = 0 = T_{BB} + T_{STB} + F_{x, Rud, BB} + F_{x, Ext} \quad (6)$$

$$\sum F_y = 0 = T_{Bug} + F_{y, Rud, BB} + F_{y, Ext} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum M_z = 0 = & (T_{BB} + T_{STB}) \cdot y_{Prop} + T_{Bug} \cdot x_{Bug} \\ & + F_{y, Rud, BB} \cdot x_{Rud} + F_{x, Rud, BB} \cdot y_{Rud} \\ & + M_{z, Ext} \end{aligned} \quad (8)$$

Die Berechnung der Ruderkräfte erfolgt im Vorfeld. Dafür kann beispielsweise ein Paneelverfahren mit einem Ruder im Propellerstrahl nach *Söding (1997)* verwendet werden. Dabei ist die Ruderkraft abhängig von dem vorgegebenen Ruderwinkel und dem Schub des Propellers. Wird der Ruderwinkel fest vorgegeben, verbleibt ein einfach zu lösendes Gleichungssystem aus drei Gleichungen mit drei Unbekannten.

2.2 Statische Betrachtung des DP-Vorgangs

Erweiterung mit Heckstrahlruder Ein weitere Variante besteht darin, die zwei-Propeller-Anlage und den Bugstrahler um einen Heckstrahler zu erweitern. Abbildung 7 zeigt die Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren eines Schiffes mit diesem Propulsionskonzept. Dabei ist der hinzukommende Schub durch das Heckstrahlruder in rot dargestellt.

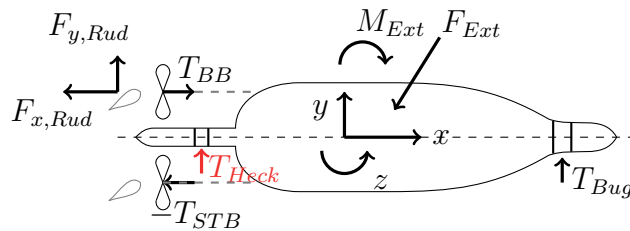


Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren eines Schiffes mit Zwei-Propeller-Anlage und Bug- und Heckstrahlruder unter Berücksichtigung der Ruder.

Mit den folgenden Gleichungen wird das System beschrieben:

$$\sum F_x = 0 = T_{BB} + T_{STB} + F_{x, Rud, BB} + F_{x, Ext} \quad (9)$$

$$\sum F_y = 0 = T_{Bug} + T_{Heck} + F_{y, Rud, BB} + F_{y, Ext} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sum M_z = 0 = & (T_{BB} + T_{STB}) \cdot y_{Prop} + T_{Heck} \cdot x_{Heck} \\ & + T_{Bug} \cdot x_{Bug} + F_{y, Rud, BB} \cdot x_{Rud} \\ & + F_{x, Rud, BB} \cdot y_{Rud} + M_{z, Ext} \end{aligned} \quad (11)$$

Dieses Konzept ermöglicht Redundanz und kann auch für höhere DP-Klassen verwendet werden. Auch wenn die Anzahl der Querstrahlruder erhöht wird, ändert sich die Vorgehensweise nicht. Der maximal zulässige Gesamtschub der Bug- und Heckstrahlruder und der resultierende Angriffspunkt der jeweiligen Kräfte muss dann im Vorfeld bestimmt werden. Bei diesem Konzept ist das Gleichungssystem mit drei Gleichungen und vier Unbekannten unterbestimmt.

2.2.2 Schiffe mit nachgerüstetem DP-System

Als Beispiel seien hierfür Mehrzweckschiffe mit großen Krankapazitäten zu nennen. Im Zuge der Energiewende wurden diese für den Offshore-Einsatz umgerüstet. Diese Schiffe besitzen bereits einen Querstrahlruder im Bug und erhalten zusätzlich einen ausfahrbaren, drehbaren Strahler. In Abbildung 8 ist ein Schiff mit nachgerüstetem DP-System dargestellt. Bei den Schiffen handelt es sich um Einschrauben-Schiffe. Der Propeller kommt beim dynamischen Positionieren nicht oder sehr eingeschränkt zum Einsatz.

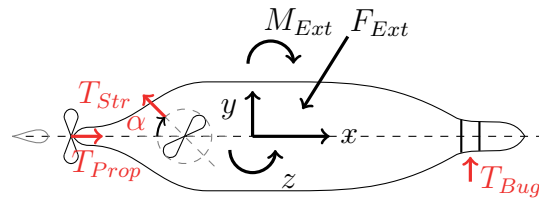


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren für ein Schiff mit nachgerüstetem DP-System.

Mit den nachfolgenden Gleichungen wird die DP-Fähigkeit mit einem solchen Antriebskonzept bestimmt:

$$\sum F_x = 0 = T_{Str} \cdot \cos(\alpha) + T_{Prop} + F_{x, Ext} \quad (12)$$

$$\sum F_y = 0 = T_{Bug} + T_{Str} \cdot \sin(\alpha) + F_{y, Ext} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sum M_z = 0 = T_{Str} \cdot (x_{Str} \cdot \sin(\alpha) + y_{Str} \cdot \cos(\alpha)) \\ + T_{Bug} \cdot x_{Bug} + M_{z, Ext} \end{aligned} \quad (14)$$

Eine Redundanz kann nur erzielt werden, wenn mehrere drehbare Strahler eingebaut werden. Im Betrieb wird jedoch nur ein drehbarer Antrieb eingesetzt.

2.2.3 Antriebskonzept mit drehbaren Strahlern

Alternativ zur zwei-Propeller-Anlage als Hauptantrieb besteht die Möglichkeit drehbare Strahler, also Azimuth-Antriebe, einzusetzen. Dieses Antriebskonzept ist in Abbildung 9 dargestellt.

2.2 Statische Betrachtung des DP-Vorgangs

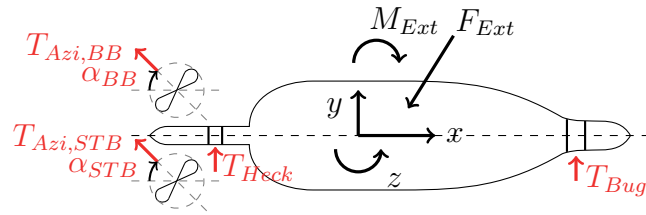


Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung der Kräfte und Momente beim dynamischen Positionieren für ein Schiff mit drehbaren Strahlern.

Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der folgenden Formulierung:

$$\sum F_x = 0 = T_{Azi, BB} \cdot \cos(\alpha_{BB}) + T_{Azi, STB} \cdot \cos(\alpha_{STB}) + F_{x, Ext} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 = T_{Azi, BB} \cdot \sin(\alpha_{BB}) + T_{Azi, STB} \cdot \sin(\alpha_{STB}) \\ + T_{Bug} + T_{Heck} + F_{y, Ext} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \sum M_z = 0 = T_{BB} \cdot (x_{BB} \cdot \sin(\alpha_{BB}) + y_{BB} \cdot \cos(\alpha_{BB})) \\ + T_{STB} \cdot (x_{STB} \cdot \sin(\alpha_{STB}) + y_{STB} \cdot \cos(\alpha_{STB})) \\ + T_{Bug} \cdot x_{Bug} + T_{Heck} \cdot x_{Heck} + M_{z, Ext} \end{aligned} \quad (17)$$

Eine Redundanz kann auch mit diesem Konzept erzielt werden. Jedoch sind erheblich höhere Investitionskosten im Vergleich zu einer zwei-Propeller-Anlage zu erwarten, weil Azimuth-Antriebe relativ teuer sind.

2.2.4 Berechnung der DP-Fähigkeit für verschiedene Begegnungswinkel

Für die Berechnung der DP-Fähigkeit für verschiedene Begegnungswinkel bei der statischen Berechnung wird das mathematische Verfahren der Intervallhalbierung genutzt. Für einen vorgegebenen Begegnungswinkel wird die Windgeschwindigkeit schrittweise variiert. Je nach Vorgaben wird mit der Windgeschwindigkeit die Wellenhöhe und die Wellenperiode nach Tabelle 2 durch lineare Interpolation bestimmt. Alternativ wird die Wellenhöhe und -periode mit konstanten Werten festgelegt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird mit einer konstanten Geschwindigkeit angegeben. Der Wind, Seegang und die Strömung wirken aus der gleichen Richtung. Mit diesen Angaben wird die gesamte Umweltlast, also Längs- und Querkraft und Giermoment, bestimmt.

Mit Hilfe des Optimierungsalgorithmus CHWARISMI von *Söding (1976)* wird der Schub aller Propulsionskomponenten bestimmt. Dabei wird die Randbedingung gefordert, dass die maximalen Schübe nicht überschritten werden. Die Lösung für die unterbestimmten Gleichungssysteme kann anhand zwei verschiedener Zielfunktionen gefunden werden:

- Maximierung der Strahlerkraft
- Minimierung der benötigten Leistung

Aus den sich ergebenden Schüben wird die jeweilige Leistung bestimmt, sodass der Gesamtleistungsbedarf ermittelt werden kann.

Für die Überprüfung der Plausibilität von Ergebnissen ist es sinnvoll, eine Vektordarstellung aller auftretenden Kräfte zu nutzen. In Abbildung 10 ist eine solche Darstellung für das Beispielschiff als Zweischauber bei einer Windgeschwindigkeit von 23,44 m/s und einem Begegnungswinkel von 140 ° gezeigt. Der Begegnungswinkel von 0 ° entspricht Wind von achtern.

2.3 Dynamische Betrachtung des DP-Vorgangs

Die Vereinfachung, die maximalen Umweltgrenzen eines Systems zum dynamischen Positionierens mit den bisher vorgestellten statischen Methoden zu bestimmen, führt im Allgemeinen zu deutlichen Überschätzung der Einsatzgrenzen gegenüber der Realität. Der Grund dafür ist, dass unter realen Bedingungen die zeitlichen Schwankungen der Umweltlasten zu einer Abweichung der Position und des Kurswinkels führen. Abhängig von der Positionsabweichung wird der Schub der entsprechenden Propulsionskomponenten durch Veränderung der Drehzahl und der Steigung modifiziert. Dies wiederum beeinflusst direkt die Maschinenanlage, da dies zu einer Veränderung des dynamischen Leistungsbedarfs führt. Der erhöhte oder zu hohe Leistungsbedarf oder die fehlende Reaktionsgeschwindigkeit des Gesamtsystems führt zu den geringeren Einsatzgrenzen der DP-Fähigkeit in der Realität im Vergleich zu der ermittelten DP-Fähigkeit mit einer statischen Methode.

2 GRUNDLEGENDE BETRACHTUNG DES DYNAMISCHEN POSITIONIERENS

dem gleichen Prinzip, wie sie in den vorherigen Abschnitten beschrieben sind. Dabei kann die Berechnung mit der statischen Herangehensweise und der Betrachtung im Zeitbereich durchgeführt werden. Es ergibt sich nach Wegfall einer Komponente nur ein verändertes Propulsionssystem.

In Abbildung 11 sind die Ergebnisse für ein Beispielschiff für verschiedene Fehlerszenarien dargestellt, die sich aus der statischen Berechnung ergeben. Bei den Ausfällen verschiedener Komponenten handelt es sich für diese Darstellung um den Ausfall jeweils einer aktiven Komponente.

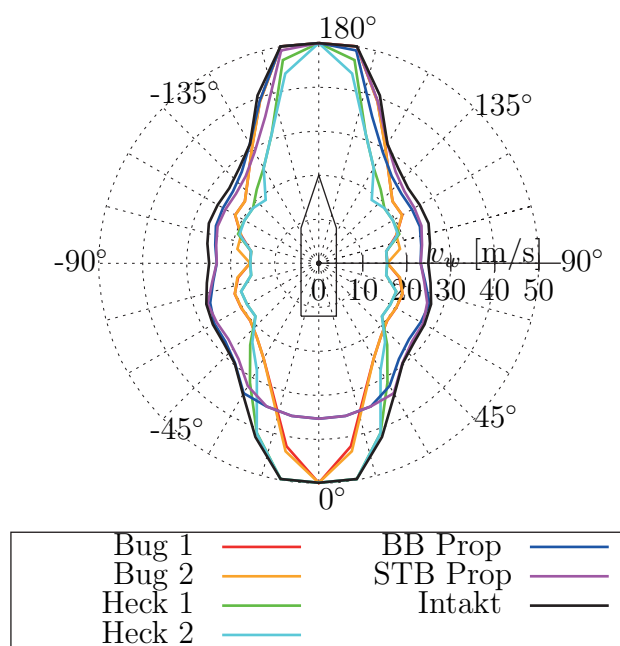


Abbildung 11: DP-Fähigkeit bei Ausfall einer jeweils einer aktiven Komponente des Propulsionssystems des Beispielschiffs.

3 Berechnung der hydrodynamischen Kräfte

Die Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte ist ein wesentlicher Bestandteil, um eine Aussage zur DP-Fähigkeit zu treffen. Zu den hydrodynamischen Kräften zählen umweltbedingte Rumpfkkräfte, die Kräfte der Hauptantriebskomponenten, wie beispielsweise Verstellpropeller, Festpropeller oder drehbare Strahler, Ruderkräfte und die Bestimmung der Kräfte durch Querstrahlruder.

Bei der Berechnung werden für einen gegebenen Zustand, also für die Vorgabe der Schiffsbewegung bzw. des Propulsionspunktes, die Kräfte bestimmt. Dabei werden nur reale Betriebspunkte berücksichtigt. Im Folgenden werden die Berechnungsmethoden vorgestellt.

3.1 Berechnung der Rumpfkkräfte

Durch die Relativbewegung von Schiff und Wasser wird auf den Rumpf eine Kraft erzeugt. Für die Bestimmung der Kräfte wird ein Verfahren verwendet, das ursprünglich für Berechnungen der Manövrierfähigkeit entwickelt wurde. Das Verfahren wird von *Haack (2006)* vorgestellt. Die Methode basiert auf einer angepassten Theorie für schlanke Körper nach *Söding (1984)*. Der Hauptanteil der hydrodynamischen Kraft resultiert aus der Beschleunigung der hydrodynamischen Massen. Mit Gleichung 18 wird dieser Anteil bestimmt. Dabei werden die hydrodynamischen Massen mit Hilfe von gekrängten Lewis-Spanten berechnet. Die Berechnung der Kräfte erfolgt abhängig von der Schwimmlage, Bewegung und Beschleunigung des Schiffes.

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ N_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -m_x \cdot \dot{u}_S \\ k_1 \int_L (-\frac{\partial}{\partial t} + u_S \frac{\partial}{\partial x}) \mu \cdot (k_1 v_S + k_2 x \dot{\psi}) dx - m_x u_S \dot{\psi} \\ k_2 \int_L x (-\frac{\partial}{\partial t} + u_S \frac{\partial}{\partial x}) \mu \cdot (k_1 v_S + k_2 x \dot{\psi}) dx + m_x u_S v_S \end{pmatrix} \quad (18)$$

Diese Gleichung berücksichtigt keine 3D-Effekte für die Schiffsumströmung. Mit der Erweiterung durch Gleichung 19 wird dieser Kraftanteil näherungsweise berücksichtigt:

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ N_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_t + X_{vv}v_S^2 + X_{vr}v_S r + X_{rr}r^2 \\ R_F(v_S + x_T\dot{\psi})/u_S - 0.5\rho \int_L (v_S + x\dot{\psi})|v_S + x\dot{\psi}|c_D \cdot d \cdot dx \\ R_FL^2\dot{\psi}/(6u_S) - 0.5\rho \int_L x(v_S + x\dot{\psi})|v_S + x\dot{\psi}|c_D \cdot d \cdot dx \end{pmatrix} \quad (19)$$

Da im Gegensatz zu Standard-Manövern beim dynamischen Positionieren die Beschleunigungen bei der statischen Herangehensweise null sind und bei der Betrachtung im Zeitbereich sehr klein sind, hat der zweite Kraftanteil (Gleichung 19) den größeren Einfluss auf die Rumpfkraft. Speziell der Querwiderstand, der mit der Queranströmung und dem zugehörigen Querwiderstandsbeiwert c_D bestimmt wird, erzeugt den größten Anteil der gesamten Rumpfkraft bei Queranströmung. Dieser ist typischerweise beim dynamischen Positionieren relevant. Der Querwiderstand wird aus der Integration der Querwiderstandsbeiwerte der verschiedenen Spanten und der lokalen Anströmung bestimmt.

Für die Bestimmung des Querwiderstandsbeiwertes wurde bisher auf Erfahrungswerte zurückgegriffen. *Brix (1993)* gibt folgende Werte an:

- Vorschiff: 0,9
- Hauptspant: 0,8
- Hinterschiff: 1,1

Um dieses Verfahren zu verbessern und damit auch die Querwiderstandsbeiwerte neuartiger Schiffe abzuschätzen, wird im folgenden Abschnitt eine Methode vorgestellt, die eine genauere Berechnung des Querwiderstandes für beliebige Spantformen ermöglicht.

Um sowohl die Bestimmung des Querwiderstandsbeiwertes als auch das Berechnungsverfahren für die Bestimmung der gesamten Rumpfkraft zu validieren, werden im Abschnitt 3.1.2 die Ergebnisse von Modellversuchen vorgestellt und diese mit den Ergebnissen der Berechnungsmethoden verglichen.

3.1 Berechnung der Rumpfkkräfte

3.1.1 Bestimmung des Querwiderstandsbeiwertes

Der Querwiderstand eines Schiffes entspricht der Kraft in y-Richtung bei einer Anströmung von 90 Grad. Dabei wird im Sinne der Streifenmethode angenommen, dass sich der Querwiderstandsbeiwert des Schiffes aus den Widerstandsbeiwerten der einzelnen Spanten zusammensetzt. Damit werden Querwiderstandsbeiwerte für die verschiedenen Spantgeometrien benötigt. Von *Brütt (2015)* und *Rudolph (2014)* wurde eine Vielzahl von RANSE-Berechnungen hierzu durchgeführt. In Abbildung 12 sind beispielhaft verschiedene Spantgeometrien und das Rechengebiet für eine Spantgeometrie exemplarisch dargestellt.

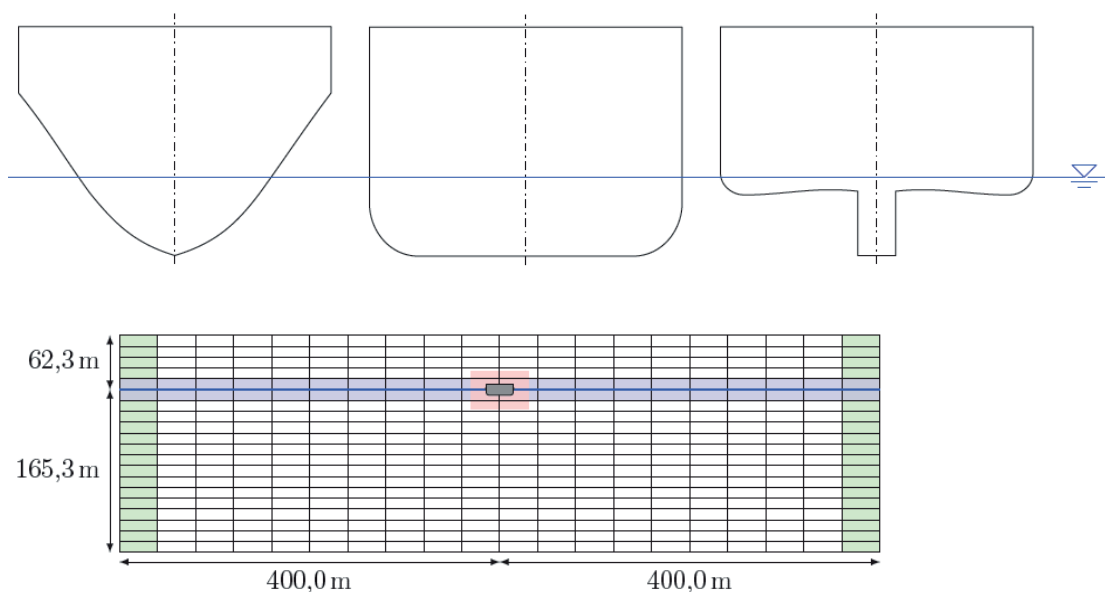


Abbildung 12: Beispielhafte Darstellung verschiedener Spantgeometrien und Rechengebietes nach *Brütt (2015)*.

Die Ergebnisse werden verwendet, um die Daten auf geometrische Zusammenhänge zu analysieren. In einem ersten Schritt wird die Relation zwischen den Querwiderstandsbeiwerten und dem Flächenverhältnis von der Spantfläche zum umschreibenden Rechteck untersucht. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse für die verschiedenen Spantgeometrien dargestellt. Dabei wird in Bugwulstspanten, den Bereich des Totholzes, v-förmige Spanten und Spanten mit einem definierten Kimmradius, also Hauptspanten, unterschieden.

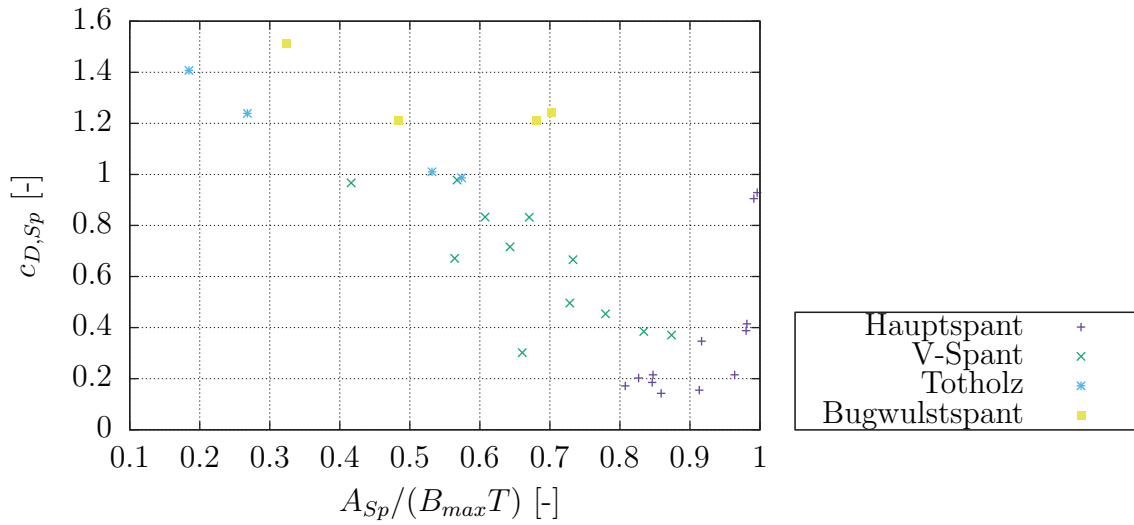


Abbildung 13: Querwiderstandsbeiwerte aus den RANSE-Berechnungen.

Die Ergebnisse zeigen prinzipiell einen linearen Zusammenhang, der jedoch eine große Streuung aufweist. Daher wird im nächsten Schritt eine spantformabhängige Korrektur durchgeführt. Da der Querwiderstand durch die Ablösung der Strömung bestimmt wird, ist ein geometrischer Zusammenhang zu den scharfkantigen Formen des Spantes zu erwarten. Daher wird für Hauptspantgeometrien der Kimmradius als erheblicher Einflussfaktor angenommen. Für Spanten mit einem Totholz ist die Totholzhöhe im Verhältnis zum Tiefgang zu berücksichtigen. Für alle weiteren Spanten ist die maximale Breite als zusätzlicher Parameter entscheidend. Aus der Regressionsanalyse ergibt sich Gleichung 20, mit der der Querwiderstandsbeiwert für alle Spantgeometrien bestimmt wird.

$$c_{D, Sp}^* = -1,35 \cdot \frac{A_{Sp}}{B_{max} \cdot T} + 1,15 + f_{Sp}^{-1} \quad (20)$$

mit

$$\begin{aligned}
 f_{Sp} &= 4,0 \cdot R/T && \text{für Hauptspanten mit Kimmradius} \\
 f_{Sp} &= 1,3 \cdot (H_{Totholz}/T)^{0,25} && \text{für Spanten mit Totholz} \\
 f_{Sp} &= 2,0 \cdot (B_{max}/T)^{0,5} && \text{für alle anderen Spantgeometrien}
 \end{aligned}$$

3.1 Berechnung der Rumpfkkräfte

In Abbildung 14 sind die korrigierten Querwiderstandsbeiwerte der verschiedenen Spantformen und die Ausgleichsfunktion dargestellt. Die Streuung der Werte ist unter Berücksichtigung des Korrekturterms deutlich kleiner.

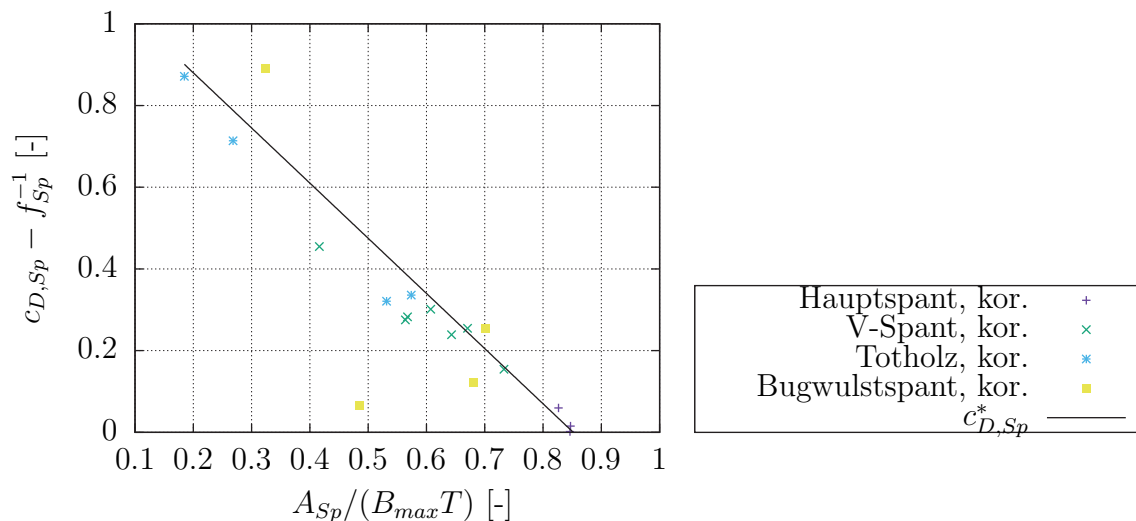


Abbildung 14: Querwiderstandsbeiwerte mit spantformabhängiger Korrektur und Ausgleichsfunktion nach Gleichung 20.

Zusätzlich wird der Querwiderstandsbeiwert mit 2,01 begrenzt, da sich für sehr kleine Korrekturterme numerisch große Werte ergeben könnten. Die Grenze ergibt sich aus dem Querwiderstand einer unendlich langen Rechteckplatte oder einem Quadratbalken für Reynoldszahlen größer 10^4 , der nach *Grote und Feldhusen (2011)* mit diesem Wert angegeben wird.

3.1.2 Validierung der Berechnungsmethoden

Für die Validierung der vorgestellten Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Querwiderstandsbeiwertes werden Modellversuche herangezogen, die in der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (*kurz: HSVA*) durchgeführt worden sind und in *HSVA (2015)* beschrieben sind. Die Hauptabmessungen der verwendeten Modelle sind in Tabelle 3 angegeben.

3 BERECHNUNG DER HYDRODYNAMISCHEN KRÄFTE

Tabelle 3: Hauptabmessungen der Modelle (*HSVA (2015)*).

