



University of Applied Sciences

HOCHSCHULE  
EMDEN·LEER

## Fachbereich Seefahrt

Fachbereich Seefahrt

Marcus Bentin, Reinhard Elsner, Stephan Kotzur, Michael Schlaak, Diethardt Freye

### Einsparpotenziale in der Seeschifffahrt durch Windzusatzantriebe und Routenoptimierung

*Ergebnisse des Forschungsschwerpunktes ROBUST  
(Routen- / Befrachtungsplanung und -steuerung für die  
Seeschifffahrt). Wissenschaftliche Zusammenfassung.*

Schriftenreihe der Hochschule Emden/Leer, Band 22







Marcus Bentin, Reinhard Elsner, Stephan Kotzur, Michael Schlaak, Diethardt Freye

# Einsparpotenziale in der Seeschifffahrt durch Windzusatzantriebe und Routenoptimierung

*Ergebnisse des Forschungsschwerpunktes ROBUST  
(Routen- / Befrachtungsplanung und -steuerung für die  
Seeschifffahrt). Wissenschaftliche Zusammenfassung.*

Hochschule Emden/Leer  
Emden 2017

## Schriftenreihe der Hochschule Emden/Leer, Band 22

Verlag: Hochschule Emden/Leer  
Druckerei: VON DER SEE, Emden  
Buchbinderei: VON DER SEE, Emden

© 2017  
Hochschule Emden/Leer  
Constantiaplatz 4  
26723 Emden  
E-Mail: [bibliothek.emden@hs-emden-leer.de](mailto:bibliothek.emden@hs-emden-leer.de)

ISBN: 978-3-944262-12-3

# **Einsparpotenziale in der Seeschifffahrt durch Windzusatzantriebe und Routenoptimierung**

**Ergebnisse des Forschungsschwerpunktes  
ROBUST  
(Routen- / Befrachtungsplanung und -steuerung  
für die Seeschifffahrt)**

**Wissenschaftliche Zusammenfassung**

**HILOG (Hochschulinstitut für Logistik)  
Hochschule Emden-Leer**

**Marcus Bentin  
Reinhard Elsner  
Stephan Kotzur  
Michael Schlaak**

**und Hochschule Osnabrück  
Diethardt Freye**

**Forschungsschwerpunkt finanziert von der Stiftung  
„VW-vorab“ über das Land Niedersachsen**

## **2010 - 2016**

### **Mitarbeiter (zeitweise im Forschungsschwerpunkt eingestellt)**

Tomke Brahms, Claudia Folkerts, Niels Kliesing  
Kerstin. Riehl, Marc Rixe (Seeoffizier) auf der BBC Hudson, Thomas Schmidt,  
Lennart Seiffert (Seeoffizier) auf der BBC Hudson, Mathias Sindt (stud. Hilfskraft),  
Nicolai Völckner, David Zastrau

### **Studentische Arbeiten im Rahmen von ROBUST**

Björn Bähr (HS E/L, Seefahrt) Praktikant auf dem Schiff  
Thorsten Bielefeld (HS E/L: Informatik)  
Anja. Burget (HS Os: Wirtschaft)  
Maria Gavrilowa (HS E/L, Maschinenbau)  
Sebastian Heitmann (HS Os, Wirtschaft)  
Ruth Kümmel (HS E/L, Seefahrt)  
R. Lampart (HS Lübeck) Praktikant auf dem Schiff  
Linda Gudrite (Latvian Maritime Academy, Riga)  
Sanita Mazure (Latvian Maritime Academy, Riga)  
Bernhild Röhlmann (HS Os, Wirtschaft)  
Heiko Stein (HS E/L; Informatik)  
Patrick Stockmann (HS Os; Wirtschaft)  
Rafael Terhorst (HS E/L; Seefahrt)  
Andy Traumüller (HS E/L; Informatik)  
Jann Visser (HS E/L, Wirtschaft)  
Fabian Warnken (HS E/L, Wirtschaft)  
Nils Wöltje (HS Os; Wirtschaft)