	Mod. 1 4938-1012	Mod. 2 4314-0113	Mod.3 4544-1005
Länge zw. d. Loten	111,45 m	154,00 m	297,00 m
Breite	19,20 m	27,66 m	37,00 m
Mittlerer Tiefgang	4,80 m	5,75 m	8,32 m

In den relevanten Versuchsreihen wurden drei Modelle jeweils mit einer Geschwindigkeit von zwei Knoten quer durch den Versuchstank geschleppt. Dabei wurde die Querkraft gemessen. Mit Hilfe der folgenden Gleichung wird der zugehörige Querwiderstandsbeiwert bestimmt:

$$c_D = \frac{F_Y}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{Tank} \cdot v_{Quer}^2 \cdot A_{Lat,UW}} \quad (21)$$

Daraus ergeben sich für die drei Modelle die Querwiderstandsbeiwerte, die in Tabelle 4 angegeben sind. Nun können die berechneten Querwiderstandsbeiwerte der Modellversuche mit den berechneten Beiwerten aus den RANSE-Berechnungen nach *Brütt (2015)* und den Berechnungen nach der Regressionsformel aus dem vorherigen Abschnitt verglichen werden. In Tabelle 4 sind die Querwiderstandsbeiwerte des gesamten Schiffes für die drei Modelle angegeben.

Tabelle 4: Querwiderstandsbeiwerte der Modelle (*HSVA (2015)*).

	Mod. 1 4938-1012	Mod. 2 4314-0113	Mod.3 4544-1005
Modellversuch	0,715	0,669	0,672
Regressionsformel	0,698	0,692	0,683
<i>Brütt (2015)</i>	0,679	0,608	-

Zusätzlich sind in Abbildung 15 die Querwiderstandsbeiwerte und der Verlauf des Querwiderstandsbeiwertes für jeden Spant angegeben, die sich nach der Regressionsformel (Gleichung 20) und den RANSE-Berechnungen nach *Brütt (2015)* ergeben.

3.1 Berechnung der Rumpfkkräfte

Daraus geht hervor, dass die maximale Abweichung 3 Prozent zwischen den Messungen und den Berechnungen nach Gleichung 20 beträgt, was für den Entwurfsprozess einen akzeptablen Wert darstellt.

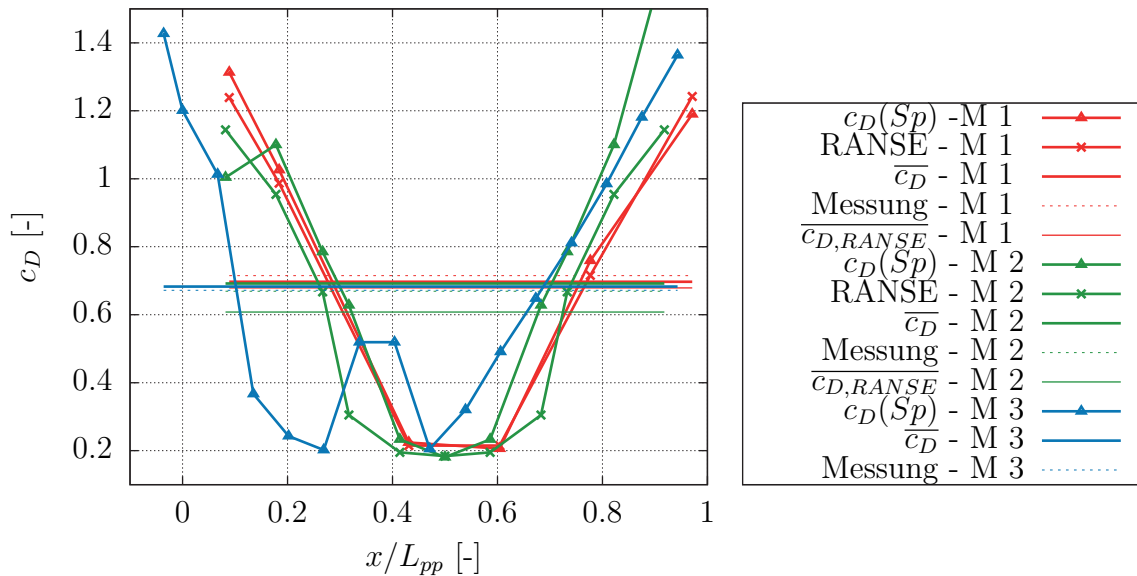


Abbildung 15: Vergleich der Querwiderstandsbeiwerte - Regressionsformel, RANSE-Berechnung nach *Brütt (2015)* und Modellversuche.

Auch in der Literatur werden Verfahren angegeben, um den Querwiderstandsbeiwert zu bestimmen. Von *Yoshimura et al. (2009)* wird die Berechnung nach Gleichung 22 vorgeschlagen. Dabei ist lediglich das Verhältnis von Länge zu Tiefgang (L/d) für den Querwiderstandsbeiwert entscheidend. Die Methode ist für Schiffe mit einem Blockkoeffizient kleiner als 0,75 gedacht.

$$c_D = -0,0591 \cdot \left(\frac{L}{d}\right) + 1,848 \quad (22)$$

Die Ergebnisse nach *Yoshimura et al. (2009)* sind für die bereits genannten Schiffe in Tabelle 5 dargestellt. Als Referentwert ist nochmals der ermittelte Querwiderstandsbeiwert der Modellversuche angegeben. Mit den Werten wird deutlich, dass das Verfahren unrealistische Werte liefert. Speziell für Modell 3 ergibt sich nach Gleichung 22 ein negativer Querwiderstandsbeiwert. Damit ist dieses Verfahren nicht sinnvoll zu verwenden.

3 BERECHNUNG DER HYDRODYNAMISCHEN KRÄFTE

Tabelle 5: Querwiderstandsbeiwerte der Modelle (*HSVA (2015)*).

	Mod. 1 4938-1012	Mod. 2 4314-0113	Mod.3 4544-1005
Modellversuch	0,715	0,669	0,672
<i>Yoshimura et al. (2009)</i>	0,476	0,265	-0,261

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Modelle ebenfalls bei einer konstanten Geschwindigkeit von 2 kn bei verschiedenen Driftwinkeln geschleppt. Dabei wurden die Längs- und Querkräfte und das Giermoment gemessen. Für die Berechnungen stellt der angenommene Ablösepunkt die entscheidene Größe dar, da ab diesem Punkt keine Kraft mehr übertragen wird. Der Ablösepunkt kann aus dem Verlauf der hydrodynamischen Masse abgeleitet werden, was in *Brix (1993)* beschrieben ist.

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Kräfte zeigt eine brauchbare Übereinstimmung, wie aus den Abbildungen 16, 17 und 18 für die Querkraft hervorgeht.

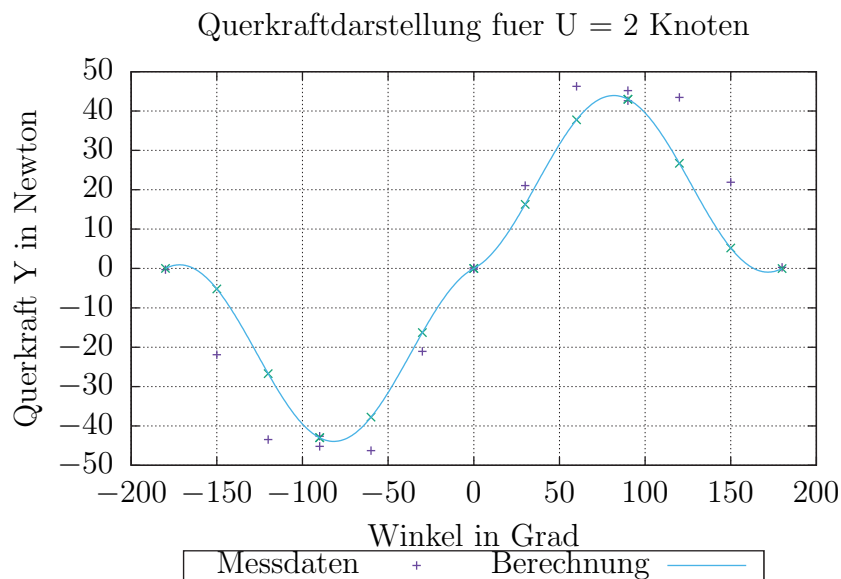


Abbildung 16: Vergleich der Querkraft zwischen der Berechnungsmethode und den Ergebnissen der Modellversuche (Modell 1).

3.1 Berechnung der Rumpfkäfte

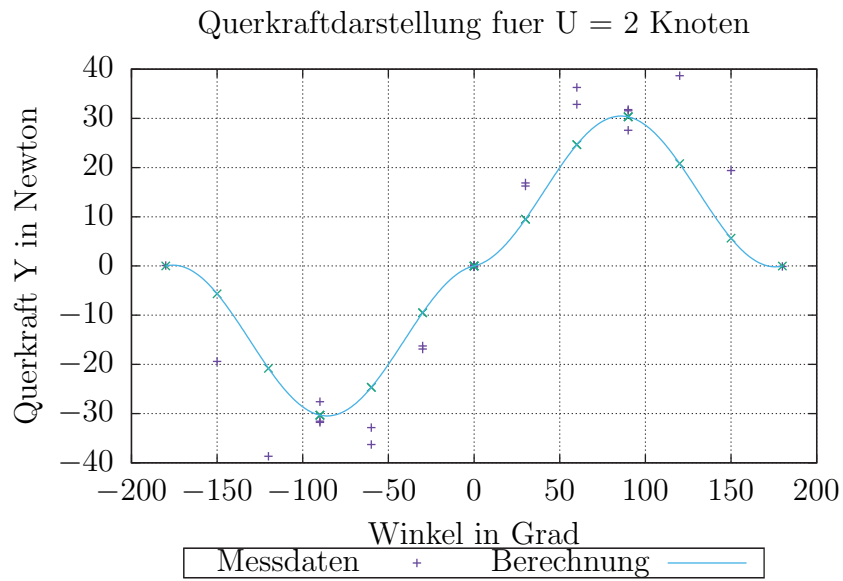


Abbildung 17: Vergleich der Querkräft zwischen der Berechnungsmethode und den Ergebnissen der Modellversuche (Modell 2).

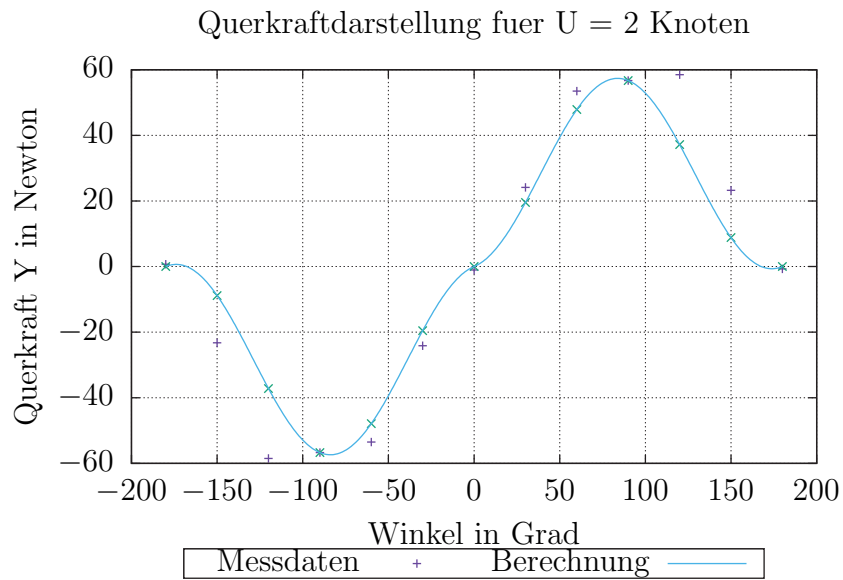


Abbildung 18: Vergleich der Querkräft zwischen der Berechnungsmethode und den Ergebnissen der Modellversuche (Modell 3).

3.2 Bestimmung der Propellerkräfte

Bei Propellern wird im Wesentlichen zwischen Verstell- und Festpropeller unterschieden. Die Berechnungsgrundlagen sind im Wesentlichen gleich und basieren auf der Traglinientheorie, beschrieben in *Krüger (1992)*. Auch von *Haack (2006)* wird das Verfahren vorgestellt.

3.2.1 Verstellpropeller

Allgemein wird die Charakteristik von Propellern mit einem Freifahrt diagramm mit den Kennwerten k_t , k_Q und η_0 beschrieben. Aufgrund der verschiedenen Steigungen für einen Verstellpropeller ergibt sich für die Kennwerte jeweils eine Kurvenschar. In Abbildung 19 ist ein Freifahrt diagramm für einen Verstellpropeller beispielhaft dargestellt.

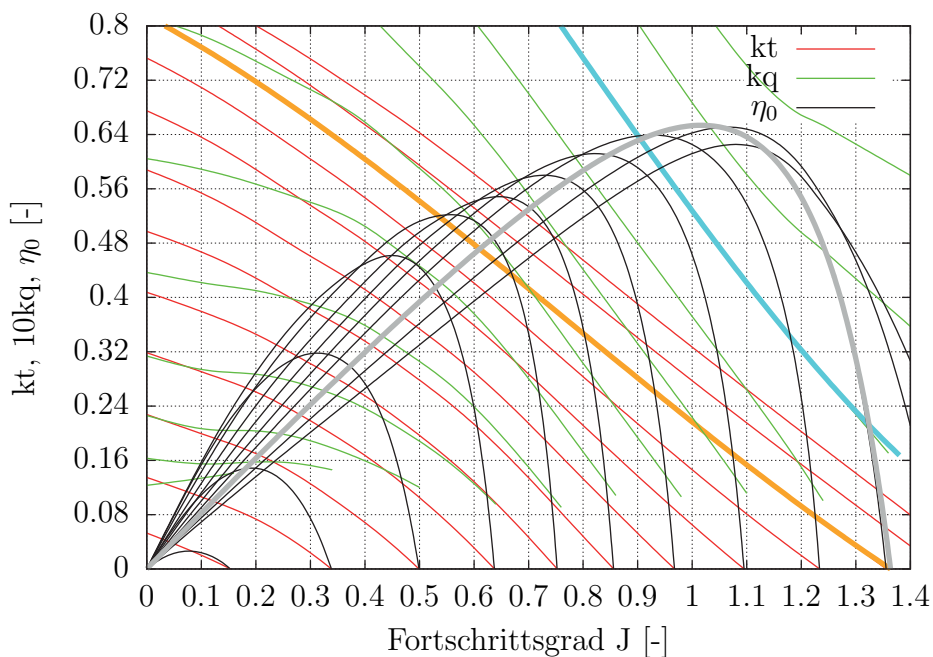


Abbildung 19: Freifahrt diagramm für einen Verstellpropeller.

Aus dem Schnittpunkt des Freifahrt diagramms mit der schiffsseitigen Belastungskurve wird der Betriebspunkt des Propellers bestimmt. Die schiffsseitige Belastungskurve bestimmt sich nach Gleichung 23.

3.2 Bestimmung der Propellerkräfte

$$k_t^* = \frac{R_T \cdot (1 - t)}{0,5 \cdot \rho_W \cdot v_S^2 \cdot (1 - w)^2 \cdot \pi \cdot D_{Prop}^2} \quad (23)$$

Aus dem Betriebspunkt im Freifahrt diagramm ergeben sich die Werte für den Schub, das Drehmoment und den Freifahrtwirkungsgrad. Der Sog t und der Nachstrom w sind von Vergleichsschiffen oder aus Modellversuchen bekannt. Damit sind bereits die durch den Propeller erzeugten Kräfte in Schiffslängsrichtung bestimmt.

Zusätzlich können Propellerquerkräfte in Folge von der Schiffsbewegung und durch Schräganströmung des Propellers entstehen. Für Manöver bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten kann die Querkraft durch den Propeller bis zu 15 % der Ruderquerkraft betragen. Auch das Giermoment wird durch die Schräganströmung des Propellers beeinflusst. Um diesen Effekt in die Berechnungen einfließen zu lassen, werden die Ergebnisse von Modellversuchen oder vorangegangenen viskosen Rechenverfahren genutzt. *Vorhölter (2011)* beschreibt das verwendete Verfahren.

3.2.2 Festpropeller

Festpropeller werden bei Schiffen mit DP-Systemen im Zusammenhang mit diesel-elektrischen Antrieben eingesetzt. Das Berechnungsverfahren unterscheidet sich im Wesentlichen nicht von Verstellpropellern. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass das Steigungsverhältnis konstant ist und somit sich das Freifahrt diagramm auf einen Parameter reduziert.

3.2.3 Azimuth-Antrieb

Bei einem Azimuth-Antrieb handelt es sich um einen um die Hochachse drehbaren Festpropeller, der als Zug-, Druck- oder Tandemanordnung ausgeführt werden kann. Demnach können die Kräfte wie bei einem Festpropeller bestimmt werden. Der Einfluss der Gondel kann als Ruder aufgefasst und entsprechend berechnet werden, was von *Krüger und Urban (2000)* gezeigt wurde.

3.3 Ruderkraftberechnung

Für die Berechnung der Ruderkräfte im Propellerstrahl wird ein Panelverfahren verwendet, welches von *Söding (1997)* entwickelt und von *Krüger (1998b)* verbessert wurde. Die Verbesserung wurde erzielt, indem die Geschwindigkeiten des Propellerstrahls nicht durch die Strahltheorie, sondern mit der Theorie der tragenden Linie ermittelt wird. In Abbildung 20 (links) ist beispielhaft das Panelgitter für ein Ruder mit einem Anstellwinkel von 20° und einem festen Skeg dargestellt.

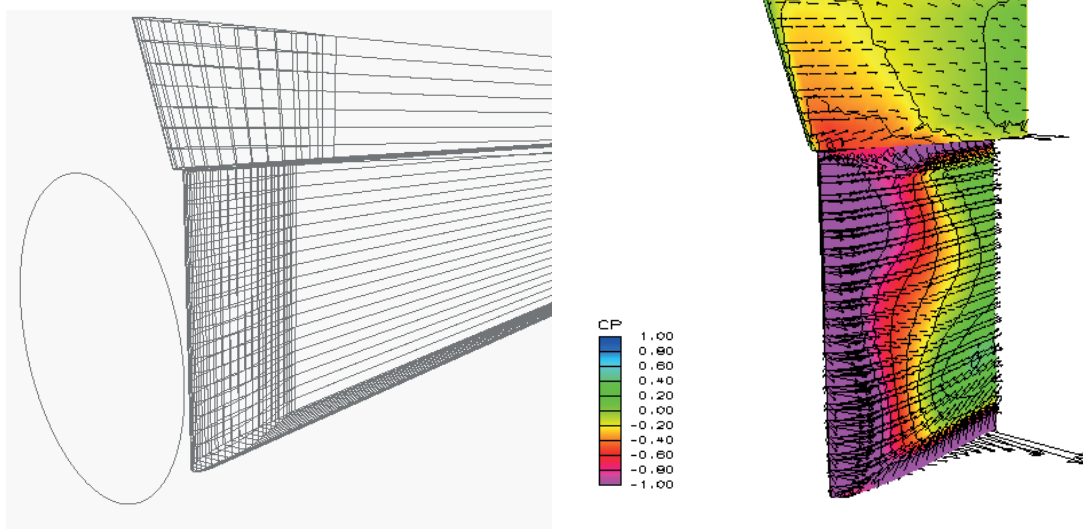


Abbildung 20: Panelgitter eines Ruders mit einem Anstellwinkel von 20° und einem festen Skeg mit Nachlaufpaneele (links) und Darstellung der zugehörigen Druckverteilung für das Beispielschiff bei einer Geschwindigkeit von 10kn (rechts).

Aus der Berechnung mit dem gezeigten Panelgitter ergibt sich beispielhaft für einen Ruderwinkel von 20° für eine Geschwindigkeit von 10 kn für das Beispielschiff die Druckverteilung, die in Abbildung 20 (rechts) dargestellt ist. Die Integration der Druckverteilung ergibt wiederum die Ruderkraft für den vorgegebenen Anstellwinkel und die Anströmgeschwindigkeit des Ruders.

3.3 Ruderkraftberechnung

Für den Fall des dynamischen Positionierens werden die Ruderkräfte für verschiedene Pfahlzugbedingungen und Ruderwinkel bestimmt. Bei Verstellpropellern wird eine konstante Drehzahl gewählt und die Steigung variiert. Für Festpropeller wird der Propellerstrahl für verschiedene Drehzahlen berechnet, um die Kräfte auf das Ruder zu bestimmen. Abbildung 21 zeigt die Querkräfte des Ruders für ein Beispielschiff für verschiedene Schubbelastungsgrade.

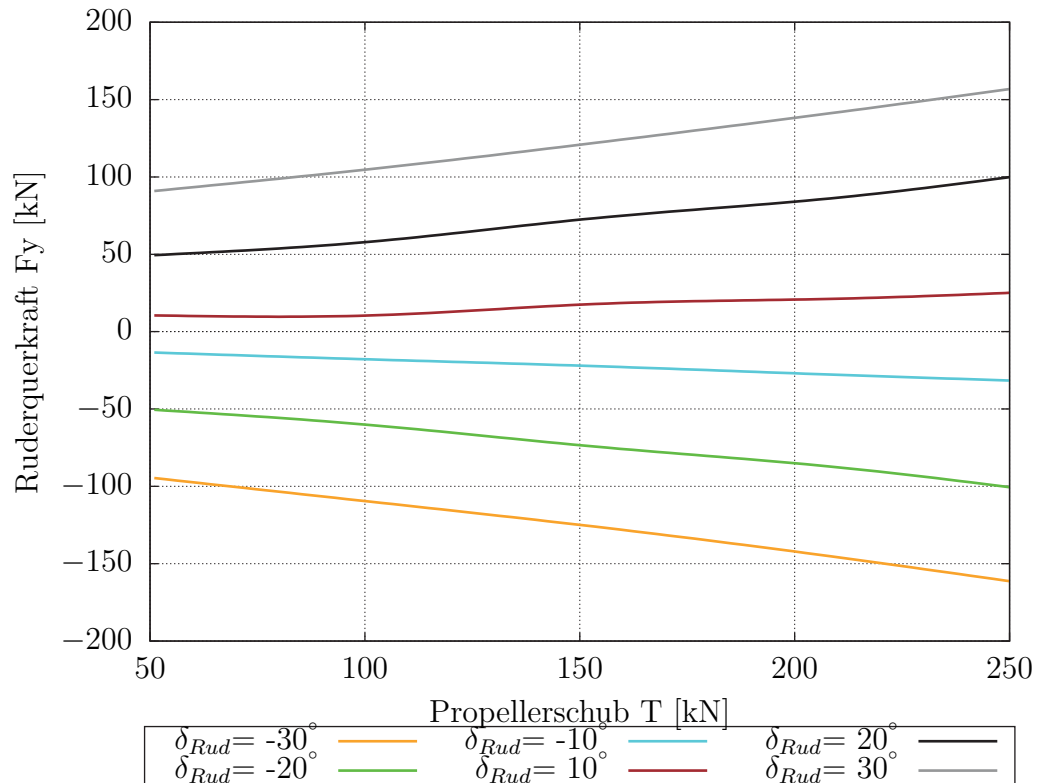


Abbildung 21: Ruderquerkräfte als Funktion des Propellerschubes unter Pfahlzugbedingungen.

Die Ruderkräfte werden vor den Berechnungen zum dynamischen Positionieren durchgeführt. Abhängig vom Propellerschub und für einen festgelegten Ruderwinkel werden die Ruderkräfte in Längs- und Querrichtung interpoliert.

3.4 Querstrahlruder

Querstrahlruder sind im Wesentlichen Impeller, die wie ein Propeller mit einem Freifahrt diagramm beschrieben werden. Für den Entwurfsprozess wird vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die maximale Querkraft aus dem spezifischen Schub c_0 und der zur Verfügung stehenden Leistung nach Gleichung 24 bestimmt wird. Umgestellt nach P_{Quer} wird die benötigte Leistung für die benötigte Querkraft während des dynamischen Positionierens berechnet.

$$Y_{Quer} = c_0 \cdot P_{Quer} \quad (24)$$

Für die Berechnung von Leistung bzw. Querkraft muss der spezifische Schub c_0 bekannt sein. *Brix (1993)* gibt dafür einen Wert von 0,12 bis 0,16 kN/kW an. Alternativ kann auch auf Angaben von Herstellern zurück gegriffen werden.

4 Beeinflussung der hydrodynamischen Kräfte durch Interaktionseffekte

Interaktionseffekte treten beim dynamischen Positionieren an den Propulsionskomponenten durch eine Beeinflussung durch den Schiffsrumpf, zueinander und durch die Umwelt auf. Abhängig von der Wechselwirkung führt die Interaktion zu einer Erhöhung oder Verringerung der Schubkräfte der Propulsionskomponenten. Folglich haben die Effekte einen Einfluss auf die Ergebnisse der DP-Fähigkeit.

Die Quantifizierung der Interaktionseffekte erfolgt jeweils aus dem Verhältnis der Kraft bzw. des Moments mit und ohne Beeinflussung. Für die Bestimmung der Interaktionseffekte werden Modellversuche und verschiedene Betrachtungen der Literatur herangezogen. Die Modellversuche wurden mit einem Modell, welches mit allen relevanten Propulsionskomponenten ausgestattet war, durchgeführt. Dabei handelt es sich um das Modell 3 aus Abschnitt 3. In Tabelle 6 sind die Hauptabmessungen und die Angaben zu den Antriebskomponenten zu finden.

Tabelle 6: Hauptabmessung und Antriebskonzept (*MARIN (2013)*).

		Modell 3 4544-1005	
Länge zw. d. Loten	L_{PP}	297,00 m	
Breite	B	37,00 m	
Mittlerer Tiefgang	T_m	8,32 m	
Propellerdurchmesser	D_{Prop}	6,00 m	
Durchmesser der Querstrahlruder	D_{Quer}	2,76 m	
y-Pos. Propeller	y_{Prop}	±7,20 m	a. M.S.
x-Pos. Bugstrahlruder 1	x_{BT1}	258,9 m	v. H.L.
x-Pos. Bugstrahlruder 2	x_{BT2}	281,70 m	v. H.L.
x-Pos. Bugstrahlruder 3	x_{BT3}	277,50 m	v. H.L.
x-Pos. Heckstrahlruder 1	x_{ST1}	18,20 m	v. H.L.
x-Pos. Heckstrahlruder 2	x_{ST2}	14,00 m	v. H.L.

4.1 Interaktionen am Schiffsrumpf

Die Beeinflussung des Schubes durch die Wechselwirkungen am Rumpf ist ein bereits bekannter Effekt. Sowohl die Rumpfform im Bereich der Propulsionskomponente als auch die Position zueinander verändern die resultierende Kraft. Im Folgenden werden Querstrahlruder, die Propeller und drehbare Strahler näher betrachtet. Aus den Daten werden Funktionen abgeleitet, die in die Berechnung der DP-Fähigkeit eingehen.

Um die Effekte der Querstrahler und der Propeller zu quantifizieren, werden die bereits erwähnten Modellversuche der Schiffbauversuchsanstalt *MARIN* (2013) herangezogen. Bei den Versuchen handelt es sich um ein gefesselttes Modell ohne Vorausschwindigkeit, an dem die globalen Kräfte in Längs- und Querrichtung und das Giermoment sowie der Schub der Propulsionskomponenten gemessen wurden. Dabei wurden die Messungen an den Propulsionskomponenten in verschiedenen Kombinationen bei unterschiedlichen Betriebspunkten durchgeführt. In Abbildung 22 ist links die Versuchsanordnung und die Messpunkte zur Erfassung der globalen Kräfte (rote Pfeile) und rechts das Hinterschiff mit dem Propeller, dem Ruder und den Heckstrahlrudern dargestellt.

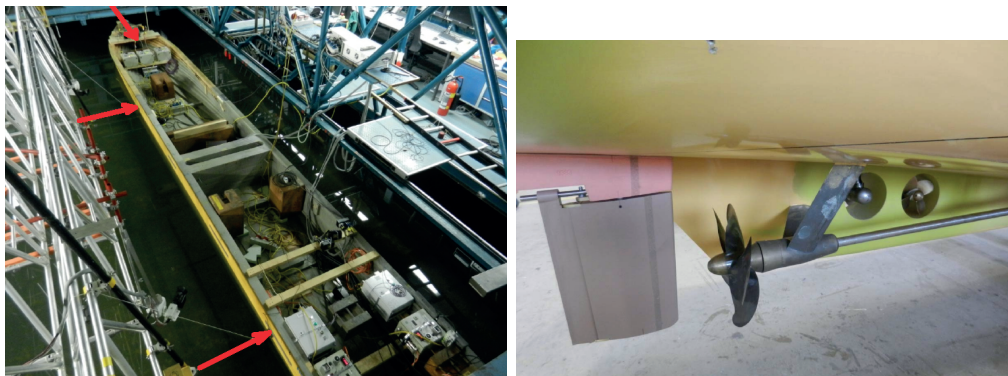


Abbildung 22: Versuchsanordnung und Ansicht des Hinterschiffs, aufgenommen von *MARIN* (2013).

4.1 Interaktionen am Schiffsrumpf

4.1.1 Querstrahlruder

Die Interaktionseffekte am Querstrahlruder beeinflussen die resultierende Querkraft und das Giermoment. *Brix (1978)* beschreibt, dass sich die resultierende Querkraft aus dem Schub und den Interaktionskräften I_1 und I_2 nach Gleichung 25 zusammensetzt, was er auch in *Brix (1993)* veröffentlicht wurde.

$$Q_0 = T_{Quer} + I_1 + I_2 \quad (25)$$

Der Schub wird durch den Impeller des Querstrahlruders generiert. Am Strömungseintritt wird ein ausgeprägtes Unterdruckfeld auf den Rumpf erzeugt, was zur Interaktionskraft I_1 führt. Abhängig von der Geometrie am Austritt entsteht ein Überdruckfeld, welches den Kraftanteil I_2 hervorruft. Die Druckdifferenz auf dem Rumpf führt zu der zusätzlichen Querkraft, die in die Richtung des Schubes des Querstrahlruders wirkt. In Abbildung 23 ist dieser Effekt vereinfacht dargestellt. Weiterhin führt die Geometrie des Querstrahl tunnels zu Reibungsverlusten.

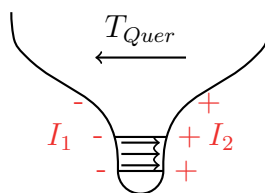


Abbildung 23: Interaktionseffekte am Querstrahlruder.

Um die Größenordnung der zusätzlichen Querkraft zu bestimmen, werden die Modellversuche ausgewertet. In Abbildung 24 ist die Anordnung der Bugstrahlru- der dargestellt. Die Versuche der Bugstrahlru- der wurden in zwei Konfigurationen durchgeführt. Konfiguration 1 (K1) bestand aus drei Querstrahlrudern, die in der Großausführung mit einem Durchmesser von jeweils 3,0 m ausgeführt sind. Die Querstrahlru- der sind von vorne nach achtern mit 1 bis 3 (B1, B2, B3) durchnu- meriert. In der zweiten Konfiguration der Bugstrahlru- der (K2) wurde die Anzahl auf zwei reduziert und der Durchmesser auf 3,5 m (Großausführung) vergrößert. Die zwei Heckstrahlru- der (H1 und H2) wurden lediglich in einer Konfiguration (K1) untersucht. Dabei wurden die Querstrahlru- der einzeln und in den verschiedenen Kombinationen zwischen 50 % und 100 % der Leistung betrieben.

4 BEEINFLUSSUNG DER HYDRODYNAMISCHEN KRÄFTE DURCH INTERAKTIONSEFFEKTE

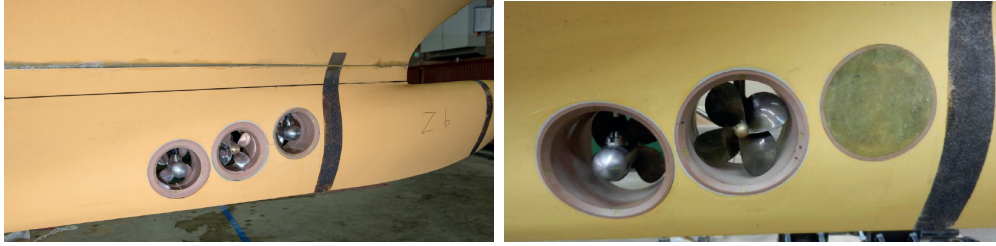


Abbildung 24: Anordnung der Bugstrahlruder: Konfiguration 1 (links) mit drei Bugstrahlrudern und Konfiguration 2 (rechts) mit drei Bugstrahlrudern.

Mit Gleichung 26

$$I_{Y,Quer}^* = Q_0/T_{Quer} = 1 + \frac{I_1 + I_2}{T_{Quer}} \quad (26)$$

wird der Interaktionseffekt bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 für die Bugstrahlruder und in Abbildung 26 für die Heckstrahlruder über den relativen Schub dargestellt.

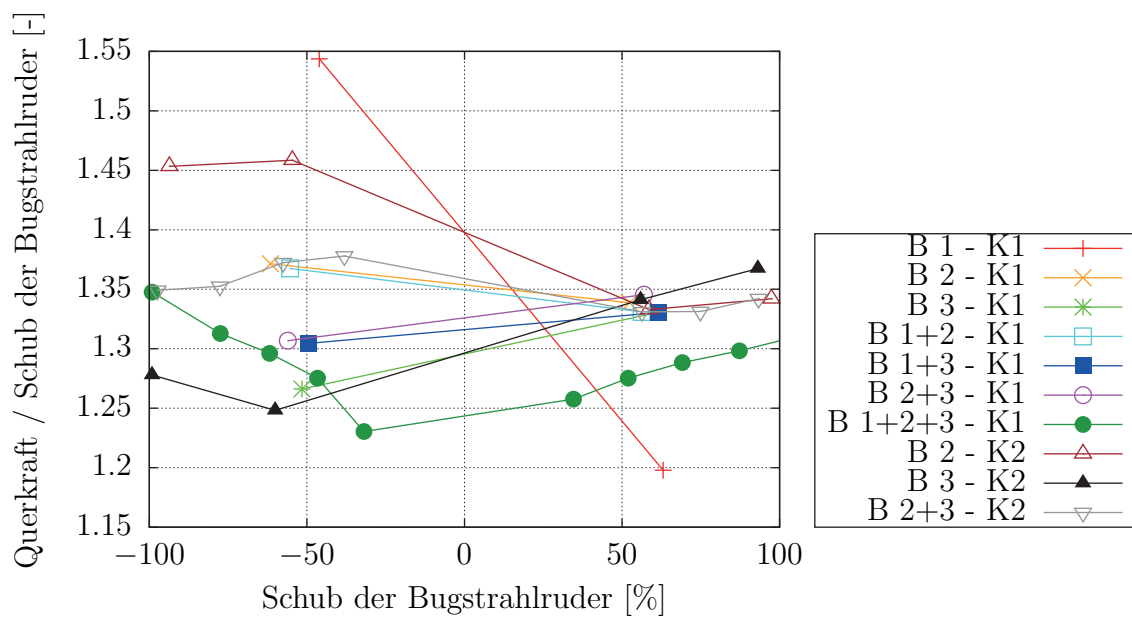


Abbildung 25: Interaktion der Bugstrahlruder.

4.1 Interaktionen am Schiffsrumpf

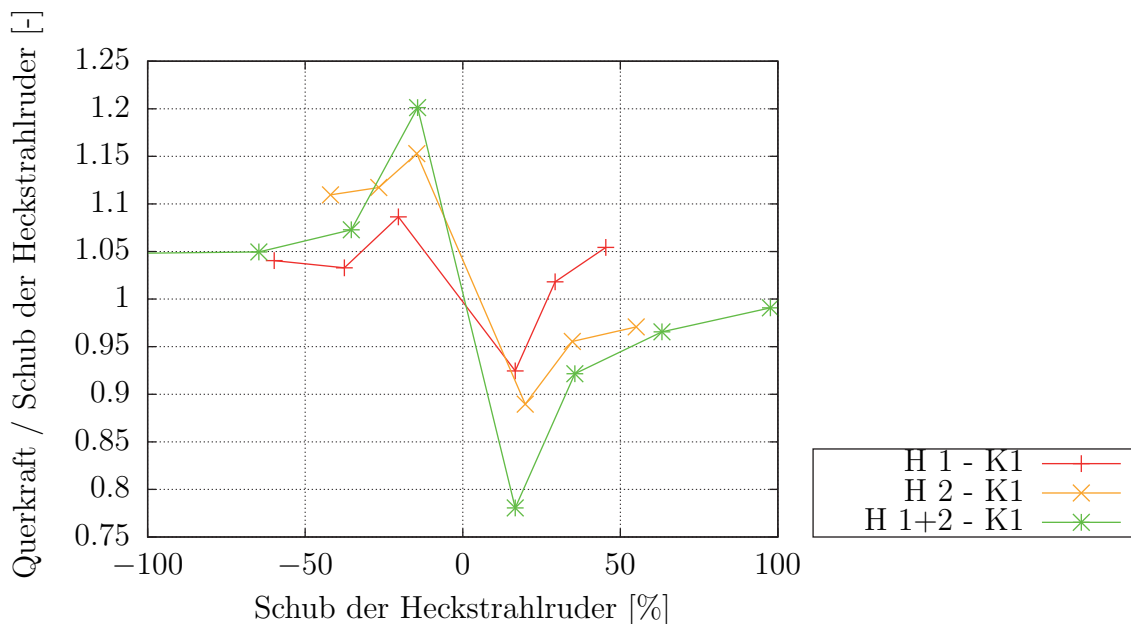


Abbildung 26: Interaktion der Heckstrahlruder.

Für die Bugstrahlruder geht daraus hervor, dass es in allen Betriebspunkten und Konfigurationen die Interaktionen zu einer deutlichen Verstärkung des Schubes und somit zu einer Vergrößerung der resultierenden Querkraft kommt. Der Interaktionseffekt ist nahezu unabhängig vom Betriebspunkt der Querstrahlruder. Die Anzahl der Bugstrahlruder hat ebenfalls einen Einfluss auf die Interaktion. Die Größenordnung der Verstärkung liegt bei mehr als 20% des Schubes.

Die Heckstrahlruder weisen jeweils beim Betriebspunkt von $\pm 25\%$ des Schubes Messausreißer auf, die nicht erklärbar sind und deswegen nicht berücksichtigt werden. Abhängig von der Anzahl der Heckstrahlruder wird eine Verstärkung von maximal 2 % bis 5 % aus dem Versuch abgeleitet.

Bei genauerer Betrachtung der Werte ist eine Asymmetrie zu erkennen. Das Querstrahlruder erzeugt also in eine Richtung eine größere Querkraft als in die andere Richtung. Das ist mit der unterschiedlichen Einbaurichtung der Gondel zu erklären. Abbildung 27 zeigt rechts die Einbaurichtung des Bugstrahlruders B1 und B3. Links in der Abbildung dargestellt ist die Anordnung der Gondel des Bugstrahlruders B2. Die Messungen der Heckstrahlruder lassen die Einbaurichtung

der Gondel nicht erkennen. Für den frühen Schiffsentwurf wird die Asymmetrie des Interaktionseffekts vernachlässigt und eine Mittlung der Werte vorgenommen.

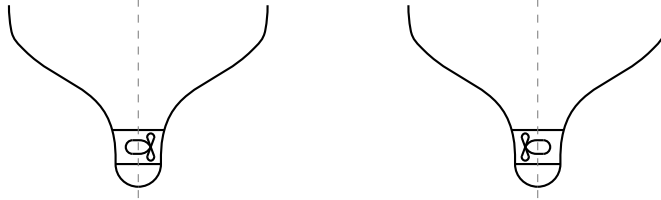


Abbildung 27: Einbaurichtung der Gondel des Bugstrahlruders.

Die zusätzlich generierten Kräfte haben ihren Kraftangriffspunkt nicht zwingend bei der gleichen x-Koordinate wie der Kraftangriffspunkt des Schubes des Querstrahlruders. Die Verschiebung entsteht durch die zusätzlich wirkenden Interaktionskräfte I_1 und I_2 . Die Druckfelder bilden sich aufgrund der Geometrie des Schiffsrumpfes in Längsrichtung unsymmetrisch um den Tunnel des Querstrahlruders aus.

Mit Gleichung 27

$$I_{N,Quer}^* = \frac{N_0}{Y_0 \cdot x_{Quer}} = \frac{(T \cdot x_{Quer}) + ((I_1 + I_2) \cdot x_{I^*})}{Y_0 \cdot x_{Quer}} = 1 + \frac{(I_1 + I_2) \cdot x_{I^*}}{Y_0 \cdot x_{Quer}} \quad (27)$$

wird die relative Verschiebung zur Position des Querstrahlruders aus den Messwerten des Modellversuchs berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 28 für Bugstrahlruder und für Heckstrahlruder in Abbildung 29 gegeben.

Aus den Werten der Bugstrahlruder geht hervor, dass es in jedem Fall zu einer Vergrößerung des Giermomentes kommt. Somit liegt der Kraftangriffspunkt der Interaktionskräfte vor der Position des Bugstrahlruders.

Die Interaktionskräfte der Heckstrahlruder zeigen ein ähnliches Verhalten. Jedoch ist die Verstärkung des Giermomentes kleiner, was mit der Geometrie des Totholzes und somit dem Strömungsein- und -austritt zu erklären ist. Diese weist im Gegensatz zu Bugwulstspanten keine Änderung der Breite in Höhen- und Längsrichtung auf.

4.1 Interaktionen am Schiffsrumpf

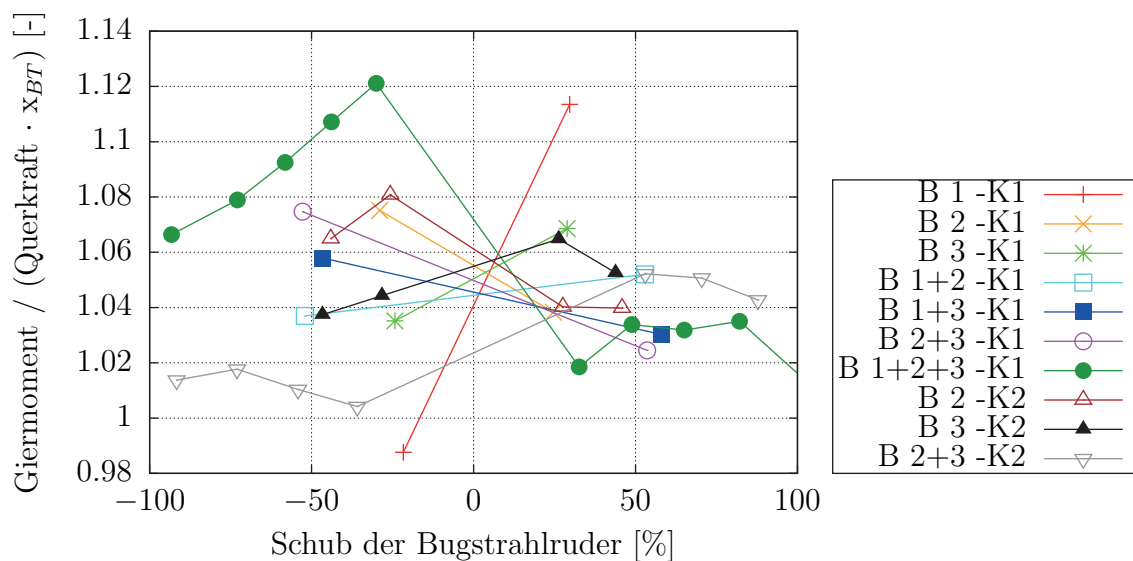


Abbildung 28: Verschiebung des Kraftangriffspunktes der Bugstrahlruder.

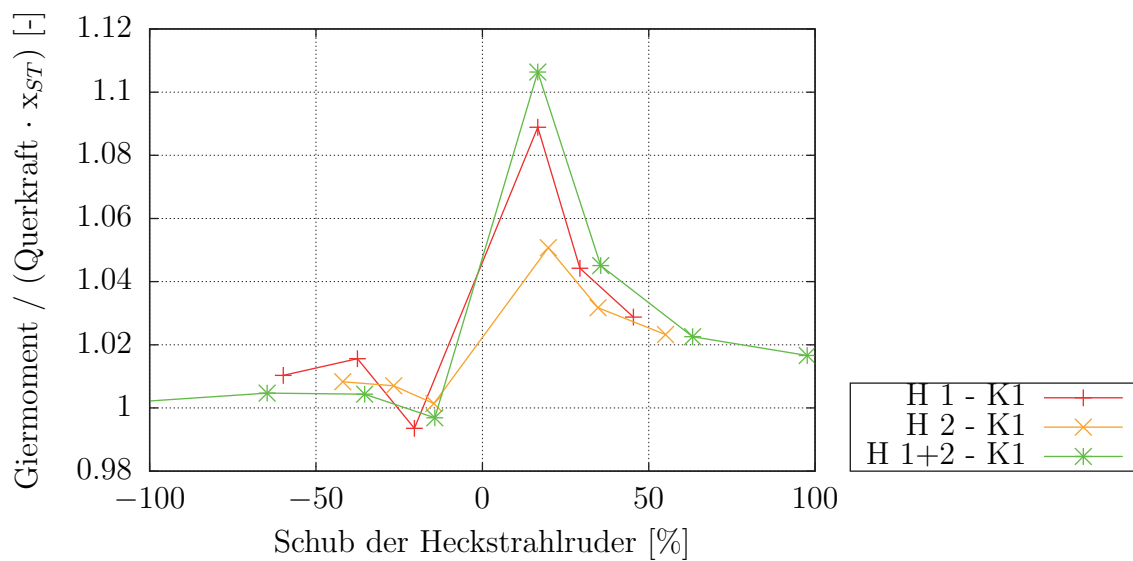


Abbildung 29: Verschiebung des Kraftangriffspunktes der Heckstrahlruder.

Die abgeleiteten Verstärkungsfaktoren sind in Tabelle 7 dargestellt. Hierbei wird abhängig von der Anzahl der Querstrahlruder der Interaktionseffekt für das Bug-

und Heckstrahlruders bestimmt. Bei den Werten handelt es sich jeweils um den Minimalwert. Messausreißer sind ausgenommen.

Tabelle 7: Verwendete Faktoren für die Beschreibung der Interaktionen an den Querstrahlrudern.

		Anzahl der Querstrahlruder		
		1	2	3
Bugstrahl- ruder	Verstärkung des Schubes	1.275	1.300	1.25
	Verschiebung des Angriffspunktes	1.025	1.030	1.05
Heckstrahl- ruder	Verstärkung des Schubes	1.025	1.010	1.000
	Verschiebung des Angriffspunktes	1.010	1.010	1.000

Bei den Berechnungen zum dynamischen Positionieren wird als Randbedingung der maximal mögliche Schub der Querstrahlruder und der Kraftangriffspunkt angegeben. Daher werden die Querkräfte und der resultierende Kraftangriffspunkt mit den ermittelten Faktoren bestimmt.

4.1.2 Propellerkräfte und Schultermoment

Bei den Untersuchungen der Propeller handelt es sich um Festpropeller, die sowohl über oben nach innen drehend als auch über oben nach außen drehend betrieben wurden. Daraus lässt sich der Einfluss der Drehrichtung auf die Wechselwirkungen mit dem Rumpf ableiten. Für die Auswertungen werden die globalen Kräfte in Längs- und Querrichtung und das Giermoment herangezogen. Für die Auswertung wurden ebenfalls die Modellversuchsergebnisse von *MARIN (2013)* verwendet.

Zunächst werden Versuchsreihen betrachtet, bei denen der Betriebszustand des Backbord-Propellers vorgegeben ist und der Steuerbord-Propeller so angepasst wird, dass die Längskraft zu null ausgeglichen wird, was dem Anlegemanöver entspricht. Für die Auswertung wird das Drehzahlverhältnis der Propeller bestimmt. In Tabelle 8 sind die vorgegebenen und gemessenen Werte für die Drehzahl und das berechnete Verhältnis dargestellt.

Aus den Messungen geht hervor, dass das Verhältnis der Drehzahlen des vorwärts- und rückwärtsdrehenden Propellers unabhängig vom Betriebspunkt ist. Hingegen

4.1 Interaktionen am Schiffsrumpf

ist die Drehrichtung der Propeller, also über oben nach innen oder nach außen drehend, entscheidend und beeinflusst das Drehzahlverhältnis. Es lässt sich ableiten, dass sich bei den Propellern, die bei Vorwärtsschub über oben nach innen drehen, ein Verhältnis von 2 zu 3 einstellt. Bei den Propellern, die über oben nach außen drehen, ergibt sich ein Drehzahlverhältnis von vorwärts zu rückwärts drehendem Propeller von 3 zu 4. Damit sind die Effekte bei außendrehenden Propellern geringer.

Bei den Berechnungen zum dynamischen Positionieren ist auch der Maximalwert des Vorwärts- und Rückwärtsschubes relevant. Mit den ermittelten Drehzahlverhältnissen, abhängig von der Drehrichtung, werden diese Werte bestimmt.

Tabelle 8: Verhältnis der Propellerdrehzahl bei Vor- und Rückwärtsschub.

	Drehzahl BB	Drehzahl SB	Verhältnis
	[min ⁻¹]	[min ⁻¹]	[-]
Innen-	-90	59.16	-0.657
drehender	-60	40.00	-0.667
Propeller	60	-90.37	-0.664
	90	-136.41	-0.660
Außen-	-90	67.9	-0.754
drehender	-60	45.25	-0.754
Propeller	60	-77.40	-0.775
	90	-116.81	-0.770

Weiterhin haben die direkten und indirekten Druckfelder auf den Rumpf einen Einfluss auf die globale Querkraft und das Giermoment. *Sharma (1983)* veröffentlichte Untersuchungen über den Einfluss der Propellerdrehrichtung. Er erklärte den sogenannten Hovgaard-Effekt, der eine resultierende Querkraft eines Propellers infolge der Propellerrotation beschreibt. Diese führt im Wesentlichen zu einer Beeinflussung des Giermomentes.

Beim dynamischen Positionieren erzeugt oft ein Propeller Vorwärts- und der andere Rückwärtsschub. Der vorwärts wirkende Propeller erzeugt ein Unterdruckfeld

4 BEEINFLUSSUNG DER HYDRODYNAMISCHEN KRÄFTE DURCH INTERAKTIONSEFFEKTE

auf den Rumpf. Durch den rückwärts drehenden Propeller wird ein Überdruckfeld erzeugt. Beide Druckfelder erzeugen eine Querkraft, die in Richtung des vorwärts drehenden Propeller wirkt. In Abbildung 30 (links) sind die direkten Druckfelder auf den Rumpf vereinfacht dargestellt.

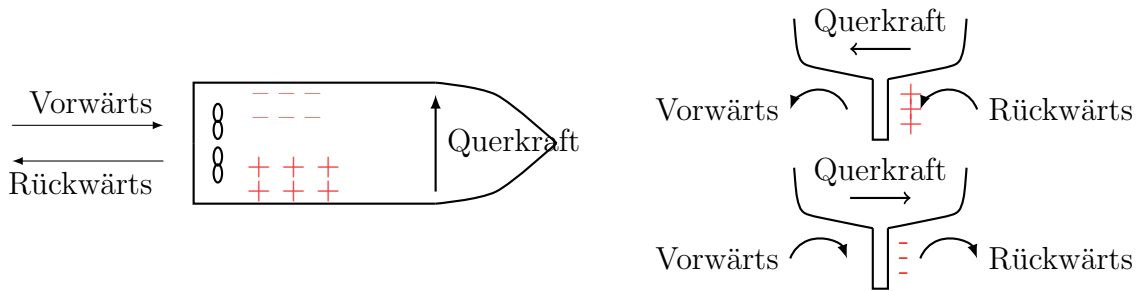


Abbildung 30: Druckfelder auf den Rumpf mit nach außen drehenden (rechts oben) und nach innen drehenden (rechts unten) Festpropellern.

Abhängig von der Drehrichtung des Propellers wird ein indirektes Druckfeld auf dem Totholz des Schiffes erzeugt. Dieses Druckfeld wird durch die Querstromwirkung des rückwärts drehenden Propellers verursacht. Bei über oben nach innen drehenden Propellern wird ein Überdruck erzeugt, welche zu einer Querkraft in Richtung des vorwärts drehenden Propeller führt. Diese Querkraft wirkt der Querkraft durch das direkte Druckfeld entgegen (Abbildung 30, rechts oben). Im Fall des nach außen schlagenden Propellers wird durch den rückwärts drehenden Propeller eine Querkraft erzeugt, die in die gleiche Richtung wie die Querkraft durch das direkte Druckfeld wirkt (Abbildung 30, rechts unten). Zu beachten ist, dass bei der Verwendung von Festpropellern sich die Drehrichtung für den rückwärts drehenden Propeller ändert. Bei Verstellpropellern ist das nicht der Fall.

Zur Quantifizierung werden die Auswertungen zum Einfluss des Propeller auf den Rumpf von *Bley (2014)* herangezogen. Die Messungen der globalen Querkraft lassen jedoch keinen Rückschluss auf die wirkenden Interaktionskraft zu. Daher wird für die Quantifizierung das Giermoment verwendet. Mit Gleichung 28

$$I_{N,Prop}^* = \frac{N_0}{(T_{Prop,BB} + T_{Prop,BB}) \cdot y_{Prop}} \quad (28)$$

4.1 Interaktionen am Schiffsrumpf

wird das Verhältnis vom gemessenen zum theoretischen Giermoment bestimmt. Daraus ergibt sich die Verstärkung des Giermomentes durch die entstehenden Interaktionskräfte und dem Angriffspunkt, welche sich aus den Druckfeldern ergibt. In Abbildung 31 sind die Ergebnisse für die Propeller im Einzelbetrieb (E) und in der Vorwärts-Rückwärtskonfiguration (V/R) für eine Längskraft von null für beide Drehrichtungen -über oben nach innen drehend (innen) und außen drehend (außen)- dargestellt. Daraus ergibt sich, dass sich das Giermoment für über oben nach außen drehende Propeller in beiden Betriebskonfigurationen mehr als verdoppelt. Die Ergebnisse bei einem einzelnen, innen drehenden Propeller zeigt eine deutliche Reduktion auf bis zu 20 % des Giermomentes. In der Vorwärts-Rückwärtskonfiguration wird das theoretische Giermoment durch die Propeller bei beiden Drehrichtungen deutlich verstärkt, wobei die Interaktion bei nach außen drehenden Propeller größer ist. In Abbildung 31 wird jeweils der Propeller mit positivem Schub als Referenz verwendet.