**Verlag**

**ISBN**

**Januar 2017**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2 Zielsetzung</b>	<b>9</b>
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>11</b>
3.1 Einfluss von Wind und Wellen auf den Gesamtwiderstand.....	11
3.2 Routenoptimierung.....	11
3.3 Auswahl möglicher Windzusatzantriebe.....	12
<b>4 Konzept</b>	<b>13</b>
4.1 Randbedingungen .....	13
4.2 Auswahl der Windzusatzantriebe (WZA).....	13
4.3 Auswahl der Schiffe .....	14
4.4 Auswahl der Fahrweise der Schiffe .....	15
4.5 Auswahl der Routen .....	15
4.6 Auswahl der Transportgüter.....	15
4.7 Auswahl der Wetterdaten.....	16
4.8 Vorgehensweise.....	17
<b>5 Durchführung und Ergebnisse</b>	<b>19</b>
5.1 Analyse von Transportketten .....	19
5.1.1 Analyse der wirtschaftlichen Relevanz der Energieeinsparung .....	19
5.1.2 Freiheitsgrade in der Lieferzeit.....	20
5.1.3 Ergebnis:.....	22
5.2 Leistungsberechnung.....	23
5.2.1 Grundlagen.....	23
5.2.2 Vorgehensweise .....	26
5.2.3 Glattwasserkurven (GWK) .....	27
5.2.4 Wirkungsgrade .....	28
5.2.5 Einfluss von Wind auf das Schiff .....	28
5.2.6 Einfluss von Wellen auf das Schiff.....	29
5.2.7 Schiffsmessungen .....	29
5.2.8 Anpassung der Modelle an die Messergebnisse auf der BBC Hudson.....	33
5.2.9 Charakterisierung der betrachteten Schiffe .....	39
5.3 Modellierung der Windzusatzantriebe (WZA) .....	42
5.4 Routenoptimierung.....	44
5.4.1 Auswahl der Methode und Vorgehensweise .....	44

---

5.4.2	Das Routenoptimierungsprogramm .....	44
5.4.3	Einsparpotenzial und Routenplanung .....	47
5.5	Einsparpotenzial und Reisezeit auf verschiedenen Routen .....	48
5.5.1	Berechnungen.....	48
5.5.2	Ergebnisse:.....	48
5.5.3	Auswertungen.....	52
5.6	Unsicherheit in der Routenplanung.....	54
5.7	Umweltbelastung .....	56
5.7.1	Emissionen der Seeschifffahrt.....	56
	Die internationalen Seeschifffahrt trägt zu den globalen anthropogenen Emissionen erheblich bei (INTERNATIONAL MARITIME ORGANISATION 2014) .....	56
5.7.2	Emissionen auf der gesamten „supply Chain“ .....	56
5.7.3	Umweltkosten .....	56
5.8	Wirtschaftlichkeit für den Hauptlauf auf See .....	58
<b>6</b>	<b>Engpässe der Lieferkette</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>66</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Gesamte modale Transportkette .....	9
Abbildung 2.2: Darstellung der multimodalen Transportkette mit dem Hauptlauf auf See und mit den beiden Varianten „normale Route“ (schwarz) und für die Nutzung eines WZA optimierte Route (rot). T=Tiefdruckgebiet, H=Hochdruckgebiet. $K=f(E,t,CO_2) =$ Transportkosten auf der gesamten Lieferkette (supply-chain).....	10
Abbildung 4.1: Struktur der vom DWD zur Verfügung gestellten Wetterdaten .....	17
Abbildung 5.1: Kostenanalyse eines Transports von Zellulose von Uruguay nach Deutschland, inklusive Vor- und Nachlauf (siehe TP0).....	20
Abbildung 5.2: Reisezeiten mit und ohne RO und WZA (Flettner) über ein Jahr berechnet: Fahrt auf dem GK. 284 h, mit WZA und RO ergibt sich eine mittlere Reisezeit von 289 h mit einer Streubreite von max. 6 h um den Mittelwert .....	22
Abbildung 5.3: Berücksichtigung der verschiedenen Widerstände und Propellereigenschaften im Simulationsprogramm der Routenoptimierung (BENTIN et al. 2016).....	24
Abbildung 5.4: Die verschiedenen Leistungen entlang der Wirkungskette vom Motor zum effektiven Schiffsvortrieb: PB: vom Motor abgegeben; PD: Leistung an den Propeller geliefert; PT: Leistung vom Propeller an das Wasser übertragen; PE: effektive Vortriebsleistung; $dm/dt =$ Treibstoffverbrauch.....	25
Abbildung 5.5: Die BBC Hudson, auf der die Messungen durchgeführt wurden .....	30
Abbildung 5.6: Informationen für die Evaluation der Programme zur Ermittlung der Leistung des Schiffs unter Berücksichtigung von Wind, Wellen und WZA.....	30
Abbildung 5.7: Schematische Darstellung (elektrische Verknüpfung) der installierten Messtechnik.....	32
Abbildung 5.8: Aufgebrachte Leistung des Schiffs (auf der Welle) als Funktion der Schiffsgeschwindigkeit; Modellkurven auf Basis der MTR (bei verschiedenen Tiefgängen) und auf der Basis des Schiffskörpers berechnet (PARAMARIN); die Messungen (Mittelwerte von Szenarien) liegen i.d.R. oberhalb der GWK auf Grund der Wind- und Welleneinflüsse.....	34
Abbildung 5.9: Vortriebsleistung bei verschiedenen Wellenhöhen. Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem Messwerten (blau) nach dem Fit: PD (grün) nur der GW-Wert, $(PD+\Delta PD_{w_e})$ (rot) gibt den berechneten Wert für den GW-Wert und den Beitrag durch Wellen, $(PD+\Delta PD_{w_e} + \Delta PD_{w_i})$ (schwarz) gibt den berechneten Wert bei Berücksichtigung der Beiträge durch den GW –Wert und den Beitrag von Wind und Wellen. Die Nummern in der Darstellung kennzeichnen die Szenarien, aus denen die dargestellten Ergebnisse stammen.....	36
Abbildung 5.10: Vortriebsleistung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem Messwerten (blau) nach dem Fit: PD (grün) nur der GW-Wert, $(PD+\Delta PD_{w_e})$ (rot) gibt den berechneten Wert für den GW-Wert und den Beitrag durch Wellen, $(PD+\Delta PD_{w_e} + \Delta PD_{w_i})$ (schwarz) gibt den berechneten Wert bei Berücksichtigung der Beiträge durch den GW –Wert und den Beitrag von Wind und Wellen. Die Nummern in der Darstellung kennzeichnen die Szenarien, aus denen die dargestellten Ergebnisse stammen.....	37
Abbildung 5.11: Vortriebsleistung bei verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten. Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem Messwerten (blau) nach dem Fit: PD (grün) nur der GW-Wert, $(PD+\Delta PD_{w_e})$ (rot) gibt den berechneten Wert für den GW-Wert und den	