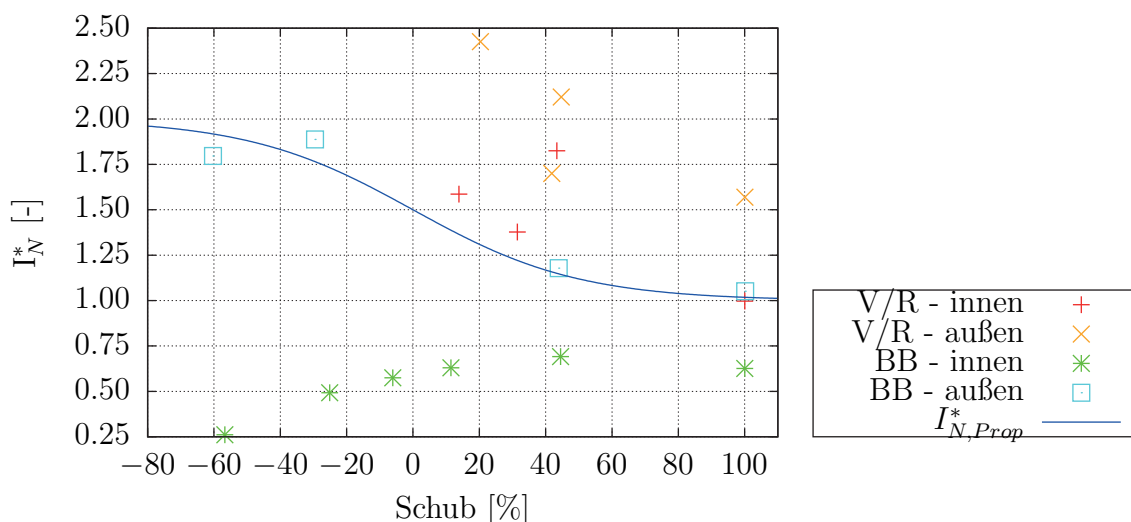


Abbildung 31: Interaktionen der Propeller.

Die theoretischen Überlegungen nach *Sharma (1983)* werden mit den Messungen bestätigt. Aus den Ergebnissen wird abgeleitet, dass die Drehrichtung sinnvoll zu wählen ist. Bei Festpropellern ist die Drehrichtung über oben nach außen von Vorteil. Aufgrund der nicht veränderlichen Drehrichtung von Verstellpropellern sollte die Drehrichtung über oben nach innen unbedingt gewählt werden, wenn die DP-Überlegung für das Schiff wesentlich sind.

Angesichts des genannten Vorteils wird für den über oben nach außen drehenden Propeller im Einzelbetrieb eine Regressionsanalyse durchgeführt. Daraus lässt sich die Funktion, die mit der folgenden Gleichung 29 beschrieben sind, abhängig vom Schub im Verhältnis zum maximalen Vorausschub ableiten:

$$I_{N,Prop}^*(T_{Prop}^*) = 1,5 - 0,5 \cdot \tanh(T_{Prop}^*/50) \quad (29)$$

Die Funktion zur Beschreibung ist zusätzlich in Abbildung 31 dargestellt. Da die gemessene Verstärkung des Giermoments in der Vorwärts-Rückwärtskonfiguration bei beiden Drehrichtungen oberhalb der ermittelten Funktion (Gleichung 29) für einen Propeller liegt, stellt die Verwendung dieser Funktion ein konservatives Vorgehen dar. Jedoch führt sie zu einer verbesserten Abbildung der Interaktionseffekte.

4.1.3 Drehbare Strahler

Bei den drehbaren Strahlern sind zwei Effekte von Bedeutung. Zum Einen beeinflusst eine seitliche Begrenzung den resultieren Schub des drehbaren Strahlers. Zum Anderen führt die Beeinflussung untereinander zu einer erheblichen Schubreduktion. Zur Berücksichtigung beider Interaktionen werden die umfangreichen Untersuchungen von *Lehn (1980)* herangezogen. Bei den Versuchen wurden alle Kräfte und Momente am Querstrahler gemessen. Die Ergebnisse sind dimensionslos angegeben. Ähnliche Rückschlüsse der Interaktion von drehbaren Strahlern wurden auch von *Nienhuis (1992)* veröffentlicht.

Zunächst wurden Versuchsreihen durchgeführt, die eine seitliche Beeinflussung durch eine Wand oder einen weiteren drehbaren Strahler im Abstand s berücksichtigen. Der Abstand wird dimensionslos mit dem Verhältnis vom Abstand s zum Durchmesser D angegeben. In Abbildung 32 sind diese beiden Konfigurationen dargestellt. Der dimensionslose Abstand s/D wurde bei den Versuchen von 2 bis 12 schrittweise vergrößert. Aus den Messungen geht hervor, dass es in keiner der Messungen eine Beeinflussung des Schubes gibt. Daher wird in allen Berechnungen eine Begrenzung durch den Schiffsrumpf oder einen weiteren Strahler nicht berücksichtigt.

4.1 Interaktionen am Schiffsrumpf

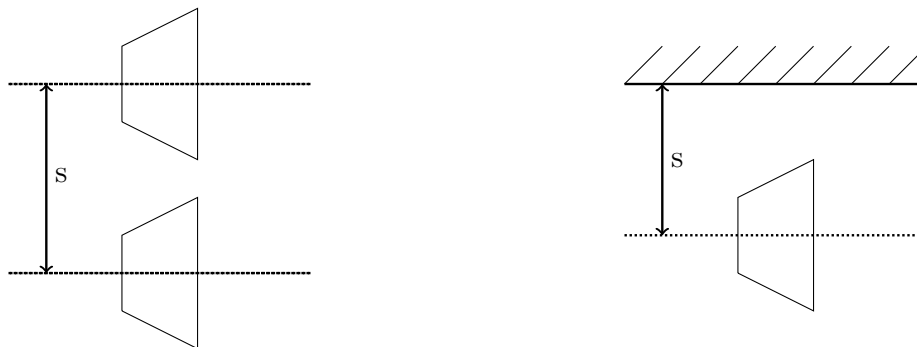


Abbildung 32: Interaktion von drehbaren Strahler bei seitlicher Beeinflussung nach *Lehn (1980)*.

Eine weitere Versuchsreihe beschäftigt sich mit der Anordnung von drehbaren Strahler hintereinander. In Abbildung 33 sind die Konfigurationen dargestellt. Bei den Versuchen wurde der Winkel der drehbaren Strahler und der Abstand zueinander, der mit dem Verhältnis aus dem dimensionslosen Abstand L zum Durchmesser D beschrieben wird, variiert.

Bei der ersten Anordnung werden zwei drehbare Strahler hintereinander auf einer Wirkungslinie betrachtet. Die Winkel beider Strahler sind 0 Grad. Der Abstand L/D wurde von 2 bis 12 variiert. Aus den Ergebnisse geht hervor, dass der erste Strahler keine Schubverluste hat. Der stromabwärts liegende Strahler erreicht auch bei dem maximalen Abstand L/D von 12 nur 90 % des Schubes ohne Beeinflussung. Bei einem dimensionslosen Abstand von 2 wird der Schub auf 50 % reduziert. Für den Entwurf wird aus den Untersuchungen empfohlen, diese Anordnung zu vermeiden und den Bereich durch eine sogenannte *verbotene Zone* zu untersagen. Alternativ wird der Schubverlust mit Gleichung 30

$$T/T_0 = 1 - 0,8^{(x/D)^{\frac{2}{3}}} \quad (30)$$

beschrieben. Die Formulierung wird von *Dang und Laheij (2004)* gegeben und beruht auf den Messungen von *Lehn (1980)* und *Moberg und Hellström (1983)*.

Um die zuvor beschriebene Anordnung und Interaktion zu vermeiden, besteht die Möglichkeit, einen Strahler um den Winkel α zu drehen. Bei den Versuchen

nach *Lehn (1980)* wurden die Abstände L/D von 3,0 und 6,0 untersucht. Daraus geht hervor, dass für einen Abstand von $L/D=3,0$ ab einem Winkel von 30 Grad und für einen Abstand von $L/D=6,0$ ab einem Winkel von 15 Grad keine Interaktionen auftreten. Daher wird für die Berechnungen des dynamischen Positionierens festgelegt, dass abhängig von der Entfernung der entsprechende Winkelbereich als *verbotene Zone* definiert wird. Diese Annahme führt im praktischen Betrieb zu einer wesentlich komplizierteren Regelung der drehbaren Strahler und damit zu erheblichen Schubverlusten.

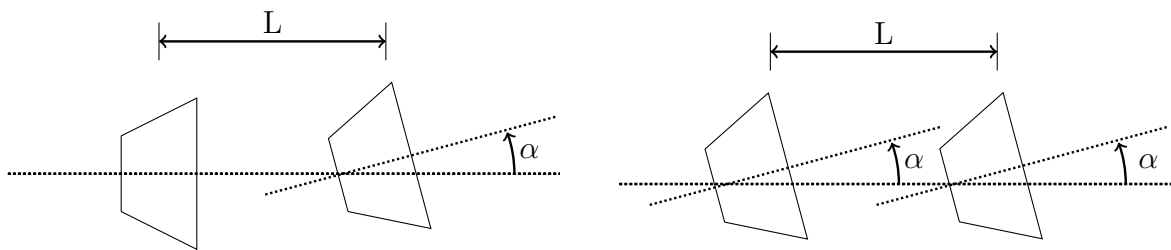


Abbildung 33: Interaktion von drehbaren Strahlern zueinander nach *Lehn (1980)*.

Gleiche Ergebnisse zeigen sich für die Anordnung, bei der beide Strahler um den Winkel α gedreht werden. Daher wird hier das gleiche Vorgehen angewendet.

4.2 Interaktion durch die Schiffsbewegung und Strömung

Die Schiffsbewegung und die Strömung führen zu einer Veränderung der Anströmung der verschiedenen Propulsionskomponenten. Daraus resultiert eine Interaktion, die eine Veränderung des Schubes und der benötigten Leistung der Propulsionskomponenten zur Folge hat. Im Folgenden wird der Einfluss der veränderten Anströmung auf Querstrahlruder und drehbare Strahler vorgestellt.

4.2.1 Querstrahlruder

Aus Untersuchungen geht hervor, dass die Beeinflussung der resultierenden Querkraft von Querstrahlrudern durch Strömung längs zum Schiff berücksichtigt werden muss. Dafür werden die Messungen von *Brix (1993)* verwendet. In Abbildung 35 ist das Verhältnis der Querkraft und des Giermomentes mit und ohne Strömung für verschiedene Strömungsgeschwindigkeit dargestellt.

4.2 Interaktion durch die Schiffsbewegung und Strömung

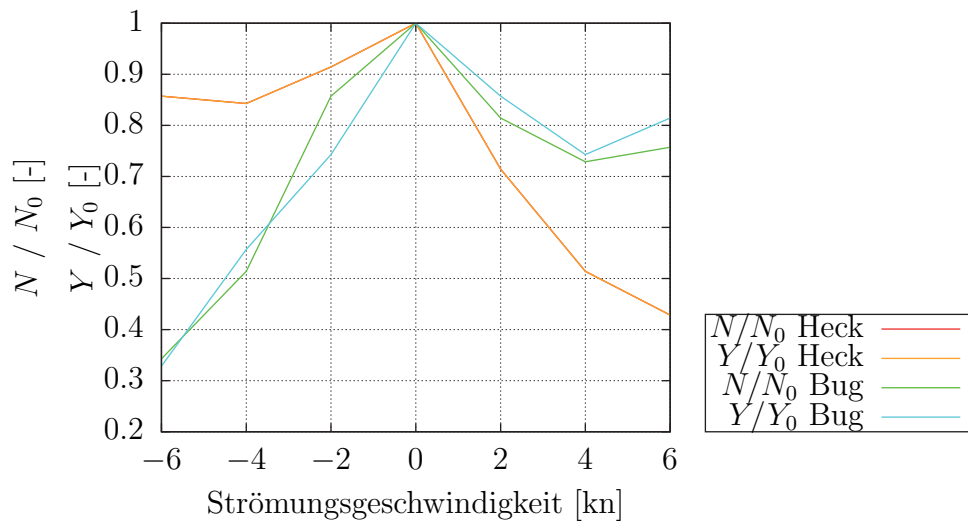


Abbildung 34: Schubverluste durch Strömung nach *Brix (1993)*.

Der Interaktionseffekt bei Queranströmung wird aus der Beschreibung der Querstrahlereigenschaften hergeleitet. Der maximale Schub T_{max} der Querstrahlruder kann mithilfe der Impulserhaltung nach Gleichung 31 beschrieben werden.

$$T_{max} = \rho_W \cdot A_{Quer} \cdot v_j^2 \quad (31)$$

Die Leistung des Querstrahlruders P_{Quer} ergibt sich mit Gleichung 32:

$$P_{Quer} = \frac{\rho_W \cdot A_{Quer} \cdot v_j^3}{2 \cdot \eta} \quad (32)$$

Für die Beurteilung von Querstrahlrudern wird häufig das Verhältnis aus Schub und Leistung verwendet, welches in Gleichung 33 angegeben ist. Wenn man nun den Zusammenhang aus Gleichung 31 und 32 in Gleichung 33 einsetzt, kann das Verhältnis aus dem Wirkungsgrad und der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden.

$$c_0 = T_{max}/P_{Quer} = \frac{2 \cdot \eta}{v_j} \quad (33)$$

Im nächsten Schritt wird Gleichung 33 nach dem maximalen Schub umgestellt und die bisher genannten Zusammenhänge eingesetzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Relativgeschwindigkeit des Schiffes die propellerinduzierte Strömungsgeschwindigkeit verringert. In den folgenden Gleichungen sind die Zusammenhänge dargestellt:

$$T_{max} = c_0 \cdot P_{Quer} \quad (34)$$

$$T/T_0 = c_0^*/c_0 = (v_j - v_{rel})/v_j = 1 - \frac{v_{rel}}{v_j} \quad (35)$$

Daraus folgt, dass die Beeinflussung des Schubes sich aus der propellerinduzierten Strömungsgeschwindigkeit und der Relativbewegung des Schiffes ergibt.

Ein typischer Wert für den Wirkungsgrad wird von *Bertram (2000)* mit 0,8 angegeben. Die durch den Propeller verursachte Strömungsgeschwindigkeit liegt nach *Brix (1993)* bei 8 m/s. Mit der angenommenen Geschwindigkeit ergibt sich für eine Anströmung von 1 kn ein Verlust von 6,1 % und bei 2 kn 12,2 %. Ähnliche Werte werden auch vom *American Petroleum Institute API (2005)* mit 6 % Schubverlust pro 1 kn angegeben.

4.2.2 Drehbare Strahler

Eine Strömung in Längsrichtung von drehbaren Strahlern verändert den Fortschrittsgrad J . Demnach verändert sich der Schubbeiwert k_T . Diese Kennwerte werden mit den folgenden Gleichungen beschrieben:

$$J = \frac{v_{rel}}{n \cdot D_{Prop}} \quad (36)$$

$$k_t = \frac{T}{\rho_{See} \cdot n^2 \cdot D_{Prop}^4} \quad (37)$$

Cozjin et al. (1999) gibt an, wie der Schubbeiwert über den Fortschrittsgrad für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten variiert. Dieser Zusammenhang wird genutzt, um die Interaktionen zu berücksichtigen.

4.3 Interaktion durch Seegang

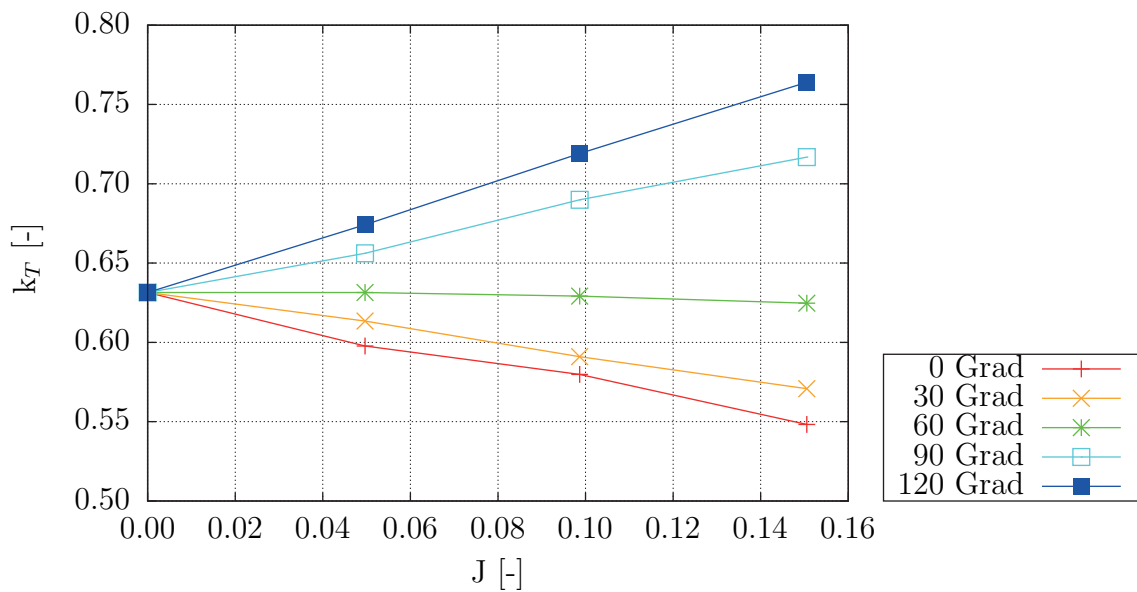


Abbildung 35: Schubverluste durch Strömung nach *Cozjin et al. (1999)*.

4.3 Interaktion durch Seegang

Die Beeinflussung des Schubes der verschiedenen Propulsionskomponenten entsteht im Wesentlichen durch zwei Effekte. Die Wellen beeinflussen die Zuströmung. Weiterhin kann ein Schubverlust durch Ventilation erfolgen. Von *Dijk und Aalbers (2001)* werden diese Effekte genauer beschrieben.

Wöckner-Kluwe (2013) hat ein Verfahren entwickelt, um die seegangsbedingten Schwankungen des Propellerschubes zu bestimmen. Aufgrund der zeitintensiven Rechnungen mit RANSE ist jedoch die Berücksichtigung speziell für den Entwurfsprozess nicht sinnvoll.

5 Umweltkräfte als Basis für die Berechnungsmethoden

Die Beschreibung der Umweltlasten stellt die Basis für die Berechnung zur Fähigkeit eines Schiffes zum dynamischen Positionieren dar. Im Folgenden wird erläutert, welche Berechnungsmethoden verwendet werden, um die Wind-, Wellen- und Strömungskräfte zu bestimmen.

Neben den genannten Kräften gibt es weitere Lasten, die während des dynamischen Positionierens auftreten können. Beispielsweise können Ankerkräfte von Bedeutung sein. Die vorliegende Arbeit berücksichtigt jedoch nur die bereits genannten Umweltlasten.

Auch die Ergebnisse der Umweltlasten werden in dem gleichen Koordinatensystem beschrieben, welches nochmals in Abbildung 36 dargestellt ist. Der Koordinatenursprung liegt in Längsrichtung auf der Hälfte der Länge zwischen den Loten, in Querrichtung auf Mitte Schiff und in Höhenrichtung auf Höhe der Wasserlinie. Die x-Achse ist positiv nach vorne, die y-Achse positiv nach Backbord und die z-Achse positiv nach oben. Die Richtung der Umweltlasten wird mit dem Angriffswinkel α beschrieben.

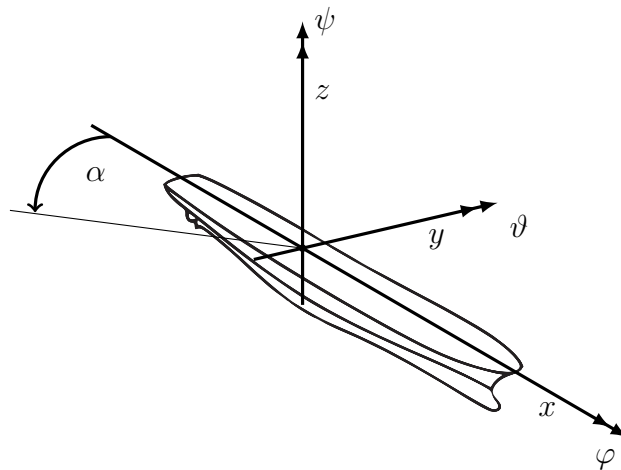


Abbildung 36: Verwendetes Koordinatensystem.

5.1 Berechnung der Windkräfte

Aus der Unterscheidung der DP-Fähigkeit in eine Methode mit konstanten Lasten und einer Betrachtung im Zeitbereich werden im Folgenden Berechnungen für beide Herangehensweisen vorgestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird bei DP-Operationen für beide Methoden als konstant angenommen.

5.1 Berechnung der Windkräfte

Für die Bestimmung der Windlasten wird ein bereits etabliertes Verfahren herangezogen, welches Windwiderstandsbeiwerte verwendet. Wird dieser Wert mit dem Staudruck und der Überwasserlateralfäche multipliziert, ergibt sich daraus die Windlast. Mit den folgenden Gleichung 38 bis 40

$$X_W(\alpha_w) = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot C_X(\alpha_w) \cdot A_{Front} \cdot v_w^2 \quad (38)$$

$$Y_W(\alpha_w) = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot C_Y(\alpha_w) \cdot A_{Seite} \cdot v_w^2 \quad (39)$$

$$N_W(\alpha_w) = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot C_N(\alpha_w) \cdot A_{Seite} \cdot v_w^2 \cdot L_A \quad (40)$$

werden die Kräfte in Längs- und Querrichtung und das Giermoment bestimmt. Die Windkraftkoeffizienten werden beispielsweise mit Hilfe von Regressionsformeln ermittelt. *Blendermann (1993)* hat in diesem Bereich abhängig vom Schiffstyp geometrische Zusammenhänge ermittelt, die speziell im frühen Schiffsentwurf sehr hilfreich sind. Alternativ können Messungen aus dem Windkanal verwendet werden. Eine weitere Möglichkeiten bieten die Daten von Vergleichsschiffen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Windlasten sich bei Schiffsbewegungen verändern. Die Kräfte ergeben sich aus dem scheinbaren Wind, der sich nach den Gleichungen 41 und 42 berechnet.

$$u_{W,s} = v_w(t) \cdot \cos(\mu_W - \psi) - u_S \quad (41)$$

$$v_{W,s} = v_w(t) \cdot \sin(\mu_W - \psi) - v_S \quad (42)$$

Für die Bestimmung der konstanten Last durch Wind wird die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung vereinfacht zeitlich konstant angenommen. In Ab-

Abbildung 37 zeigt die Windkräfte und das Windgiermoment für jeden Angriffswinkel beispielhaft für ein Offshore-Versorgungsschiff dargestellt.

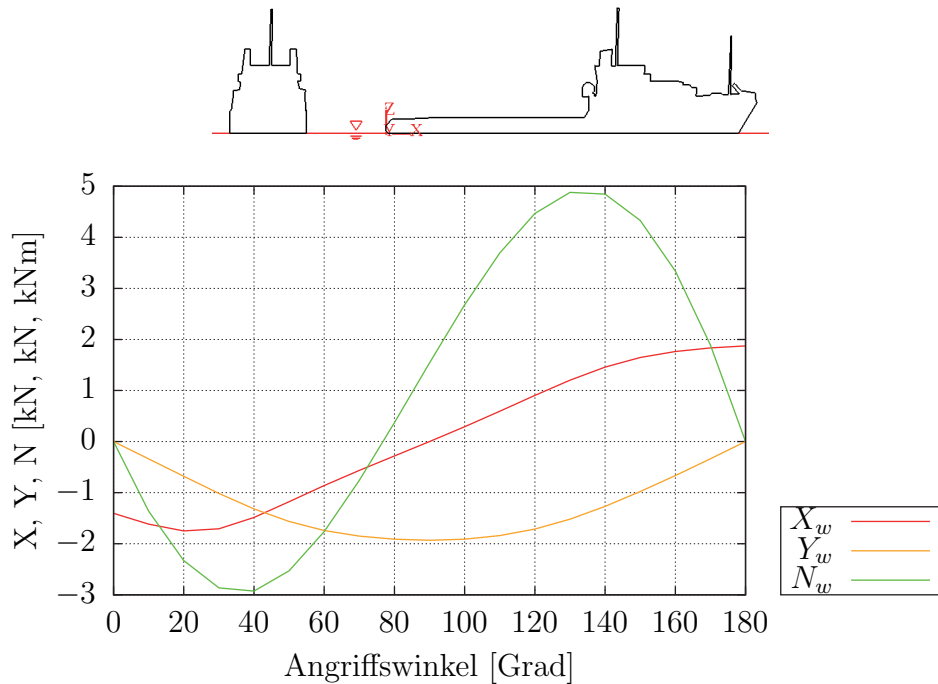


Abbildung 37: Windkräfte und -giermoment für ein Offshore-Versorgungsschiff nach *Blendermann (1993)*.

Für die Berechnung der DP-Fähigkeit im Zeitbereich werden die Windgeschwindigkeit und -richtung zeitabhängig durch einen konstanten und einen fluktuierenden Summand mit Gleichung 43 und 44 beschrieben.

$$v_w(t) = \overline{v_w} + v_w(t) \tag{43}$$

$$\alpha_w(t) = \overline{\alpha_w} + \alpha_w(t) \tag{44}$$

In den folgenden Abschnitten wird eine Beschreibung der Windgeschwindigkeit und -richtung im Zeitbereich gegeben.

5.1.1 Beschreibung der Windgeschwindigkeit im Zeitbereich

Die Beschreibung einer solchen zeitabhängigen Störgröße erfolgt durch die Verwendung eines Spektrums. Ein bekanntes Beispiel für die Beschreibung der Fluktua-

5.1 Berechnung der Windkräfte

tionen der Windgeschwindigkeit ist das Spektrum von *Davenport (1960)*. In *Italy (2005)* und *Blendermann (2001)* wird das Spektrum mit den folgenden Gleichungen

$$S_v(\omega) = 4 \cdot K \cdot \frac{\overline{v_W^2}}{\omega} \cdot \frac{X_D^2}{(1 + X_D^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (45)$$

$$\text{mit } K = 0,003 \quad (46)$$

$$X_D = 600 \cdot \frac{\omega}{\pi \cdot \overline{v_W}} \quad (47)$$

für die Bedingungen auf hoher See beschrieben. In Abbildung 38 ist das Spektrum für mittlere Windgeschwindigkeiten von 2 bis 14 $\frac{m}{s}$ dargestellt.

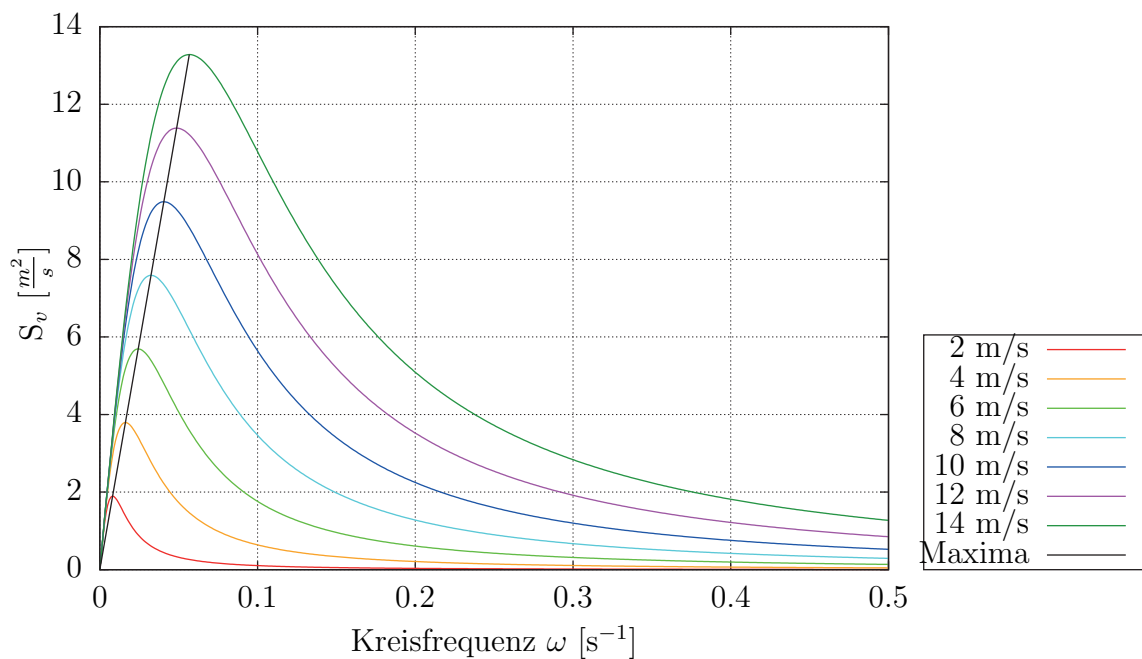


Abbildung 38: Davenport-Spektrum zur Beschreibung der Windgeschwindigkeit.

Mit Hilfe einer inversen Fouriertransformation wird aus dem beschriebenen Spektrum die Zeitreihe nach Gleichung 48

$$v_w(t) = \underbrace{\overline{v_w}}_{\text{stat. Anteil}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{\infty} (v_{B,i} \cdot \cos(i \cdot \Delta\omega \cdot t - \epsilon_i))}_{\text{inst. Anteil}} \quad (48)$$

ermittelt. Dabei werden die zeitlichen Schwankungen $v_{B,i}$ aus dem Spektrum nach Gleichung 49 abgeleitet, was auch von *Davenport (1960)* gezeigt wird.

$$v_{B,i} = \sqrt{2 \cdot S_v(\omega_i) \cdot \Delta\omega} \quad (49)$$

Beispielhaft ist der zeitliche Verlauf der Windgeschwindigkeit für eine mittlere Windgeschwindigkeit von 6,84 m/s in Abbildung 39 für gemessene und berechnete Werte dargestellt. Die gemessenen Werte sind Unterlagen der *Bordmessung vom FSG-Neubau 721 (2005)* entnommen.

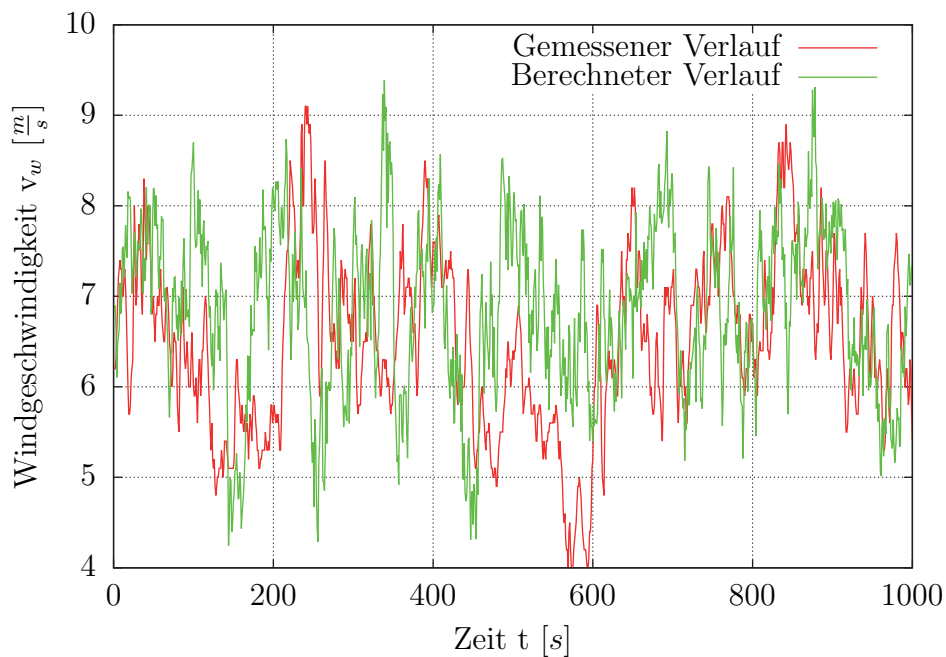


Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Windgeschwindigkeit für $\overline{v_w} = 6,84 \frac{m}{s}$, gemessen (rot) und berechnet (grün).

5.1 Berechnung der Windkräfte

5.1.2 Beschreibung der Windrichtung im Zeitbereich

Vergleichbar mit der Beschreibung der Windgeschwindigkeit im Zeitbereich wird eine Aufteilung des Zeitsignals der Windrichtung in einen stationären und instationären Anteil vorgenommen. Mit Gleichung 44 ist diese Unterteilung bereits beschrieben. Die Formulierung des Spektrum wird in *Lübcke (2012)* hergeleitet. In diesem Fall wird das Spektrum der Windrichtung mit einem Weibull-Spektrum mit Gleichung 50

$$S_{ri}(\omega) = b \cdot \frac{c}{a} \cdot \left(\frac{\omega}{a}\right)^{c-1.0} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\omega}{a}\right)^c\right) \quad (50)$$

mit den folgende Koeffizienten

$$\begin{aligned} a(\overline{v_w}) &= 1,11 \cdot \exp(-0,12 \cdot \overline{v_w}) \\ b(\overline{v_w}) &= 0,08 \cdot \exp(-0,18 \cdot \overline{v_w}) \\ c(\overline{v_w}) &= 1,2 \end{aligned} \quad (51)$$

beschrieben. In Abbildung 40 ist das Spektrum für Windgeschwindigkeiten von 2 bis 14 m/s dargestellt.

Die Zeitreihe der Windrichtung wird erneut mit Hilfe einer inversen Fouriertransformation des Spektrums bestimmt. In Abbildung 41 ist der zeitliche Verlauf der Windrichtungsschwankungen bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 6,84 m/s dargestellt. Die Zeitreihe der Windrichtungsschwankungen wurden während der *Bordmessung vom FSG-Neubau 721 (2005)* aufgenommen.

5.1.3 Berechnung der Windkräfte im Zeitbereich

Mit der Beschreibung der Windgeschwindigkeit und -richtung im Zeitbereich werden die zeitliche Verläufe der Windkräfte bestimmt. In Abbildung 42 sind die Windkräfte in Längs- und Querrichtung für eine Hauptwindrichtung von 0 ° bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 5 m/s für das Beispielschiff dargestellt sind.

5 UMWELTKRÄFTE ALS BASIS FÜR DIE BERECHNUNGSMETHODEN

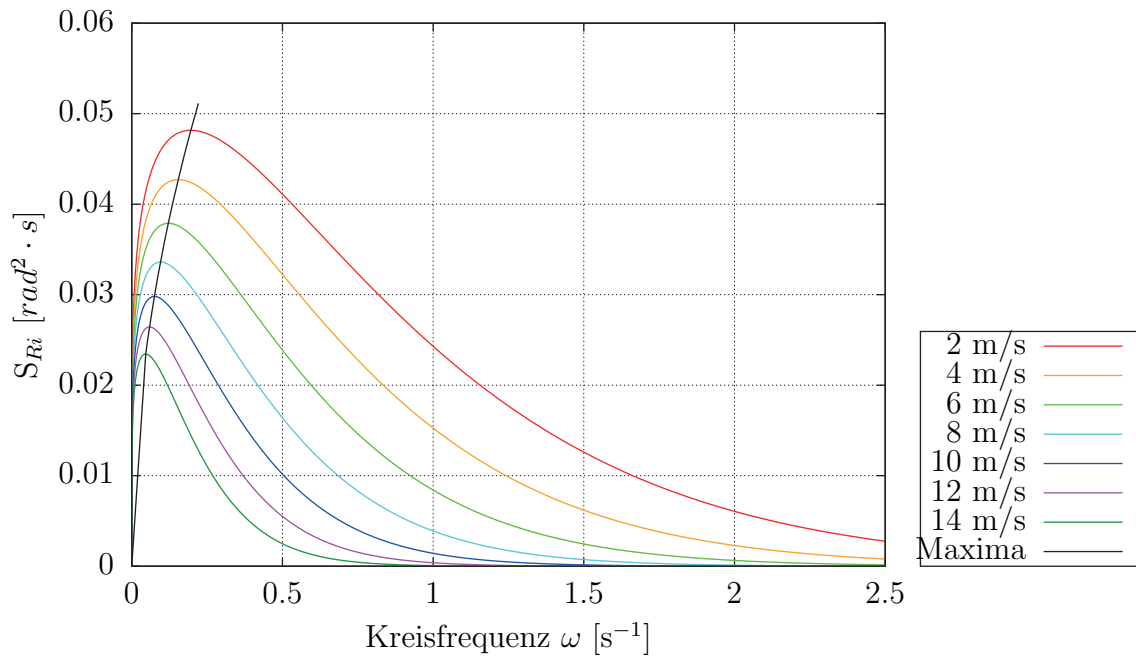


Abbildung 40: Energiedichtespektrum für die Windrichtung.

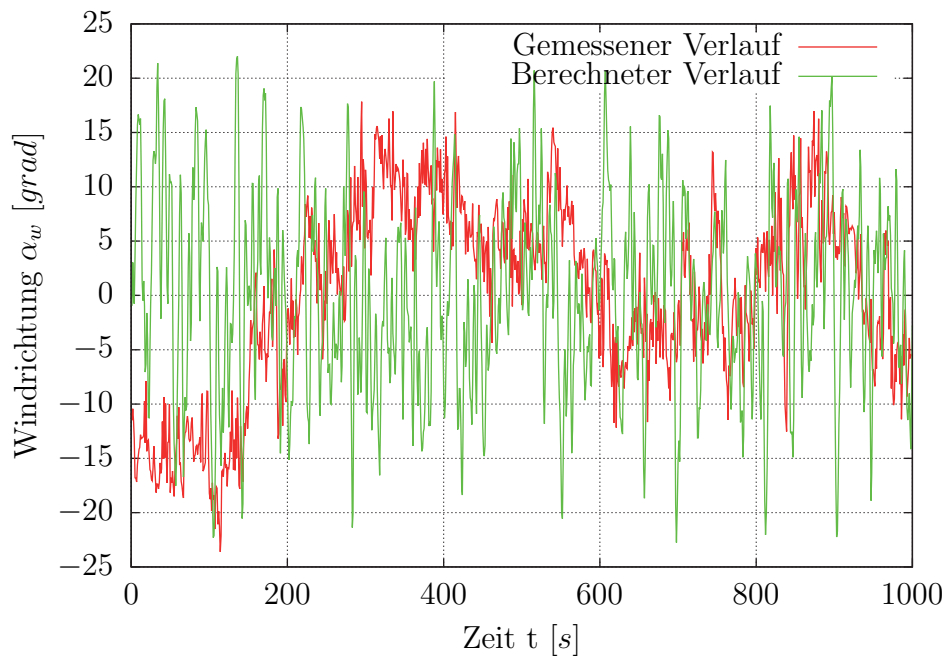


Abbildung 41: Zeitlicher Verlauf der Windrichtung für $\overline{v_w} = 6,84 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, gemessen (rot) und berechnet (grün).

5.2 Berechnung der Wellendriftkräfte und -momente

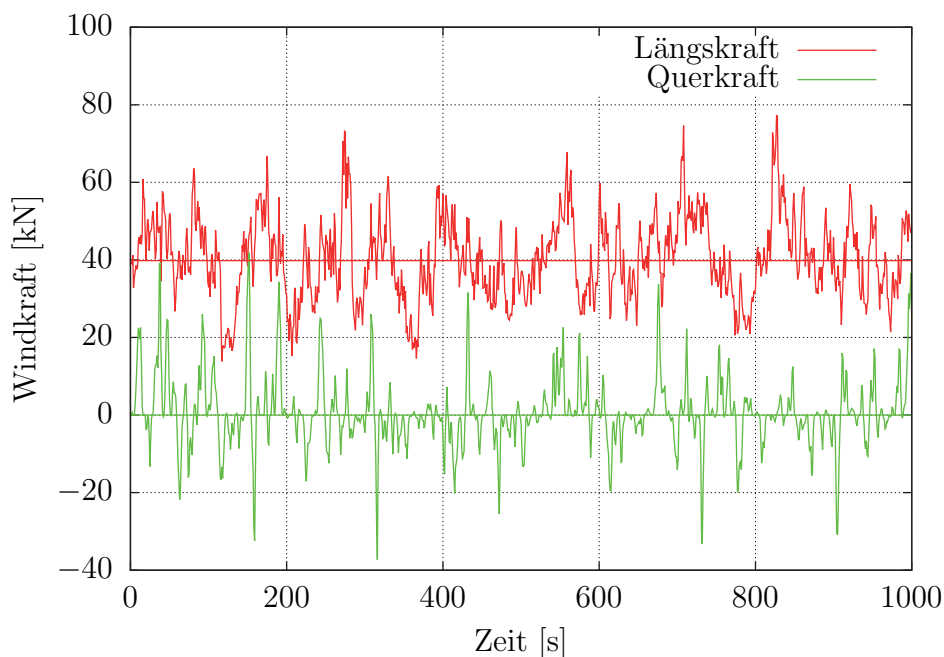


Abbildung 42: Windkräfte in Längs- und Querrichtung im Zeitbereich.

5.2 Berechnung der Wellendriftkräfte und -momente

Wellenkräfte werden allgemein in die erste und zweite Ordnung unterteilt. Während Wellenkräfte erster Ordnung vor allem für die Auslegung von Offshore-Strukturen relevant sind (*Clauss et al. (1994)*), bestimmen die Wellenkräfte zweiter Ordnung, sog. Wellendriftkräfte, das Verhalten des Schiffes beim dynamischen Positionieren. Letztere haben einen Mittelwert, der im Gegensatz zur ersten Ordnung nicht null ist und etwa um eine Größenordnung kleiner ist.

Im Folgenden wird ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wellendriftkräfte in Längs- und Querrichtung und des Giermoments erläutert. Hierfür wird das Verfahren von *Augener und Krüger (2014)* herangezogen. Zunächst erfolgt die Berechnung der Driftkräfte im Frequenzbereich. Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgt die Berechnung im Zeitbereich für unregelmäßige Wellen und auch für den natürlichen Seegang. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Wellendriftkraft für die statische Herangehensweise beim dynamischen Positionieren.

5.2.1 Berechnungen im Frequenzbereich

Für das Verfahren wird eine Streifentheorie schlanker Körper verwendet. Abbildung 43 zeigt das Koordinatensystem zur Beschreibung der Theorie. Der Ursprung liegt im Schnittpunkt auf halber Länge des Schiffes, der Mittschiffsebene und dem Kiel. Weiterhin ist zu erwähnen, dass das System um 180° um die Längsachse zur Ausgabe der Ergebnisse gedreht ist. Demnach sind Längskräfte positiv nach vorne gerichtet. Die Querkräfte zeigen positiv nach Backbord und die Ausgabe des Giermoment erfolgt positiv gegen den Uhrzeigersinn drehend um die nach oben zeigende Achse. Das wiederum entspricht dem allgemein definierten Koordinatensystem zu Beginn des Kapitels.

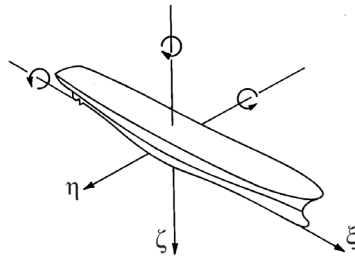


Abbildung 43: Koordinatensystem zur Beschreibung der Wellenkräfte.

Mit den folgenden Gleichungen

$$\overline{F}_\xi^2 = \frac{1}{2} \left(m \omega_e^2 \operatorname{Re} \left(\hat{Y}_{2s} \hat{Y}_6^* - \hat{Y}_{3s} \hat{Y}_5^* \right) + \frac{1}{2} \rho g \sum_{Stb, Port} \int_L |\hat{Y}_{zr}|^2 \frac{dy_w^+}{dx} dx + \right. \quad (52)$$

$$\left. \frac{1}{2} \rho g \left(|\hat{Y}_4|^2 + |\hat{Y}_5|^2 \right) \cdot [A_{x0} (T + z_{x0})]_{Transom} \right) \zeta_a^2$$

$$\overline{F}_\eta^2 = \frac{1}{2} \left(-m \omega_e^2 \operatorname{Re} \left(\hat{Y}_{1s} \hat{Y}_6^* \right) + \rho g \sum_{Stb, Port} \int_L y_w^+ \operatorname{Re} \left(\hat{Y}_{zr0} \hat{Y}_{\zeta Wy}^* \right) dx \right) \zeta_a^2 \quad (53)$$

$$\overline{M}_\zeta^2 = -\frac{1}{2} \omega_e^2 \operatorname{Re} \left[\hat{\alpha}^* \times \Theta \hat{\alpha} \right]_\zeta \quad (54)$$

$$+ \sum_{WL-Elements} \left((\vec{x} - \vec{x}_G) \times \left[\frac{|\hat{p}_w|^2}{4\rho g} \vec{\Delta}_s \times (0, 0, -1)^T \right] \right)_\zeta$$

$$+ x_g \overline{F}_\eta^2 - y_g \overline{F}_\xi^2$$

5.2 Berechnung der Wellendriftkräfte und -momente

werden die Driftkräfte in Längs- und Querrichtung und das Giermoment im Frequenzbereich nach *Augener (2016)* bestimmt. Dabei beschreibt jeweils der erste Summand den mittleren Druck auf das Schiff unterhalb der mittleren Glattwasserlinie. Der zweite Summand berücksichtigt die Kräfte, die durch die Relativbewegung zwischen Schiff und Wasseroberfläche verursacht werden. In Gleichung 52 wird mit dem dritten Term eine Korrektur für einen nichtgetauchten Spiegel bei Vorausfahrt gemacht. Für das Verhältnis des Koordinatenursprungs zum Gewichtsschwerpunkt werden die letzten beiden Terme in Gleichung 54 benötigt.

Das Verfahren wurde von *Augener (2016)* auch für stumpfe Schiffe validiert.

Für das Beispielschiff sind die Ergebnisse der Querkraft im Frequenzbereich für verschiedene Frequenzen und Richtungen in Abbildung 44 dargestellt.

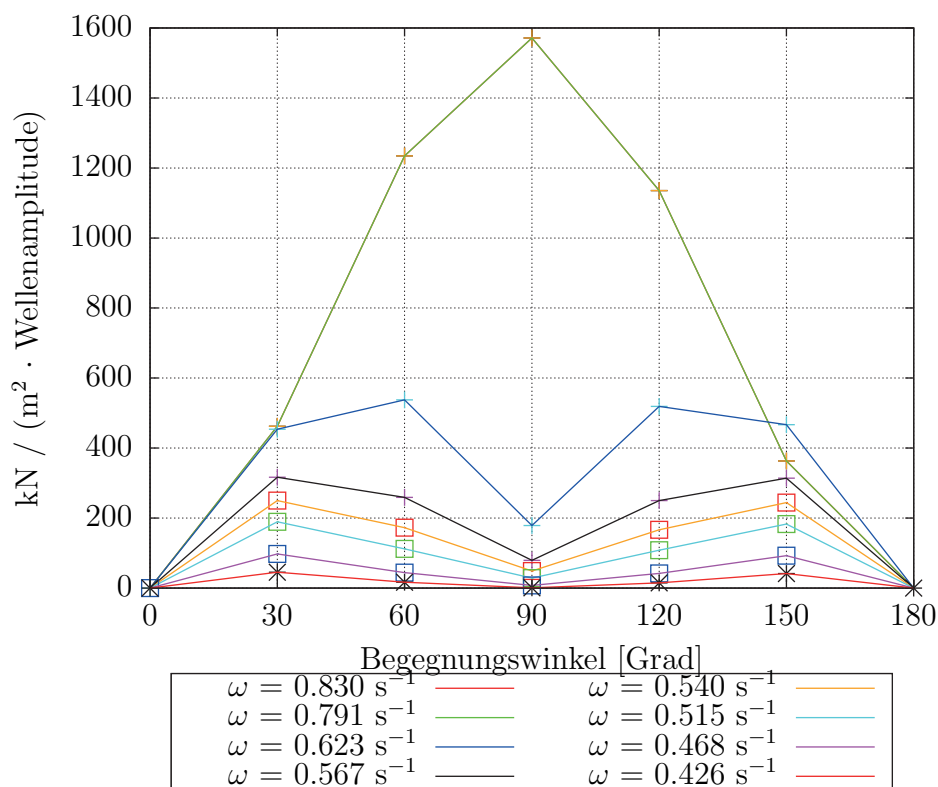


Abbildung 44: Ergebnisse des Beispielschiffes der Wellendriftkraft in Querrichtung im Frequenzbereich.

5.2.2 Berechnungen im Zeitbereich

Die Ergebnisse aus dem Frequenzbereich werden als Eingangsdaten für die in diesem Abschnitt beschriebenen Berechnungen im Zeitbereich verwendet. Zunächst wird das Verfahren für eine Richtung für unregelmäßigen Wellen nach *Clauss et al. (1994)* angewendet. Auf dieser Basis wird das Verfahren für natürlichen Seegang im zweiten Teilabschnitt erweitert.

Langkämmige, unregelmäßige Wellen Zur Bestimmung der zeitabhängigen Kräfte werden die Ergebnisse aus dem Frequenzbereich mit einem Energiedichtespektrum kombiniert. Bei dem Spektrum handelt es sich um eine Beschreibung langkämmige Wellen beliebiger Wellenhöhe und -periode. Entsprechend den Eingangsdaten, welche mit dem Driftkraftkoeffizient α_0 eingehen, ergeben sich daraus die Zeitreihen mit Gleichung 55 nach *Clauss et al. (1994)*.

$$F^2(t) = \frac{\rho}{2} \cdot g \cdot L \cdot \alpha_0^2 \cdot a^2(t) \quad (55)$$

Dabei wird der Ansatz gemacht, dass die Driftkräfte mit dem zeitlich veränderlichem Quadrat der Entwickelten der Wellenerhebung des zufälligen Seegangs schwanken:

$$a^2(t) = \zeta^2(t) + \frac{(d\zeta/dt)^2}{\omega_0^2} \quad (56)$$

Die mathematische Beschreibung einer Zeitreihe der Wellenerhebung erfolgt mit einem Energiedichtespektrum und wird mit Gleichung 57 beschrieben. Für die numerische Umsetzung wird das Spektrum mit j diskretisiert.

$$\zeta(t) = \sum_{j=1}^J \sqrt{2 \cdot S_{zz}(\omega_j) \Delta\omega_j} \cdot \operatorname{Re} \left(e^{i(\omega_j t + \epsilon_j)} \right) \quad (57)$$

Im nächsten Schritt wird der Driftkraftkoeffizient bestimmt, der sich aus der Kombination des Seegangsspektrums mit den Berechnungen aus dem Frequenzbereich nach Gleichung 58 ergibt.

5.2 Berechnung der Wellendriftkräfte und -momente

$$\alpha_0^2 = \frac{\int_0^{\infty} \alpha^2(\omega) \cdot S_{zz}(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} S_{zz}(\omega) d\omega} \quad (58)$$

Dabei geht das Ergebnis aus dem Frequenzbereich dimensionslos mit α ein, was mit der folgenden Gleichung 59 beschrieben wird.

$$\alpha^2(\omega) = \frac{\overline{F^2}(\omega)}{\frac{\rho}{2} \cdot g \cdot L \cdot \zeta_a^2} \quad (59)$$

Eine genauere Beschreibung werden von *Söding (1982)* und *Augener (2016)* gegeben.

Kurzkämmiger, natürlicher Seegang Das Vorgehen zur Berechnung der Wellendriftkräfte für natürlichen Seegang unterscheidet sich im Wesentlichen nicht von dem Verfahren bei unregelmäßigen Wellen. Jedoch beinhaltet die mathematischen Beschreibung des natürlichen Seegangs zusätzlich die Schwankungen der Wellenrichtung. Die komplexe Amplitude des kurzkämmigen Seegangs wird nach *Söding (1982)* mit Gleichung 60 bestimmt.

$$\hat{\zeta}(\omega_j, \mu_l) = \sqrt{2 S_{zz}(\omega_j, \mu_l) \Delta\omega_j \Delta\mu_l} e^{i\epsilon_{j,l}} \quad (60)$$

Mit der folgenden Gleichung

$$\zeta(\omega_j, \mu_l) = |\hat{\zeta}(\omega_j, \mu_l)| \quad (61)$$

wird die Beziehung zwischen der realen und der komplexen Wellenamplitude gezeigt. Demnach entspricht die eigentliche Wellenamplitude gleich dem Absolutwert der komplexen Wellenamplitude.

Dabei wird die Beschreibung des Spektrums mit Gleichung 62 nach *Perez (2005)*

vorgenommen:

$$\int_0^{\infty} S_{zz}(\omega) d\omega \approx \sum_{j=1}^J \frac{\zeta^2(\omega_j)}{2} \quad (62)$$

Unter Berücksichtigung der Schwankungen der Wellenrichtung ergibt sich, analog zu den Überlegungen bei unregelmäßigen Wellen, der Wellendriftkraftkoeffizient mit Gleichung 63:

$$\alpha_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \alpha^2(\omega_j, \mu_l) \cdot \zeta^2(\omega_j, \mu_l)}{\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \zeta^2(\omega_j, \mu_l)} \quad (63)$$

Die Ergebnisse aus dem Frequenzbereich gehen mit Gleichung 64 in die Berechnung des zuvor beschriebenen Wellendriftkraftkoeffizienten ein:

$$\alpha^2(\omega, \mu) = \frac{\overline{F^2}(\omega, \mu)}{\frac{\rho}{2} \cdot g \cdot L \cdot \zeta_a^2} \quad (64)$$

Die Ergebnisse des Beispielschiffes sind für die oben genannten Berechnungsverfahren für die Wellendriftkräfte in Abbildung 45 dargestellt. Als Eingabegrößen wurden eine Wellenhöhe von 4,0 m, eine Wellenperiode von 9,0 s und die Richtung mit 0° bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 0 kn festgelegt. Für die Berechnungen zur Beschreibung des Seegangs wird ein JONSWAP-Spektrum verwendet.

Die Änderungen der Schiffsgeschwindigkeit und des Kurswinkels sind beim dynamischen Positionieren sehr gering. Daher wird dieser Einfluss auf die Wellendriftkräfte vernachlässigt.

5.2.3 Mittlere Wellendriftkraft

Die mittlere Wellendriftkraft ergibt sich aus der Mittlung der Zeitreihe der Wellendriftkraft für den natürlichen Seegang. Dabei wird ein Zeitintervall von 10⁴ s zugrunde gelegt. Diese Zeitdauer entspricht fast drei Stunden, die sich für statistische Kurzzeitbetrachtungen nach *Clauss et al. (1994)* etabliert haben.

5.2 Berechnung der Wellendrifthräfte und -momente

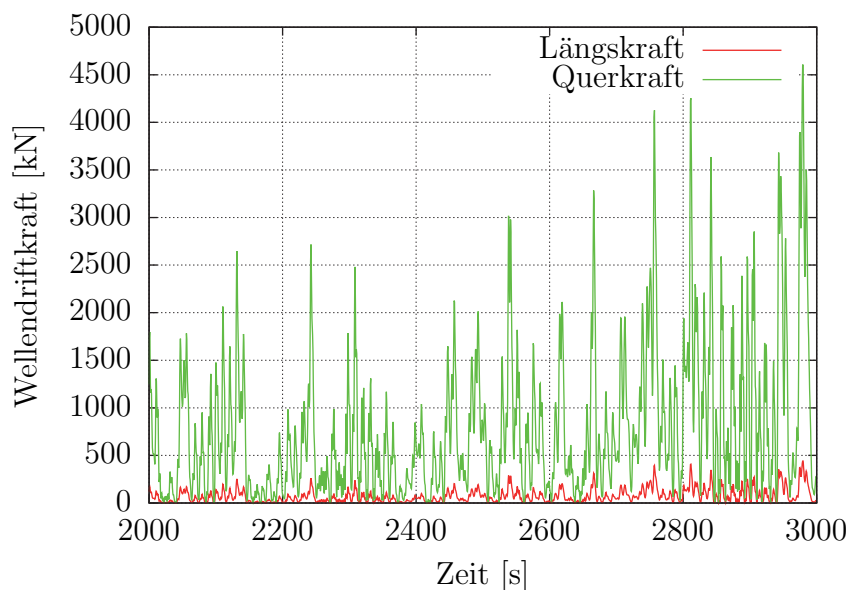


Abbildung 45: Wellendrifthräfte in Längs- und Querrichtung für das Beispielschiff.

5.2.4 Einfluss des Seegangsspektrums auf die Wellendrifthräfte

Für die Berechnung der Wellendrifthräfte wird ein Seegangsspektrum benötigt. Dieses wird mit der signifikanten Wellenhöhe und einer zugehörigen Wellenperiode definiert. Ein Zusammenhang beider Größen wird beispielsweise von der *IMCA (2000)* und dem *DNVGL (2015)* gegeben. Weiterhin wird von *Kongsberg Maritime AS (2005)* folgender Zusammenhang angenommen:

$$T_2 = 6 \cdot H_s^{0,3} \quad (65)$$

Ein weiterer Zusammenhang wird von *Chakrabarti (2005)* gegeben. Dieser wird mit Gleichung 66 beschrieben.

$$T_0 = \sqrt{\frac{H_s}{10^{-4} \cdot 355,66 + 48,19\gamma - 1,9825\gamma^2}} \quad (66)$$

In Abbildung 46 sind die verschiedenen Zusammenhänge von signifikanter Wellenhöhe und Wellenperiode dargestellt.

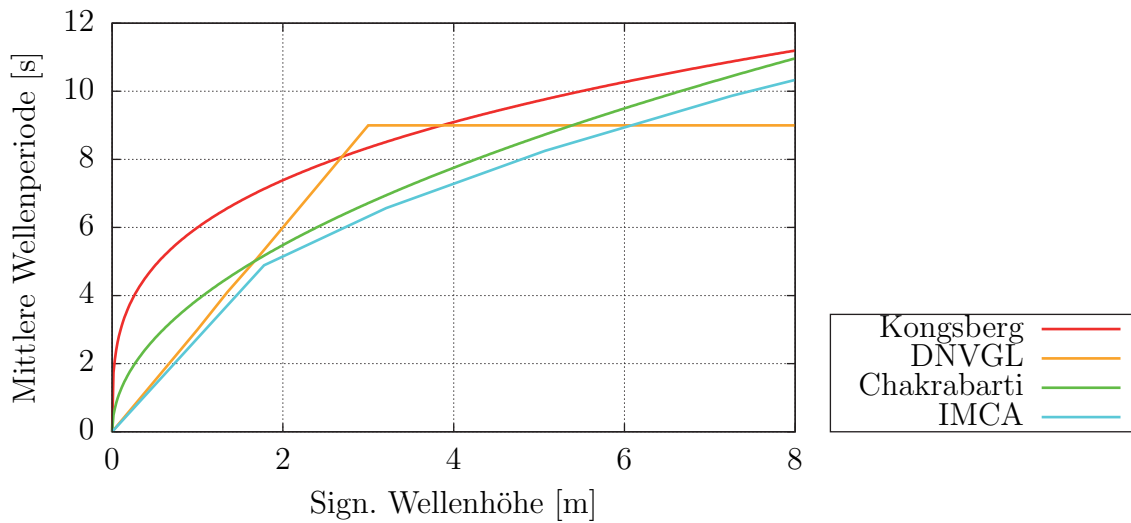


Abbildung 46: Zusammenhang zwischen signifikanter Wellenhöhe und mittlerer Wellenperiode.

Um den Einfluss aus gewählter Wellenperiode und signifikanter Wellenhöhe deutlich zu machen, ist in Abbildung 47 die Querkraft der Wellendriftkraft bei einem Begegnungswinkel von 90 Grad für das Beispielschiff dargestellt.

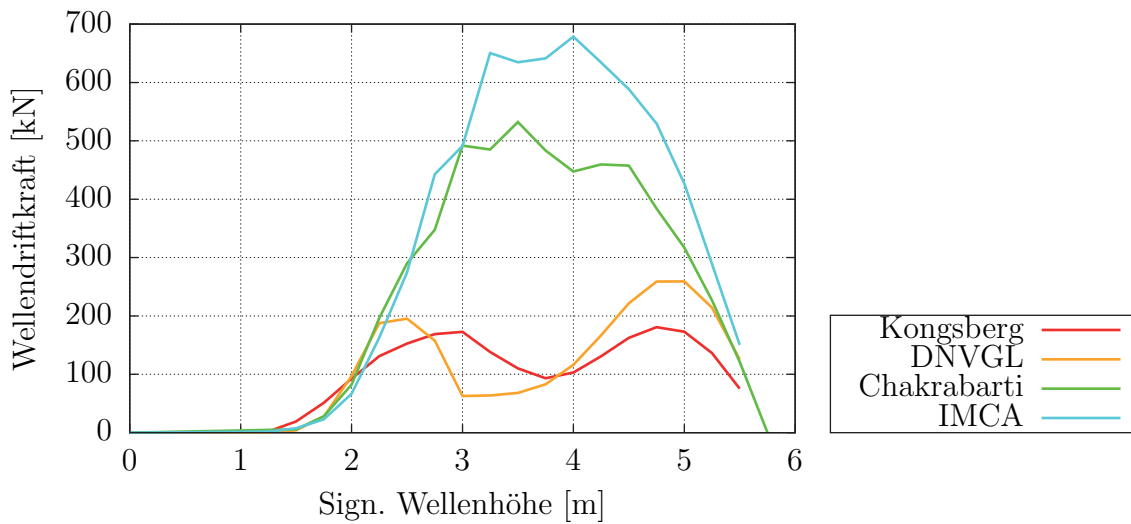


Abbildung 47: Wellendriftkräfte für verschiedene Zusammenhänge von signifikanter Wellenhöhe und mittlerer Wellenperiode für das Beispielschiff.

5.3 Berechnung der Strömungskräfte

Dabei wird deutlich, dass sich die Kräfte signifikant voneinander unterscheiden. Im Bereich der Wellenhöhe von 2 m bis 5 m sind die Unterschiede erheblich. Die berechneten Wellendriftkräfte auf Grundlage des Zusammenhangs zwischen Wellenhöhe und Wellenperiode nach Abbildung 46 liegen für manche Wellenhöhen um den Faktor fünf auseinander. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich bei gleicher Wellenhöhe und einer geringeren Wellenperiode, also kürzere, steilere Wellen, größere Driftkräfte für das Beispielschiff ergeben.

Für den Entwurf ist daraus abzuleiten, dass der Zusammenhang von Wellenperiode und Wellenhöhe korrekt betrachtet und der Einfluss auf jedes Schiff untersucht werden muss. Weiterhin sollte das Einsatzgebiet und der vorherrschende Seegang detailliert berücksichtigt werden, da es sonst zu unrealistischen Abschätzungen der DP-Fähigkeit kommt.

5.3 Berechnung der Strömungskräfte

Die hydrodynamischen Kräfte, die durch Strömung verursacht werden, werden mit Hilfe der Theorie schlanker Körper bestimmt. Dieses Verfahren wurde bereits in Kapitel 3.1 beschrieben. Je nach Berechnungsverfahren der Fähigkeit zum dynamischen Positionieren kommt zu der Kraft und dem Moment, welches durch Strömung verursacht wird, auch die Eigenbewegung des Schiffes dazu. Dieses führt zu einer Veränderung der Relativbewegung zwischen Wasser und Schiff. Mit den folgenden Gleichung

$$u_{Rel} = v_{Str} \cdot \cos(\varphi_{Str}) + u_{Schiff} \quad (67)$$

$$v_{Rel} = v_{Str} \cdot \sin(\varphi_{Str}) + v_{Schiff} \quad (68)$$

wird die Geschwindigkeit für die Berechnung der Rumpfkkräfte bestimmt. Dabei wird die Strömung und die Eigenbewegung des Schiffes überlagert. Die Drehgeschwindigkeit des Schiffes $\dot{\psi}$ ändert sich durch die Strömung nicht. Lediglich die Relativbewegung zwischen Schiff und Wasser ist entscheidend für die Kraft, die aufgrund der Bewegung auf das Schiff wirkt.

6 Dynamisches Positionieren im Zeitbereich

Die Betrachtung des dynamischen Positionierens im Zeitbereich bildet das reale Verhalten des Schiffes und der Maschinenanlage bei diesem Manöver ab. Durch die zeitlich schwankenden Umweltkräfte bleibt das Schiff nicht auf Position. Das wiederum erfordert die Veränderung der hydrodynamischen Kräfte und somit auch der geforderten Leistung der Antriebsanlage. Um nun die Position halten zu können, muss abhängig von der Positionsabweichung die Maschinenanlage angesprochen werden, um dem entgegen zu wirken. Daher benötigt man für die Abbildung des Systems folgende Komponenten:

- Modell zur Bestimmung der Schiffsbewegungen
- Maschinenanlage und Automation
- Regelkreis für die Positionsabweichung

Im Folgenden werden die Komponenten vorgestellt. Dabei bauen sie aufeinander auf, interagieren miteinander und können daher nicht alleinstehend betrachtet werden.

6.1 Modell zur Bestimmung der Schiffsbewegung

Für die Bestimmung der Abweichung der Position und des Kurswinkels wird zunächst allgemein die Bewegungsgleichung aufgestellt, die mit Gleichung 69 beschrieben wird.

$$\mathbf{m} \cdot \ddot{\vec{x}} + \mathbf{d} \cdot \dot{\vec{x}} + \mathbf{c} \cdot \vec{x} = \vec{F} \quad (69)$$

Dabei beschreibt \mathbf{m} die Massematrix, \mathbf{d} die Dämpfung und \mathbf{c} die hydrostatische Rückstellgröße. Der Zustandsvektor wird mit \vec{x} und die äußeren Kräfte mit \vec{F} beschrieben.

Um die relevanten Schiffsbewegungen zu bestimmen, sind die Freiheitsgrade in Längs- und Querrichtung und die Gierbewegung relevant. Durch diese Bewegungen werden keine hydrostatischen Rückstellkräfte erzeugt. Damit entfällt der dritte Term der Gleichung. Die Dämpfung ist für kleine Bewegungen klein und wird daher

6.1 Modell zur Bestimmung der Schiffsbewegung

vernachlässigt. Daraus ergibt sich die Gleichung 70. Der Kraftvektor setzt sich aus der Kraft in Längs- und Querrichtung und dem Giermoment zusammen, wobei sich diese jeweils aus den hydrodynamischen Kräften X_{Hydr} , Y_{Hydr} und N_{Hydr} , den Umweltkräften X_{Umw} , Y_{Umw} und N_{Umw} und den Interaktionseffekten X_{Int} , Y_{Int} und N_{Int} zusammensetzen.

$$\begin{pmatrix} m \\ m \\ I_z \ddot{\psi} + mx_G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_S - v_S \dot{\psi} - x_G \dot{\psi}^2 \\ \dot{v}_S + u_S \dot{\psi} + x_G \ddot{\psi} \\ \dot{\psi} + u_S \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{Umw} + X_{Hydr} + X_{Int} \\ Y_{Umw} + Y_{Hydr} + Y_{Int} \\ N_{Umw} + N_{Hydr} + N_{Int} \end{pmatrix} \quad (70)$$

Dieses Modell der Schiffsbewegung für Manövrierprobleme wurde bereits mit dem Kraftmodell von *Söding (1984)* und später von *Krüger (1998a)* entwickelt. *Haack (2006)* hat das Modell dahingehend erweitert, die Maschinenanlage zu berücksichtigen. Daher wird im Folgenden das bestehende Manövriermodell auf die Problematik des dynamischen Positionierens hin erweitert. In Abbildung 48 ist das verwendete Manövriermodell vereinfacht dargestellt.

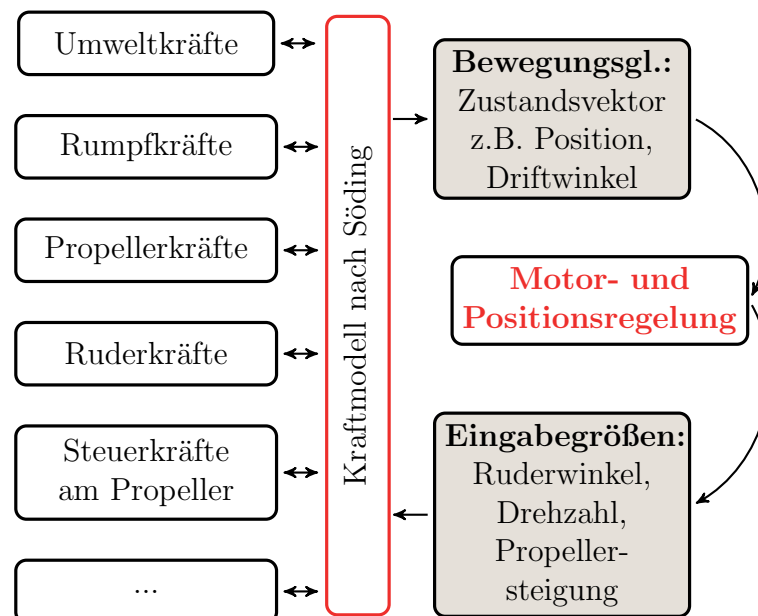


Abbildung 48: Vereinfachte Darstellung des verwendeten Manövriermodells nach *Haack (2006)*.

Mit allen wirkenden Kräften und dem Zustandsvektor wird die Bewegungsgleichung aufgestellt. Mit Hilfe der Euler-Integration wird der Zustandsvektor des nächsten Zeitschritts bestimmt. Anhand dieses Vektors ergeben sich mit den Werten aus der Positions- und Motorregelung die Eingabewerte zur Bestimmung der Kräfte für den nächsten Zeitschritt.

Für die Betrachtung eines DP-Manövers im Zeitbereich müssen zunächst die Umweltbedingungen festgelegt werden. Das beinhaltet folgende Parameter:

- Windgeschwindigkeit
- Strömungsgeschwindigkeit
- Wellenhöhe und -periode

Mit einer statischen Berechnung wird der Anfangszustand bestimmt. Das beinhaltet auch die Drehzahl und Steigung der Propulsionskomponenten und damit auch die benötigte Leistung der Maschinenanlage. Im Vergleich zu dem bestehenden Manövriermodell werden für das DP-Manöver zeitlich schwankende Umweltlasten berücksichtigt. Diese werden durch die Windlasten und die Wellendriftkräfte verursacht.

6.2 Berücksichtigung der Maschinenanlage und Automation

Das bisher vorgestellte Manövriermodell wurde für die Vorhersage von Standard-IMO-Manövern, wie beispielsweise dem Mann-über-Bord-Manöver, Zick-Zack- Versuchen, der Drehkreisfahrt, dem Crash-Stop-Manöver und dem Beschleunigungsmanöver entwickelt. Für eine korrekte Abbildung der Manöver ist die Berücksichtigung der Maschinenanlage von entscheidender Bedeutung. Diese wurde von *Haack (2006)* entwickelt. Abbildung 49 zeigt das Zusammenspiel von Propulsionssystem und Maschinenanlage.

Dabei wird als Startbedingung die Anfangsgeschwindigkeit festgelegt, was einer Fahrhebelposition entspricht. Damit ist die einzuregelnde Drehzahl und ggf. die Propellersteigung vorgegeben. Je nach Manöver wird der Verlauf des Ruderwinkels durch die Automation definiert. Daraus ergibt sich im zeitlichen Verlauf des Manövers ein erhöhter Widerstand und eine Veränderung der Propelleranströmung, was wiederum eine Erhöhung der geforderten Leistung zur Folge hat.

6.2 Berücksichtigung der Maschinenanlage und Automation

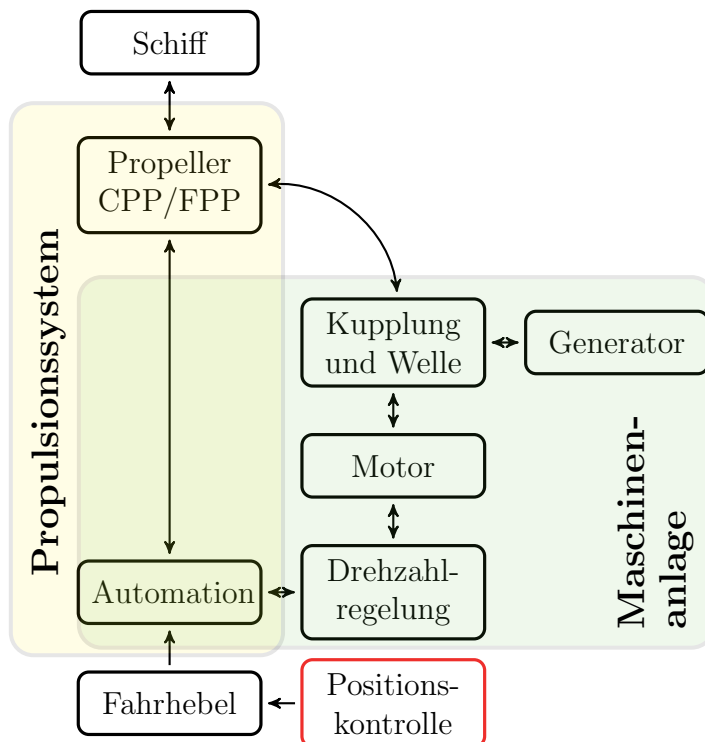


Abbildung 49: Regelungssystem der Maschinen- und Propulsionsanlage nach Haack (2006), angepasst für DP-Operationen.

An dieser Stelle kommt die Automation der Maschinenanlage zum Einsatz. In Abbildung 50 ist das von Haack (2006) entwickelte Blockschaltbild des Anlagenmodells dargestellt.

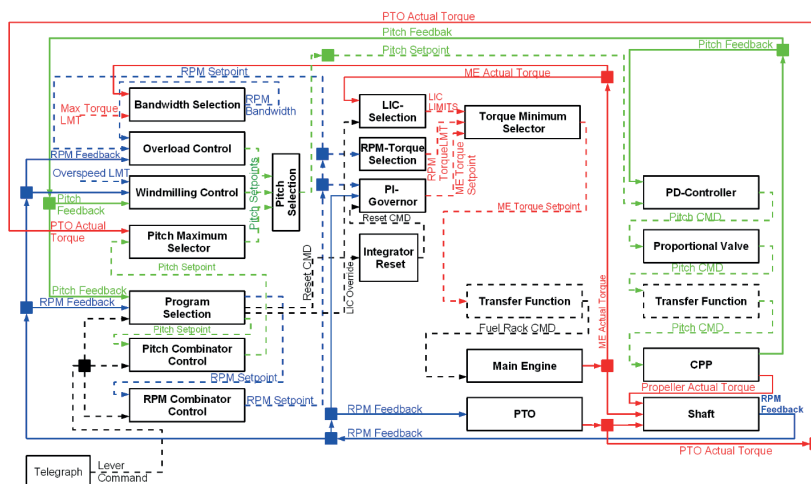


Abbildung 50: Blockschaltbild des Anlagenmodells nach Haack (2006).

Im Gegensatz zu den Standard-IMO-Manövern wird die Fahrhebelposition beim dynamischen Positionieren nicht festgelegt. Diese ergibt sich aus der Vorgabe, die Position zu halten. Abhängig von den Umweltlasten ergibt sich die Anfangsdrehzahl und -Steigung der Propulsionskomponenten. Daher wird das Regelungssystem der Maschinen- und Propulsionsanlage, wie in Abbildung 49 dargestellt, um die Positionskontrolle erweitert. Diese überprüft die aktuelle Position und verändert abhängig von der Positionsabweichung ggf. die Fahrhebelposition. In Unterabschnitt 6.3 wird diese Erweiterung der Maschinenanlage näher erläutert.

6.2.1 Hauptmaschine

Für die Berücksichtigung der Hauptmaschine wird nicht die gesamte Maschinendynamik mit allen physikalischen Effekten abgebildet, da dieses Vorgehen für die Darstellung von Manövrierproblemen zu aufwändig und zeitintensiv wäre. Daher wird als Ersatzmodell ein einfaches Maschinenkennfeld verwendet. Dabei wird die Automation der Maschinenanlage durch folgende Aspekte bestimmt:

- *Steigungskombinator- und Drehzahlkombinator-Kontrolle:*
Abhängig von der Fahrhebelposition werden die Sollwerte der Steigung und der Drehzahl zugeordnet. Man unterscheidet dabei in einen Konstantdrehzahl- und Kombinatormodus. Für die Berechnungen sind die vorab berechneten Kennlinien hinterlegt.
- *Steigungsbegrenzungsmodul:*
Bei der Verwendung eines PTOs wird eine Leistungsreserve vorgesehen, die mit diesem Aspekt berücksichtigt wird.
- *Überdrehzahlschutz:*
Mit Hilfe der Verstellpropellerautomation wird eine Überdrehzahl des Motors vermieden.
- *Überlastschutz:*
Um eine Überlastung des Motors zu vermeiden, wird bei Verstellpropeller die Steigung durch die Automation reduziert, wenn der Motor in die Drückung geht.

6.2 Berücksichtigung der Maschinenanlage und Automation

- Lastaufschaltungsbegrenzung

und drehzahlabhängige Einspritzmengenbegrenzung:

Das Ergebnis der Drehzahlregelung wird nicht direkt als Eingangssignal für die Einspritzmenge verwendet, da dies zu einer unvollständigen Verbrennung oder einer thermischen Überlastung des Motors führen kann. Durch die Lastaufschaltungsbegrenzung und lastabhängige Einspritzmengenbegrenzung wird dieses Problem behoben. Dabei wird in drei verschiedene Betriebszustände unterschieden: Der Normalbetrieb, der Hochfahrmodus und der Herunterfahrmodus, die die Hoch- und Herunterfahrgeschwindigkeiten in Anlehnung an Herstellerangaben bestimmen.

In Abbildung 51 ist das normierte Maschinenkennfeld eines Vier-Takt-Motor für den Dauerbetrieb und das sich ergebene Kennfeld durch die Automation (kurzfristiger Betrieb) dargestellt.

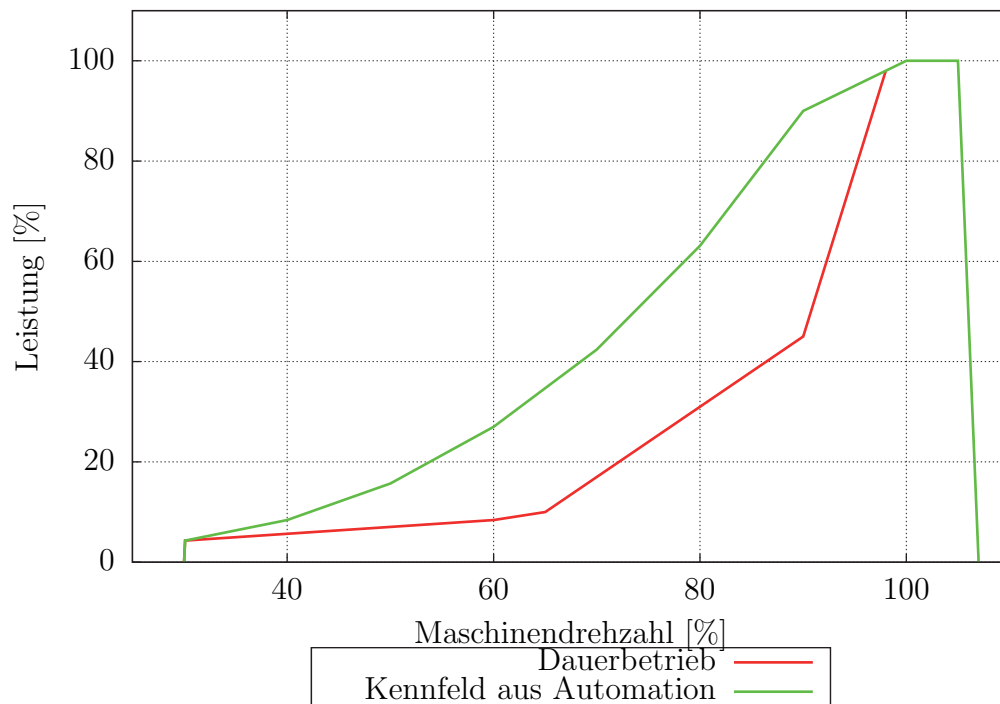


Abbildung 51: Normiertes Maschinenkennfeld eines 4-Takt-Motors nach *Haack* (2006).

Eine detaillierte Beschreibung wird von *Haack (2006)* gegeben. Weiterhin ist in seiner Arbeit auch eine Validierung der Berechnungsmodelle zu finden.

6.2.2 PTO-Generatoren/ Elektrischer Antrieb

Für die Erzeugung des Bordnetzes auf Schiffen werden häufig PTO-Generatoren verwendet. Die benötigte Leistung wird dann über ein Getriebe abgezweigt. Das Bordnetz wird für die elektrischen Antriebe wie den Querstrahlrudern benötigt. Dabei wird die benötigte Leistung der Querstrahlruder mit der folgenden Gleichung bestimmt:

$$P_{PTO} = \sum Y_{Quer}/c_{0,Quer} \quad (71)$$

Für elektrische Antriebe wird in erster Näherung demnach davon ausgegangen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Schub- und Leistungsänderung besteht.

6.3 Positions-Kontrollsystem

Für die Entwicklung des Positions-Kontrollsystems wird zunächst das Schiff als Gesamtsystem analysiert, um den Regelkreis zur Positionsregelung aufzustellen. In Abbildung 52 ist eine vereinfachte Darstellung des Regelkreises gegeben. Dabei wirken die Umweltbedingungen als Störgröße auf das Schiff.

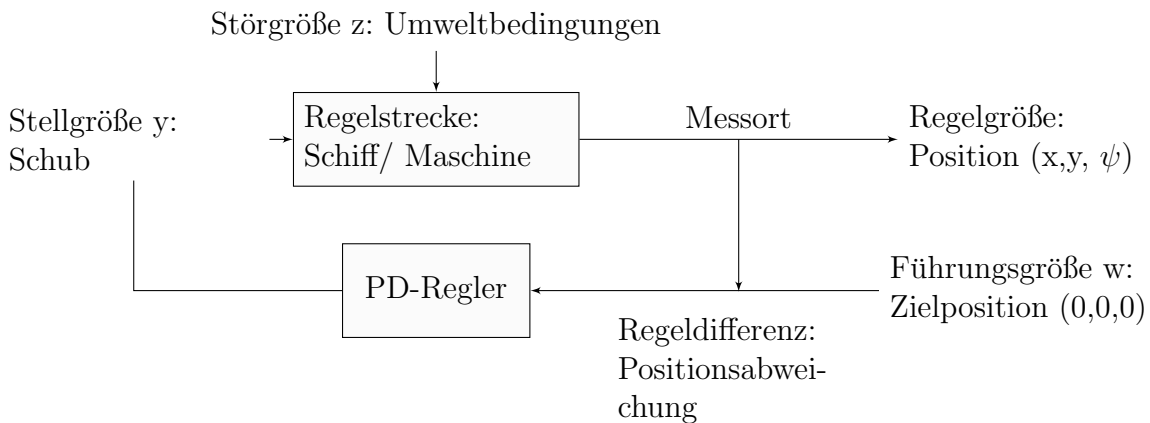


Abbildung 52: Vereinfachte Darstellung des Regelkreises zur Positionsregelung.

6.3 Positions-Kontrollsystem

Die Position \vec{x} wird gemessen und stellt die Regelgröße dar. Ein Vergleich mit der Führungsgröße w , der Sollposition des Schiffes, ergibt die Regeldifferenz e , welche der Positionsabweichung entspricht:

$$\vec{e} = \vec{x} - \vec{w} \quad (72)$$

Die Positionsabweichung ist die Eingangsgröße für den Regler. Für die Aufgabe wird ein PD-Regler gewählt. Auch wenn ein zusätzlicher I-Anteil eine dauerhafte Regelabweichung vermeidet, wird bei dieser Regelungsaufgabe auf diesen Anteil verzichtet. Der I-Anteil führt zu unerwünschten Schwingungen und Instabilitäten.

Der PD-Regler gibt als Ausgangsgröße den geforderten Schub der Propulsionskomponenten als Stellgröße y an. Diese Werte wiederum stellen dann die neuen Sollwerte für die Maschinenregelung dar. Der PD-Regler wird allgemein mit der Gleichung 73 beschrieben. Da die Position in Längs- und Querrichtung und der Kurswinkel geregelt werden soll, handelt es sich jeweils um einen dreidimensionalen Vektor.

$$\vec{y} = K_P \cdot \vec{e} + T_v \cdot \dot{\vec{e}} \quad (73)$$

Aufgrund des komplexen Gesamtsystems ist eine mathematische Bestimmung der Übertragungsfunktion nicht möglich. Wenn also der Übertragungsbeiwert K_P , die Totzeit und die Verzögerungszeitkonstante nicht bekannt sind, geben *Ziegler und Nichols (1952)* einen praktischen Weg zur Ermittlung der Parameter des PD-Reglers an. Zunächst wird der Regelkreis mit einem proportional wirkenden Regler betrieben. Die Verstärkung K_P wird schrittweise erhöht. Bei einem ausreichend hohen K_P führt der Regelkreis eine Dauerschwingung aus. Ausgehend von diesem Wert $K_{P,krit}$ und die sich einstellende Periodendauer T_{krit} der Schwingung werden die Parameter bestimmt. Demnach werden die Regelparameter wie folgt bestimmt:

$$K_P = 0,8 \cdot K_{P,krit} \quad (74)$$

$$T_v = 0,12 \cdot T_{krit} \quad (75)$$

Das Ergebnis der Regelung der Position in Längs- und Querrichtung und dem Kurswinkel ist die zusätzlich erforderliche Kraft in Längs- und Querrichtung und das erforderliche Giermoment. Um diese nun sinnvoll auf die Propulsionskomponenten zu verteilen, wird der Optimierungsalgorithmus zur Bestimmung der statischen Lösung genutzt. Dieser bestimmt für die Vorgabe der externen Kraft und dem Giermoment eine Lösung für die Schübe der Propulsionskomponenten. Zu jedem Schub kann die zugehörige Drehzahl und Steigung ermittelt werden. Diese Werte werden als neue Sollwerte für die Maschinenanlage in die Regelung der Maschine verwendet.

Um das Verfahren zur Bestimmung der Regelparameter zu zeigen, wird das Beispielschiff herangezogen und die y-Position bei einer konstanten Umweltlast von 10 m/s bei einem Begegnungswinkel von 90 Grad betrachtet. Wenn der Proportionalanteil auf $0,5 T_{Quer,max}/m$ stellt sich die in Abbildung 53 dargestellte Dauerschwingung in y-Richtung ein. Die dazugehörigen Kräfte in y-Richtung sind in Abbildung 54 zu finden.

Für die Dauerschwingung stellt sich eine Periode von 43,47 s ein. Aus dem Ansatz von *Ziegler und Nichols (1952)* ergibt sich der P-Anteil zu $0,4 T_{Quer,max}/m$ und der D-Anteil zu 5,22 s. Daraus ergibt sich der zeitliche Verlauf der Positionsabweichung in y-Richtung, der in Abbildung 53 dargestellt ist.

Der konstante Versatz entsteht durch die Wahl des Reglers. Bei der Einstellung der Regelparameter muss jeweils ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Stabilität gefunden werden. Dieser ist mit den verwendeten Werten gegeben. Die Beurteilung der DP-Operation unter realen Bedingungen ist trotz des Versatzes sinnvoll.

6.3 Positionskontrollsystem

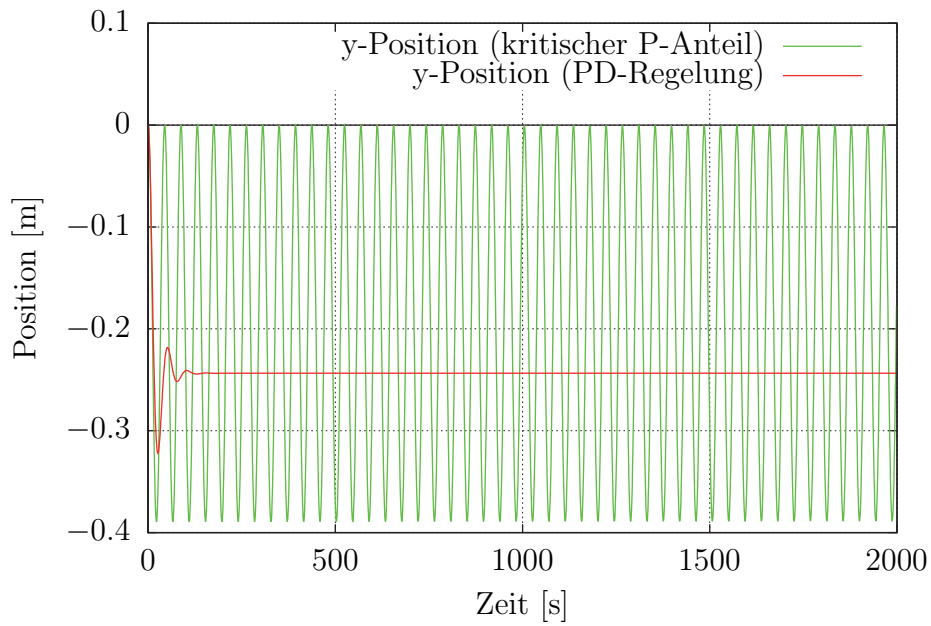


Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf der y-Position mit einer Regelung mit kritischem Proportionalanteil und PD-Regelung nach *Ziegler und Nichols (1952)* für das Beispielschiff.

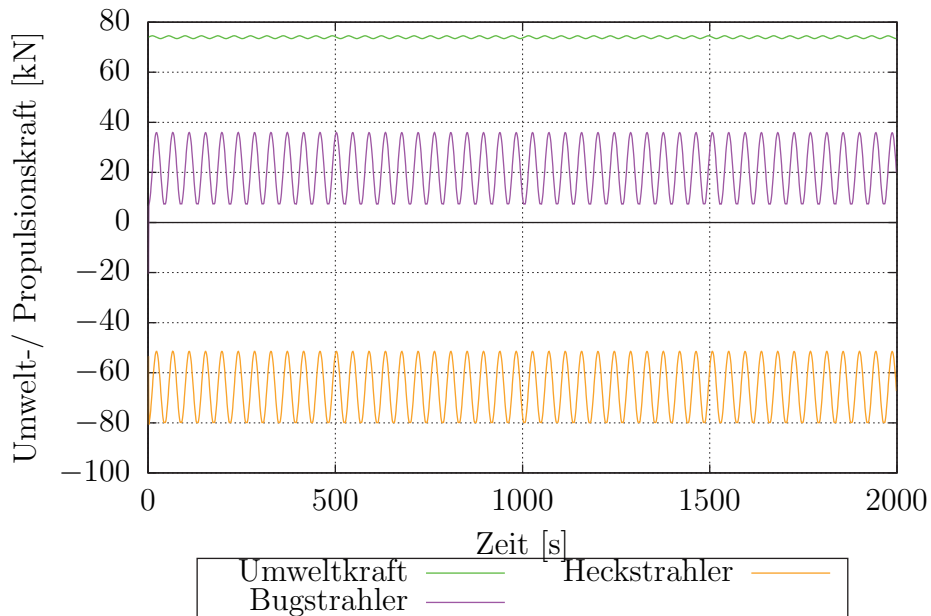


Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der Kräfte in y-Richtung mit einer Regelung mit kritischem Proportionalanteil für das Beispielschiff.

Als weiteres Beispiel für die Einstellung der Regelparameter nach *Ziegler und Nichols (1952)* wird das Beispielschiff unter einer konstanten Windgeschwindigkeit von 20 m/s bei einem Begegnungswinkel von 180 Grad betrachtet. Mit dieser Umweltbedingung wird die Regelung in Längsrichtung ausgelegt. Mit einem Proportionalanteil von $1,5 T_{Prop,max}/m$ ergibt sich die Dauerschwingung, die in Abbildung 55 dargestellt ist. Für die Dauerschwingung in Längsrichtung zeigt sich ein asymmetrischer Verlauf, der aus der unterschiedlichen Geometrie von Vor- und Hinterschiff resultiert.

Aus dem zeitlichen Verlauf bei der Regelung mit kritischem Proportionalanteil ergeben sich für die Regelparameter die Längsrichtung mit einem P-Anteil von $1,2 T_{Prop,max}/m$ und der D-Anteil von 14,1 s. In Abbildung 55 ist der Verlauf der Position in Längsrichtung für die PD-Regelung gezeigt. Ähnlich wie bei der Regelung der Querrichtung ergibt sich ein konstanter Versatz, der vernachlässigt wird. Das gleiche Vorgehen wurde für die Regelung des Gierwinkels angewendet.

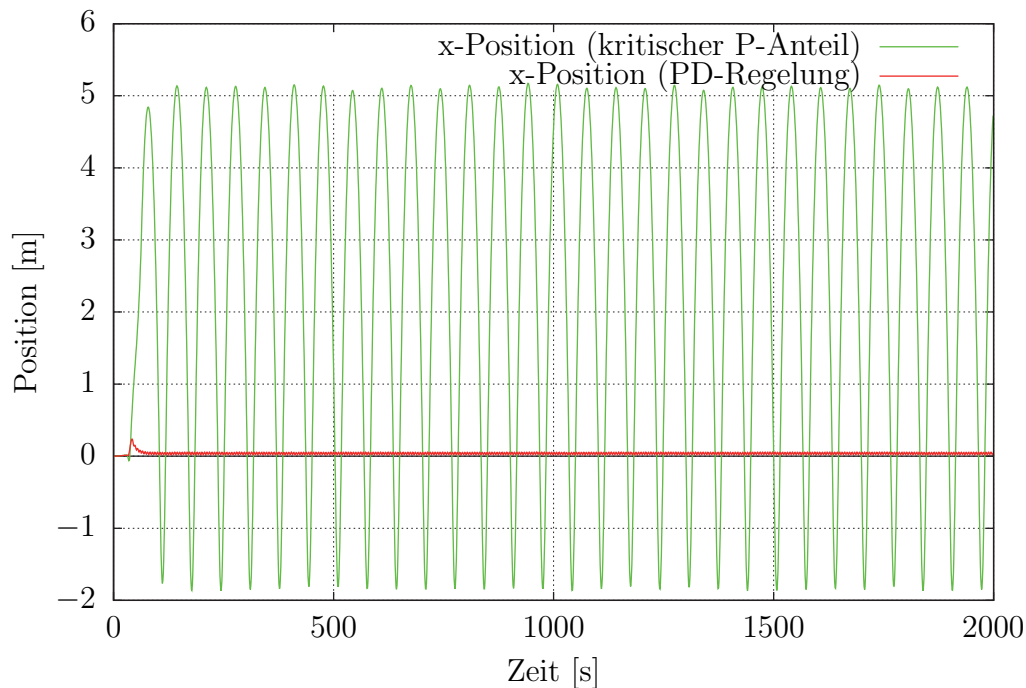


Abbildung 55: Zeitlicher Verlauf der x-Position mit einer Regelung mit kritischem Proportionalanteil und PD-Regelung nach *Ziegler und Nichols (1952)* für das Beispielschiff.

6.3 Positions-Kontrollsystem

Die entwickelte Regelung wird im nächsten Schritt mit realen Umweltbedingungen mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 20 m/s getestet. Der zeitliche Verlauf der Kräfte, der Position, der Geschwindigkeit und der Drehzahl ist in Abbildung 56 und 57 dargestellt und stellt ein sinnvolles Ergebnis dar.

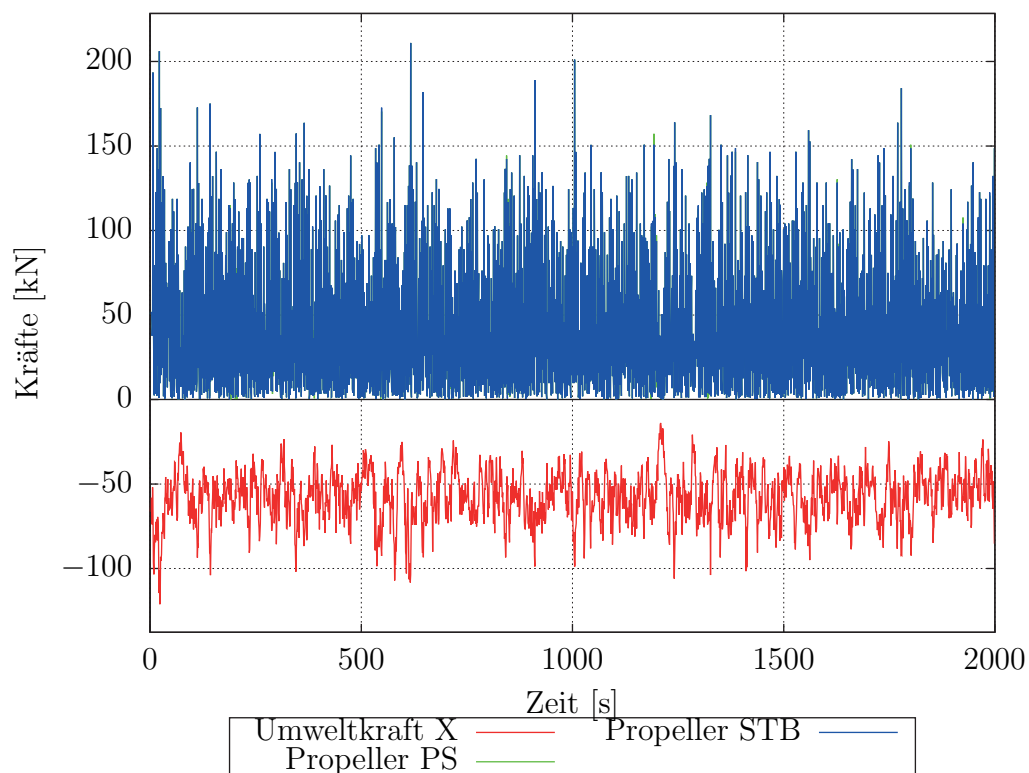


Abbildung 56: Zeitlicher Verlauf der Kräfte bei Umweltbedingungen im Zeitbereich für das Beispielschiff.

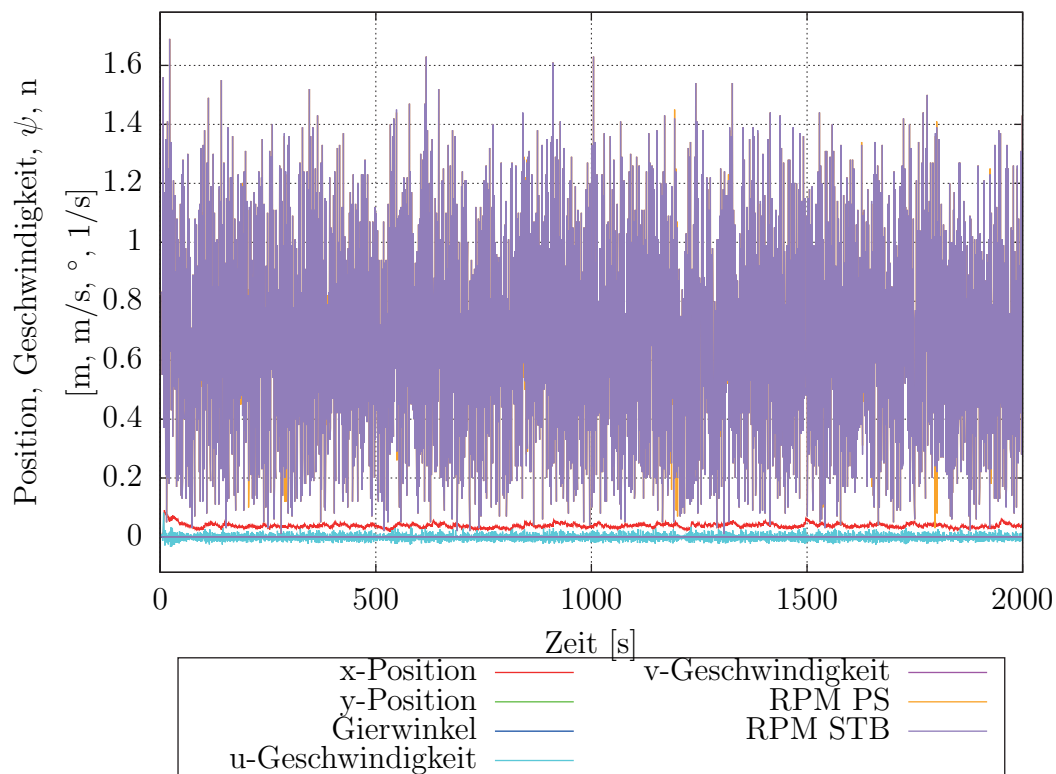


Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf der Position, der Geschwindigkeit, des Gierwinkels und der Drehzahl bei Umweltbedingungen im Zeitbereich für das Beispielschiff.

7 Einfluss von DP-Systemen auf den Schiffsentwurf

Das System zum dynamischen Positionieren kann einen erheblichen Einfluss auf den Schiffsentwurf haben und bauvertragsrelevant sein. Daher sollte die Spezifikation des DP-Systems frühzeitig berücksichtigt werden. Das Antriebskonzept und der Leistungsbedarf können durch ein DP-System maßgeblich bestimmt werden. Um diesen Einfluss zu verdeutlichen, wird im Folgenden ein Schiffsentwurf untersucht. Bei dem Projekt handelt es sich um das Beispielschiff aus der Einleitung.

Um die Service-Geschwindigkeit von 14 kn zu erreichen, wird das Schiff mit zwei Hauptantrieben ausgeführt, die jeweils eine Leistung von 2000 kW besitzen. Das Propulsionskonzept sieht im ersten Entwurf zwei Azimuth-Propeller und drei Querstrahlruder im Bugbereich vor. Die Leistung pro Querstrahlruder ist zunächst mit 1000 kW angegeben.

Die Spezifikation des DP-System sieht DP-2 vor. Damit ist eine Redundanz aller aktiven Komponenten vorgesehen. Für den frühen Entwurf wird hierbei jedoch nur der Ausfall aller Propulsoren einzeln berücksichtigt. Weiterhin ist die ERN mit (99, 99, 96, 95) angegeben. Das bedeutet, dass das Schiff die Position im Intaktfall bei einer Windgeschwindigkeit von mindestens 21,51 m/s hält. Zusätzlich ist der Seegang mit einer signifikanten Wellenhöhe von 4,0 m bei einer mittleren Wellenperiode von 9,0 s spezifiziert. Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt 1,0 m/s.

Um die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren und verschiedene Entwurfskonzepte für das vorgestellte Projekt zu bewerten, werden die folgenden Aspekte betrachtet:

- Entwurf des Überwasserschiffes
- Verschiedene Propulsionskonzepte
- Fehlerszenarien
- Operationsfähigkeit unter realen Bedingungen

Für die Untersuchung werden die in der Arbeit vorgestellten Methoden verwendet. Als Grundlage dienen jeweils die Berechnung der Umweltkräfte und der

hydrodynamischen Kräfte unter Berücksichtigung der Interaktionseffekte. Für die Bewertung der verschiedenen Aspekte werden die statische Methode und die Betrachtung im Zeitbereich genutzt. Daraus wird auch deutlich, welche Methode für welche Entwurfsentscheidung sinnvoll ist.

7.1 Einfluss des Überwasserschiffes

Für das vorgestellte Projekt ist nach den Spezifikationen die Aufteilung des Schiffes nicht vorgegeben. Das beinhaltet auch den Entwurf des Überwasserschiffes, was die Position des Deckshaus und der freien Decksfläche als variable Größen einschließt. Daraus ergeben sich die Möglichkeiten, das Deckshaus vorne oder hinten anzuordnen. In Abbildung 58 ist die Seitenansicht der beiden Entwurfsvarianten dargestellt. Folglich ändert sich auch die Gewichtsverteilung, die Raumaufteilung und die Beladung, so dass jedes Konzept des Schiffes einen zulässigen Entwurf darstellt. Die veränderte Seitenlateralfäche beeinflusst auch die wirkenden Windkräfte und das Windgiermoment. Damit einhergehend ist eine veränderte Fähigkeiten zum dynamischen Positionieren zu erwarten.

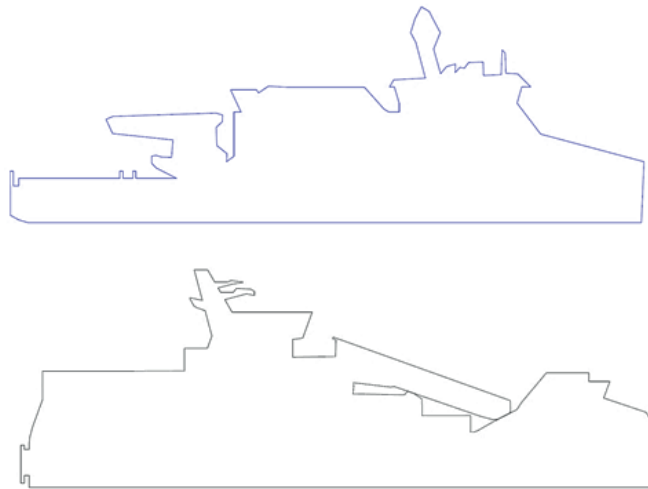


Abbildung 58: Seitenansicht: Deckshaus vorne (oben) und hinten (unten).

Mit den Methoden zur statischen Betrachtung der DP-Fähigkeit ergeben sich die Ergebnisse für das *"Deckshaus vorne I"* in rot und das *"Deckshaus hinten"* in grün in Abbildung 59. Daraus geht hervor, dass die DP-Fähigkeit mit dem Deckshaus

7.1 Einfluss des Überwasserschiffes

vorne bei Umweltlasten aus der Richtung zwischen 10 und 170 Grad reduziert ist.

Um nun mit dem Entwurf, bei dem das Deckshaus vorne angeordnet ist, eine vergleichbare Fähigkeit zum dynamischen Positionieren zu erzielen, wird die Leistung der Querstrahlruder im Bugbereich jeweils um 100 kW pro Bugstrahlruder von 1000 kW auf 1100 kW erhöht. Die benötigte Gesamtleistung der Bugstrahlruder steigt um 300 kW. Die DP-Fähigkeit dieses Konzeptes ist in Abbildung 59 in orange dargestellt und ist mit *Deckshaus vorne II* bezeichnet. Im Bereich von 0 Grad bis 90 Grad wird eine vergleichbar gute DP-Fähigkeit erreicht. Schräg von vorne wird keine Verbesserung erzielt.

Die verschiedenen Seitenlateralfächen verändern im Wesentlichen das Giermoment. Das benötigte Giermoment wird von den Propellern erzeugt. Im Bereich von 0 Grad bis 90 Grad haben die Bugstrahlruder zusätzlich einen positiven Effekt auf die DP-Fähigkeit. Bei Wind schräg von vorne wirkt das Moment durch die Bugstrahlruder dem Giermoment der Propeller entgegen. Da das Giermoment für den Entwurf mit dem Deckshaus vorne bei Wind schräg von vorne vergleichsweise zum Entwurf mit dem Deckshaus hinten erheblich größer ist, erklärt sich damit der Unterschied der DP-Fähigkeit.

Für diesen Entwurf wird das Deckshaus im Vorschiffsbereich angeordnet. Auch wenn die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren reduziert ist, überwiegen die Vorteile für andere Aspekte. Beispielsweise ist die freie Decksfläche bei vorne liegendem Deckshaus größer. Die Anordnung des Krans und der Gangway für den Übergang zu anderen Schiffen, Plattformen und den Windenergieanlagen lässt sich besser gestalten. Weiterhin wirkt sich diese Anordnung positiv auf die Gewichtsverteilung und damit auf die Schwimmelage aus. Es ist also zwingend erforderlich, den Schiffsentwurf als Gesamtsystem zu betrachten und die Vor- und Nachteile der Entwurfsvarianten gegenüberzustellen.

Für die weiteren Berechnungen wird die Leistung der Querstrahler im Bugbereich jeweils mit 1000 kW festgelegt.

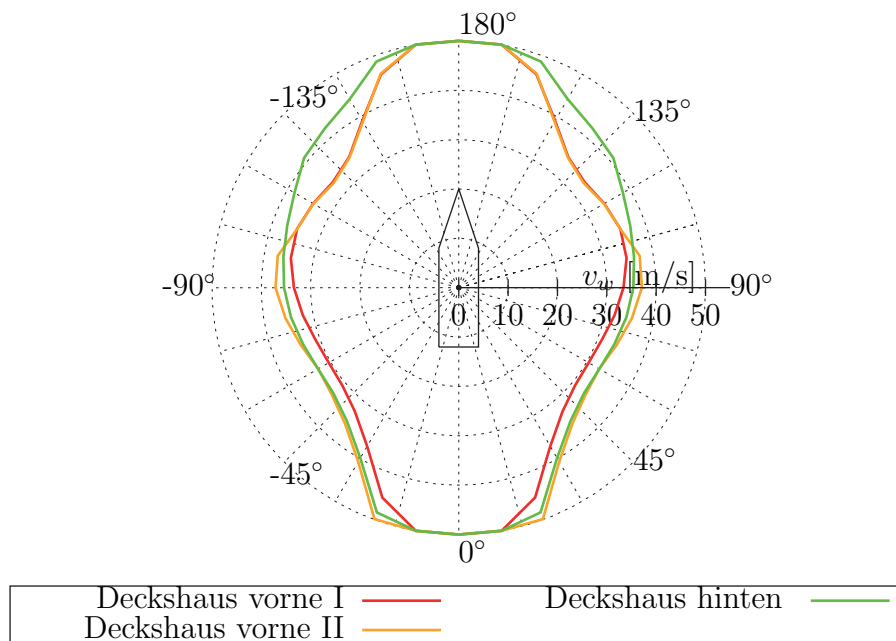


Abbildung 59: DP-Fähigkeit bei verschiedenen Windlateralflächen.

7.2 Bewertung verschiedener Propulsionskonzepte

Auch verschiedene Propulsionskonzepte lassen sich mit Hilfe der statischen Methode zur Berechnung der Fähigkeit zum dynamischen Positionieren bewerten. Bisher war der Entwurf mit zwei Azimuth-Propellern vorgesehen. Als weitere Variation des Schiffsentwurfs wird eine konventionelle Zwei-Propeller-Anlage untersucht. Ein solches Konzept bietet sowohl in den Anschaffungskosten als auch in der Wartung erhebliche Vorteile.

In Abbildung 60 ist die DP-Fähigkeit der beiden Propulsionskonzepte (*Deckshaus vorne I* in rot und *Propeller* in orange) dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren deutlich reduziert ist, da die Hauptantriebe einer Zwei-Propeller-Anlage keine direkten Querkräfte generieren. Jedoch werden durch die Interaktionseffekte indirekte Querkräfte erzeugt und das Giermoment vergrößert, was im Kapitel 4 beschrieben wurde.

Eine Verbesserung der DP-Fähigkeit für die zwei-Propeller-Anlage wird jedoch durch den Einsatz der ohnehin vorhandenen Ruder erzielt. In Abbildung 60 ist das zugehörige Ergebnis in grün dargestellt und mit *Propeller mit Ruder I* bezeichnet.

7.2 Bewertung verschiedener Propulsionskonzepte

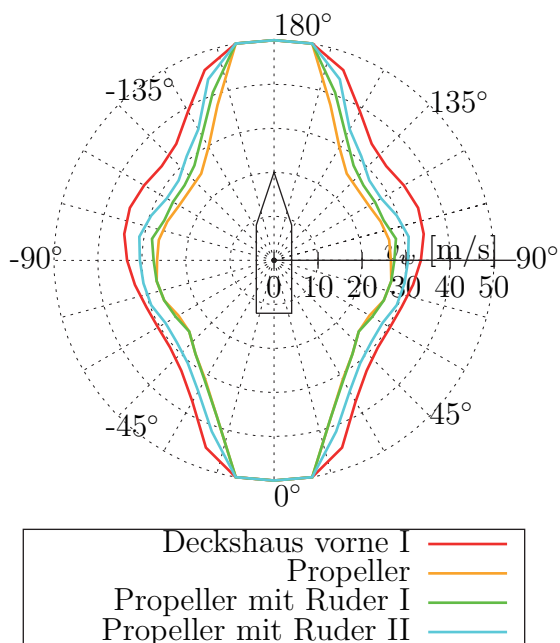


Abbildung 60: DP-Fähigkeit bei verschiedenen Propulsionskonzepten.

Dabei ist zu beachten, dass das Ergebnis nicht für die Betrachtung mit Hilfe der ERN berücksichtigt werden darf, da der Einfluss des Ruders für intakte Schiffe durch die Vorschriften explizit ausgeschlossen wird. An dieser Stelle wird deutlich, dass dieses Vorgehen der Vorschriften nicht sinnvoll ist, da die Ruder die geringste Ausfallwahrscheinlichkeit besitzen.

Um nun in weiten Bereichen die gleiche DP-Fähigkeit mit dem alternativen Propulsionskonzept zu erzielen, wird die Zwei-Propeller-Anlage mit zwei zusätzlichen Querstrahlrudern im Heckbereich ausgestattet. Die Querstrahlruder haben jeweils eine Leistung von 1000 kW. In Abbildung 60 ist das Ergebnis in blau mit *Propeller mit Ruder II* gezeigt. Im Folgenden wird das letztgenannte Propulsionskonzept verwendet, da dieses die Anforderungen des Entwurfes erfüllt und die bereits genannten Vorteile bietet, auch wenn die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren vergleichsweise reduziert ist. Auch wenn die Querstrahlruder im Heckbereich zusätzliche Kosten erzeugen, wird in Summe mit dem Hauptantrieb eine Einsparung erzielt.

7.3 Auswirkungen von Fehlerszenarien auf die DP-Fähigkeit

Zu den Anforderungen an den Entwurf zählt auch der einzelne Ausfall je aller aktiven Komponenten. Hierbei wird jeweils noch eine DP-Fähigkeit gefordert, die mit einer Windgeschwindigkeit von 18,75 m/s angegeben ist. Das entspricht einer ERN von 96, die für diesen Schiffsentwurf gefordert ist.

Abbildung 61 zeigt die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren beim Ausfall jeweils einer Komponente. Abhängig von der Richtung der Umweltkräfte hat der Ausfall der verschiedenen Propulsionskomponenten einen unterschiedlichen Einfluss auf die DP-Fähigkeit.

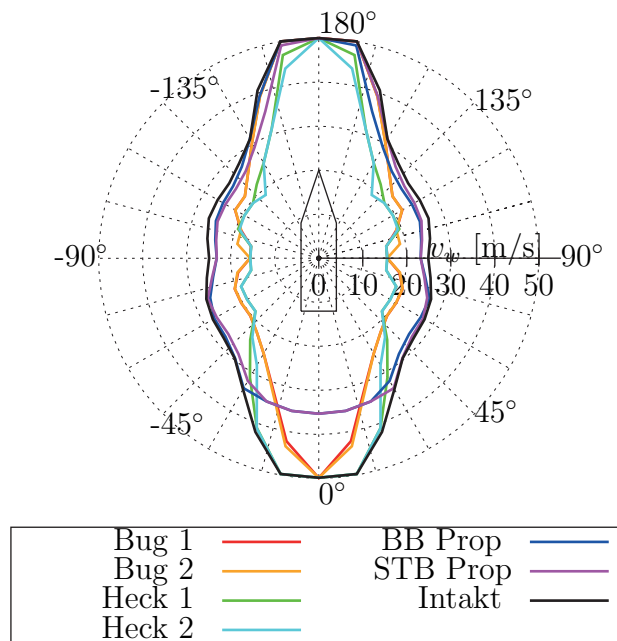


Abbildung 61: DP-Fähigkeit bei Fehlerszenarien jeweils einer aktiven Komponente.

Bei Wind von hinten wird die Umweltgrenze durch den maximalen Rückwärtsschub der Propeller begrenzt. Daher ist beim Ausfall der Propeller hier der Einfluss am größten. Bei Wind von der Seite ist die maximale Querkraft der Querstrahlrunder die limitierende Größe. Bei wirkenden Umweltkräften schräg von vorne muss im Wesentlichen das Giermoment ausgeglichen werden, was sich durch die Kombination aller Komponenten ergibt. Daher ist hier der Einfluss auf die DP-Fähigkeit

7.4 Beurteilung der DP-Operation unter realen Bedingungen

sehr gering. Im Bereich von 0° bis 60° wird das Giermoment erheblich durch die Querstrahlruder im Bugbereich erzeugt. Daher ist der Einfluss auf die DP-Fähigkeit bei Fehlerszenarien dieser Propulsionskomponenten am größten.

7.4 Beurteilung der DP-Operation unter realen Bedingungen

Für die Bewertung des DP-Systems unter realen Einsatzbedingungen wird die dynamische Methode, also dynamisches Positionieren im Zeitbereich verwendet. Als kritischer Betriebszustand wird die Verwendung der Gangway betrachtet. Hiermit wird die Verbindung zwischen Schiff und den Windenergieanlagen für die Einsatzkräfte geschaffen. Als kritischer Zustand wird aufgrund der statischen Berechnungen seitlicher Wind gesehen. Dabei ist gefordert, dass die Positionsabweichung in Querrichtung $\pm 0,5$ m bei einer Windstärke von 12 m/s, einer signifikanten Wellenhöhe von 3,0 m und einer Wellenperiode von 9,6 s nicht überschritten werden darf.

In Abbildung 62 sind die sich ergebenden Querkräfte dargestellt. Zum einen sind die Reaktionen der Querstrahlruder gezeigt. Zum anderen sind die Umweltkräfte abgebildet. Wenn man berücksichtigt, dass sich bei den angegebenen Umweltbedingungen eine mittlere Kraft von 300 kN ergibt, wird deutlich, dass die Last in den zeitlichen Schwankungen um den Faktor zwei größer sein kann.

Aus den Kräften ergibt sich dann wiederum die Positionsabweichung, die in Abbildung 63 gegeben ist. Daraus geht hervor, dass das Schiff eine maximale Abweichung von 0,5 m hat. Die Bewegungen des Schiffes sind also unter den geforderten, realen Bedingungen eingehalten.

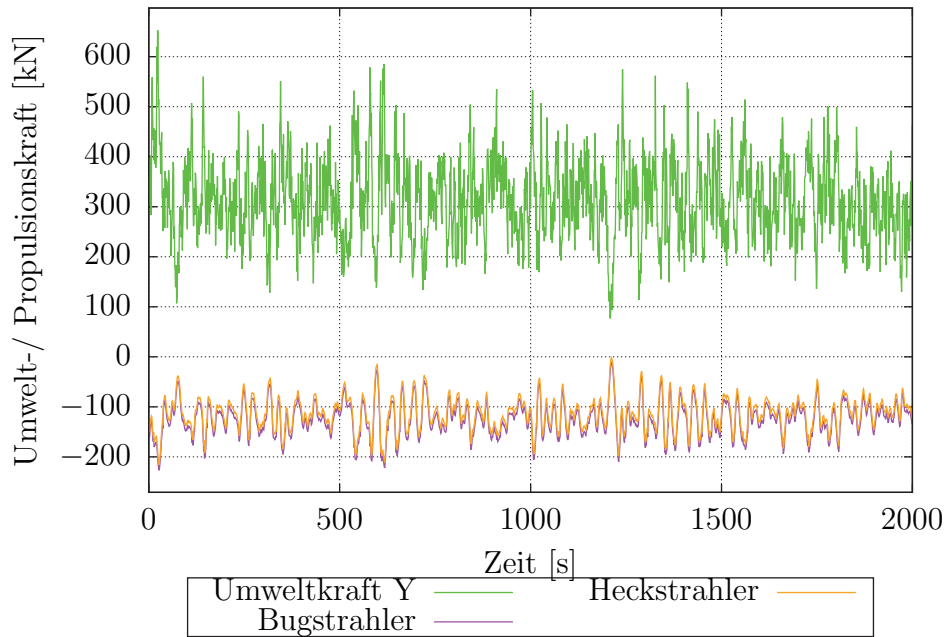


Abbildung 62: Zeitlicher Verlauf der Kräfte.

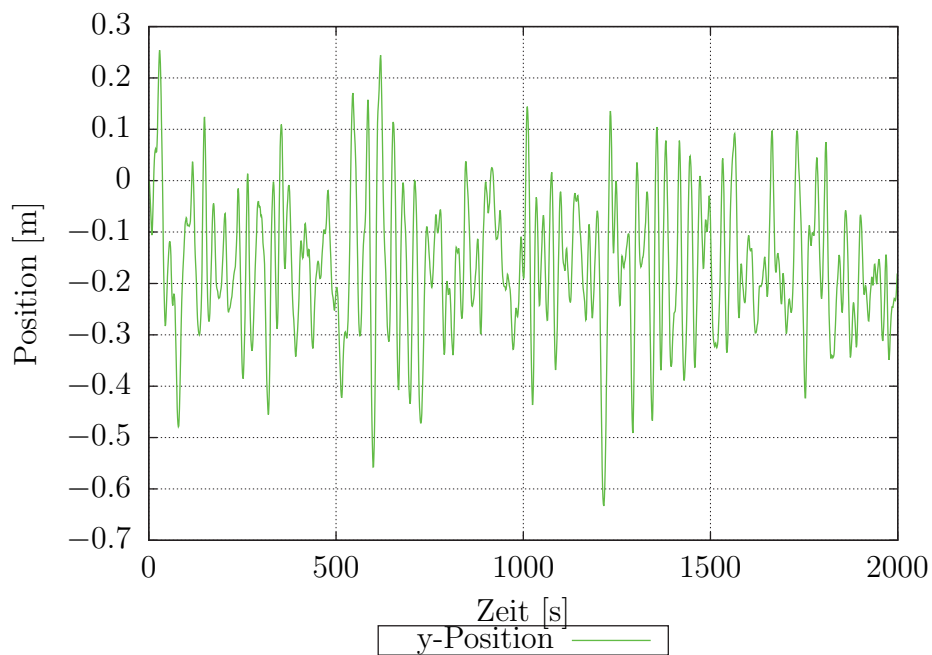


Abbildung 63: Zeitlicher Verlauf der y-Position.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wird die Problematik des dynamischen Positionierens untersucht. Dieser Aspekt hat im Zuge der Energiewende und der damit verbundenen Windenergieerzeugung auf hoher See an Bedeutung gewonnen. Für das Aufstellen der Windkraftanlagen, sowie die Wartung und Unterbringung aller benötigten Arbeitskräfte werden neue Schiffstypen benötigt. Diese Schiffe brauchen für den flexiblen Einsatz die Fähigkeit zum Halten der Position mit der eigenen Propulsionsanlage. Dabei ist die geforderte DP-Fähigkeit in der Bauspezifikation festgeschrieben.

Für den Bau dieser Schiffe muss daher der Aspekt des dynamischen Positionierens bereits in der frühen Entwurfsphase berücksichtigt werden. Für die Bewertung und den Vergleich verschiedener Propulsionskonzepte werden schnelle und effiziente Berechnungsverfahren benötigt. Solche Verfahren werden im Wesentlichen in statische Verfahren und Berechnungen im Zeitbereich unterschieden. Erstere stellen das Kräftegleichgewicht auf. Dabei werden alle wirkenden Lasten konstant angenommen. Letztere berücksichtigen zeitliche Schwankungen der Umweltlasten. Damit verbunden sind zeitliche Änderungen der hydrodynamischen Kräfte und der Stellgrößen der Maschinenanlage. Für beide Berechnungsverfahren werden Formulierungen für die hydrodynamischen Kräfte, für die Umweltlasten und für die Interaktionseffekte benötigt. Die Beschreibung dieser Kräfte bestimmen maßgeblich die Qualität der Aussagen über das System zum dynamischen Positionieren.

Bei den hydrodynamischen Kräften wurde zum Teil auf bestehende Methoden zurückgegriffen, die in der Arbeit beschrieben sind. Speziell zur Ermittlung der Rumpfkraft wurde im Rahmen dieser Arbeit für die Bestimmung der Querwiderstandskoeffizienten eine Berechnungsmethode entwickelt. Hierbei wurde mithilfe von reibungsbehafteten 2D-Rechnungen verschiedener Spantformen eine Regressionsformel entwickelt, mit der die Querwiderstandsbeiwerte anhand von Verhältnissen aus Wasserlinienbreite, Totholzbreite, Tiefgang, Kimmradius und Spantfläche in der frühen Schiffsentwurfsphase ausreichend genau bestimmt werden können.

Eine weitere Komponente für die Bewertung von DP-Systemen ist die Bestimmung der Umweltlasten. Diese ergeben sich aus den Umweltbedingungen, die mit der Windgeschwindigkeit, der Strömungsgeschwindigkeit, der Wellenhöhe und der Wellenperiode beschrieben werden. In der Arbeit wurden die verwendeten Verfahren sowohl für die statische Herangehensweise als auch die Betrachtung im Zeitbereich vorgestellt. Für die Bestimmung der Windkräfte im Zeitbereich wurde ein Spektrum für die Windgeschwindigkeit und Windrichtung entwickelt. Mit einer Fouriertransformation wird dann die Zeitreihe bestimmt.

Weiterhin entstehen beim dynamischen Positionieren Interaktionseffekte zwischen den Propulsionskomponenten, dem Rumpf und der Umwelt. Diese führen zu einer Verstärkung oder Abschwächung der hydrodynamischen Kräfte. Um diese zu berücksichtigen, wurden die Messergebnisse von Modellversuchen herangezogen. Aus den Ergebnissen wurden abhängig vom Betriebszustand dimensionslose Parameter abgeleitet, um die resultierenden, hydrodynamischen Kräfte der Propulsionskomponenten zu bestimmen. Zusätzlich wurden aus vorhergehenden Untersuchungen Ansätze entwickelt, um die entsprechenden Effekte zu berücksichtigen.

Mit der Beschreibung aller wirkenden Kräfte ist zunächst eine qualitative Aussage über die Fähigkeit zum dynamischen Positionieren möglich. Das statische Verfahren geht dabei von konstanten Umwelt- und Propulsionskräften aus. Diese Herangehensweise bietet für den Vergleich verschiedener Propulsionskonzepte in der frühen Schiffsentwurfsphase alle Möglichkeiten. Durch die Einbindung in die bestehende Schiffsentwurfsumgebung E4 ist der Einfluss von diversen Änderungen des Entwurfes auf die DP-Fähigkeit schnell und problemlos zu untersuchen.

Für genauere Aussagen über die DP-Fähigkeit und die Bewertung kritischer Umgebungssituationen wurde ein Verfahren im Zeitbereich entwickelt. Hierbei wird auf die Beschreibung der wirkenden Kräfte zurückgegriffen. Mittels der Lösung der Bewegungsgleichungen werden die Abweichungen der Position und des Kurswinkels bestimmt. Dabei werden die Grenzen der Maschinenanlage und deren Dynamik ebenfalls berücksichtigt, da dies einen erheblichen Einfluss auf das reale Verhalten des Schiffes beim dynamischen Positionieren besitzt. Das Verfahren wurde im

8.2 Ausblick

Rahmen dieser Arbeit auf das Propulsionskonzept mit zwei Propellern als Hauptantrieb und und Querstrahlruder beschränkt.

Um den Einfluss von DP-Systemen auf den Schiffsentwurf und die Möglichkeiten der bestehenden Methoden zu verdeutlichen, wurde abschließend ein Beispielschiff unter Variation verschiedener Entwurfsparameter vorgestellt. Dabei kamen sowohl die statische Methode als auch die Berechnungen im Zeitbereich zum Einsatz.

Das Thema der Validierung wurde in allen Teilaspekten, die die Grundlage für die Berechnung der Fähigkeit zum dynamischen Positionieren bilden, behandelt. Dafür wurden die Interaktionskräfte anhand von Modellversuchen untersucht. Die Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte beruht auf Verfahren, die den Stand der Technik darstellen. Sie können somit als validiert angesehen werden. Die Berechnung der Strömungskräfte und der Wellendriftkräfte wurde mithilfe von Modellversuchen verglichen. Eine Validierung mit der Großausführung ist im Zusammenhang des dynamischen Positionierens nahezu unmöglich, da sich die Umweltkräfte grundsätzlich aus der Überlagerung der Lasten durch Wind, Welle und Strömung ergeben. Da jedoch die Teilaspekte validiert sind, wird davon ausgegangen, dass das Verhalten des Schiffes beim dynamischen Positionieren realitätsnah abgebildet wird.

8.2 Ausblick

Eine wesentliche Erweiterung der vorgestellten Methode stellt die Erweiterung auf verschiedene Propulsionskonzepte dar. Speziell drehbare Strahler als Hauptantrieb sind für Schiffe im Offshore-Einsatz ebenfalls stark vertreten.

Weiterhin ist eine Erweiterung des Verfahrens von Schiffen auf Offshore-Konstruktionen möglich. Auch die Kombination von Verankerungen und eigenem Antrieb zum Halten der Position ist in diesem Zusammenhang denkbar.

Ein weiterer abgewandelter Anwendungsfall stellt das sogenannte dynamische Kurshalten dar. Als Beispiel dafür wäre ein Kabellegerschiff zu nennen. Dieses muss einen vorgegebenen Kurs trotz wirkender Umweltlasten halten.

Neben Erweiterungen der Anwendung kann auch der Regelungsalgorithmus weiter entwickelt werden, um beispielsweise energiesparende Zielfunktionen zu definieren. Auch die Verwendung der Ergebnisse zur Auslegung des Bordnetzes ist sinnvoll.

Abschließend ist auch eine Methodik zur Validierung der Verfahren im Gesamtkontext wünschenswert. Jedoch stößt man hierbei auf verschiedene Probleme. Die Messung der genauen Umweltbedingungen ist nur schwer möglich. Auf Grundlage der Messungen werden die Umweltkräfte bestimmt. Die Berechnung dieser Kräfte stellt die nächste Unsicherheit dar. Eine Auswertung kann somit nur mit statistischem Vorgehen erfolgen.

Literatur

- API (2005). Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, API RP 2SK.
- Augener, P. H. (2016). Computation of Wave Drift Forces for Dynamic Positioning within Early Ship Design, Dissertation, TUHH, Hamburg, Deutschland.
- Augener, P. und Krüger, S. (2014). Computation of Drift Forces for Dynamic Positioning within the Very Early Design Stage of Offshore Wind Farm Installation Vessels, Proceedings of the ASME 2014 33th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, USA.
- Bertram, V. (2000). Practical Ship Hydrodynamics, Butterworth-Heinemann.
- Blendermann, W. (1993). Schiffsform und Windlast- Korrelations- und Regressionsanalyse von Windkanalmessungen am Modell, Bericht Nr. 533, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg.
- Blendermann, W. (1996). Wind Loading of Ships - Collected Data from Wind Tunnel Tests in Uniform Flow, Bericht Nr. 574, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg.
- Blendermann, W. (2001). Probabilistic and Spectral Modelling of the Wind Loads on Ships, Schriftenreihe Schiffbau.
- Bley, M. (2014). Untersuchung der Propellerinteraktionen beim dynamischen Positionieren anhand von Modellversuchen, Bachelorarbeit, TUHH, Hamburg, Deutschland.
- Bordmessung vom FSG-Neubau 721 (2005). Aufzeichnung der Winddaten.
- Brix, J. (1978). Querstrahlsteuer, Bericht Nr. 80/1978, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH., Hamburg, Deutschland.
- Brix, J. (Hrsg.) (1993). Manoeuvring Technical Manual, Seehafen Verlag.
- Brütt, L. (2015). Querkräfte auf Schiffe, Masterarbeit, TUHH, Hamburg, Deutschland.

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017). Die Energiewende: unsere Erfolgsgeschichte. Veröffentlichung des BMWI.
- Chakrabarti, S. K. (2005). Chapter 3 - Ocean Environment, in S. K. Chakrabarti (Hrsg.), Handbook of Offshore Engineering, Elsevier, London, S. 79–131.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080443812500060>
- Clauss, G., Klein, M., Dudek, M., Hessner, K. und Hilmer, T. (2015). PrOWOO - Prognose Optimaler Wetterfenster für Offshore Operationen, Tagungsband der Statustagung 2015.
- Clauss, G., Lehmann, E. und Östergaard, C. (1994). Offshore Structures Volume II: Strength and Safety for Structural Design, Springer-Verlag, London, United Kingdom.
- Cozjin, J., Buchner, B. und van Dijk, R. (1999). Hydrodynamic Research Topics for DP Semi Submersible, Offshore Technology Conference, Houston, USA.
- Dang, J. und Laheij, H. (2004). Hydrodynamic Aspects of Steerable Thrusters, Wärtsilä Propulsion Netherlands BV (WPNL).
- Davenport, A. G. (1960). The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds, Dept. of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol, UK.
- Detlefsen, O., Theilen, L. und Abdel-Maksoud, M. (2015). Time Domain Simulation of Dynamic Positioning Manoeuvres based on Impulse Response Functions, Proceedings of the VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Rom, Italy.
- Dijk, R. R. T. V. und Aalbers, A. B. (2001). The Use of Hydrodynamics to Improve DP, Proceedings of the Dynamic Positioning Conference, Houston, USA.
- DNVGL (Hrsg.) (2015). Dynamic Positioning Systems, Rules For Classification of Ships.
- Grote, K.-H. und Feldhusen, J. (Hrsg.) (2011). Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 24. Aufl., Springer-Verlag.

- Haack, T. (2006). Simulation des Manövrierverhaltens von Schiffen unter besonderen Berücksichtigung der Antriebsanlage, Dissertation, TUHH, Hamburg, Deutschland.
- Hochhaus, K.-H. (2012). Windanlagen-Errichterschiff 'Innovation', Hansa S. 36–40. Dezember 2012.
- HSVA (2015). DP-Versuche an drei gefesselten Modellen, Bericht Man 334/15, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH, Hamburg, Deutschland.
- IMCA (2000). Specification for DP Capability Plots, IMCA M 140.
- IMO (1994). Guidlines for Vessels with Dynamic Positioning Systems, MSC/Circ. 645.
- IMO (2008). Code for the Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units, International Maritime Organization.
- Italy (Hrsg.) (2005). REVIEW OF THE INTACT STABILITY CODE, A modular methology for the estimation of the ship roll safety under the action of stohastic wind and waves, International Maritime Organization.
- Kongsberg Maritime AS (2005). DP Capability Analysis.
- Krüger, S. (1992). Instationäre Grenzschichteffekte an Tragflügelprofilen, Dissertation, TUHH, Hamburg, Deutschland.
- Krüger, S. (1998a). Manövriersimulation auf der Basis von Großausführungsmessungen, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Band 92.
- Krüger, S. (1998b). A Panel Method for Prediction Ship - Propeller Interaction in Potential Flow, Ship Technology. Res. 45,3.
- Krüger, S., Streckwall, H., Soeding, H., Schulze, R., Stoehrmann, H., Tellkamp, J., Voigt, C., Kaether, B. L. und Pohl, M. (1999). Offenes Methodenbanksystem für Propulsorentwurf, Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG. Abschlussbericht - BMWF.

- Krüger, S. und Urban, A. (2000). Abschätzung der Manövriereigenschaften von Azimuth-Antrieben in der Projektphase, Handbuch der Werften. Band XXV.
- Krüger, S. und Vorhölter, H. (2012). Design Considerations of DP-Systems of Offshore Windpark Installation Vessels, Proceedings of the 11th International Marine Design Conference, Glasgow, UK.
- Lehn, E. (1980). Thruster Interaction Effects, The Ship Research Institute of Norway.
- Lübcke, A. (2012). Modellierung von Windkräften im Zeitbereich, Report A-23, TUHH, Hamburg, Deutschland.
- MARIN (2013). Crabbing Tests for Research with a Cruise Vessel, Report No.: 26375-1-BT, Maritime Research Institute Netherlands, Wageningen, The Netherlands.
- Moberg, S. und Hellström, S. (1983). Dynamic Positioning of a four-column semi-submersible. Model Tests of interaction forces and a philosophy about optimum strategy when operating the thrusters, Second International Symposium on Ocean Engineering and Ship Handling, Göteborg, Schweden.
- Nienhuis, U. (1992). Analysis of Thruster Effectivity for Dynamic Positioning and Low Speed Manoeuvring, Dissertation, TU Delft.
- Perez, T. (2005). Ship Motion Control - Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins, Springer-Verlag, London, United Kingdom.
- Rudolph, J. (2014). Determination of the Cross-Flow Coefficients For the Early Design Stage Using Viscous Fluid Flow, Diplomarbeit, TUHH, Hamburg, Deutschland.
- Serraris, J.-J. (2009). Time Domain Analysis for DP Simulations, Proceedings of the ASME 2011 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, USA.
- Sharma, S. D. (1983). Bemerkungen über die Steuerwirkung von Propellern, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Band 77.

Stiftung Offshore Windenergie (2014). Neue Übersicht mit Karte über Offshore Windparks in Deutschland.

URL: <http://www.offshore-stiftung.de/neue-%C3%BCbersicht-mit-karte-%C3%BCber-offshore-windparks-deutschland>

Söding, H. (1976). CHWARISMI I und II : Compiler für technische Entwurfsaufgaben, TUHH.

Söding, H. (1982). Bewegungen und Belastungen der Schiffe im Seegang, Vorlesungsunterlagen, TUHH, Hamburg, Deutschland.

Söding, H. (1997). Ruderkraftberechnung mit einem Paneelverfahren, IfS.

Söding, H. (Hrsg.) (1984). Bewertung der Manövriereigenschaften im Entwurfsstadium, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Band 78.

van't Veer, R. und Gachet, M. (2011). Dynamic Positioning - Early Design, Capability and Offsets, a Novel Approach, Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

Vorhölter, H. (2011). Numerische Analyse des Nachstroms und der Propellereffektivität am manövrierenden Schiff, Dissertation, TUHH, Hamburg, Deutschland.

Vorhölter, H., Voigt, K. und Gröne, H. (2012). Schiffe für den Offshore-Einsatz, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Band 106.

Wöckner-Kluwe, K. (2013). Evaluation of the Unsteady Propeller Performance behind Ships in Waves, Dissertation, TUHH, Hamburg, Germany.

Yoshimura, Y., Nakao, I. und Ishibashi, A. (2009). Unified Mathematical Model for the Ocean and Harbour Manoeuvring, Proceedings of MARSIM.

Ziegler, J. und Nichols, N. (1952). Optimum Settings for Automatic Controller, ASME 74.

A Lebenslauf

Name	Lübcke
Vornamen	Adele
Staatsangehörigkeit	deutsch
Geburtsdatum	21.10.1987
Geburtsort, -land	Schwerin, Deutschland
07.1994 - 07.1998	Grundschule Krebsförden in Schwerin
07.1998 - 07.2007	Gymnasium Fridericianum in Schwerin
10.2007 - 03.2011	Schiffbaustudium an der Technischen Universität Hamburg-Harburg Abschluss: Bachelor of Science
04.2011 - 03.2013	Studium Schiffbau und Meerestechnik an der Technischen Universität Hamburg-Harburg Abschluss: Master of Science
04.2013 - 03.2017	Berufstätigkeit an der Technischen Universität Hamburg-Harburg
04.2017 - heute	Berufstätigkeit bei der Pella Sietas GmbH in Hamburg