Beitrag durch Wellen, $(PD + \Delta PD_{w_e} + \Delta PD_{w_i})$ (schwarz) gibt den berechneten Wert bei Berücksichtigung der Beiträge durch den GW –Wert und den Beitrag von Wind und Wellen. Die Nummern in der Darstellung kennzeichnen die Szenarien, aus denen die dargestellten Ergebnisse stammen. ....	38
Abbildung 5.12: Die betrachteten Windzusatzantriebe: ein Kite (links oben, <a href="http://www.skysails.info/deutsch/skysails-marine/">http://www.skysails.info/deutsch/skysails-marine/</a> ), ein Flettner-Antrieb (links unten, <a href="http://www.marinetraffic.com/en/photos/of/ships/shipid:151866/#forward">http://www.marinetraffic.com/en/photos/of/ships/shipid:151866/#forward</a> ), ein starres Segel (ähnlich Dynarigg, rechts oben <a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Shin_Aitoku_Maru">http://de.wikipedia.org/wiki/Shin_Aitoku_Maru</a> ), und das Dynarigg (rechts unten, <a href="http://www.decaboyachtpainting.com/?project=maltese-falcon&amp;lang=de">http://www.decaboyachtpainting.com/?project=maltese-falcon&amp;lang=de</a> ).....	42
Abbildung 5.13: Die Polardiagramme der WZA: Kite, Dynarigg und Flettner-Rotor .....	43
Abbildung 5.14: Schematische Darstellung einer Routenoptimierung nach der Branch-Methode.....	45
Abbildung 5.15: Laufender A*-Algorithmus für die Routenoptimierung.....	47
Abbildung 5.16: Ergebnis der A* Routenoptimierung: rot = Großkreis, gelbe Punkte die Wegpunkte der optimierten Route. ....	47
Abbildung 5.17: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $V_s = 10$ kn und verschiedenen Randbedingungen; Flettner als WZA. ....	49
Abbildung 5.18: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $V_s = 13$ kn und verschiedenen Randbedingungen; Flettner WZA. ....	50
Abbildung 5.19: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $V_s = 15$ kn und verschiedenen Randbedingungen; Flettner als WZA. ....	50
Abbildung 5.20: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von WHV nach Baltimore bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $V_s = 13$ kn und verschiedenen Randbedingungen; Flettner als WZA. ....	51
Abbildung 5.21: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $V_s = 13$ kn; Dynarigg als WZA.....	51
Abbildung 5.22: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $V_s = 13$ kn; Kite als WZA. ....	52
Abbildung 5.23: Verteilung der Fahrtzeiten bei Einsatz eines Flettner Rotors und Routenoptimierung auf der Route Baltimore – WHV, verglichen mit der Fahrtzeit auf dem GK, Mittelwerte für 2008 und eine Fahrt / Woche. ....	54
Abbildung 5.24: Darstellung der Charakterisierung der Umfelder der Wegpunkte (rot) entlang einer optimierten Route, in denen die Energieverteilung durch die Schwankungen der Wetterdaten in diesen Regionen errechnet wird. ....	55
Abbildung 5.25: Gegenüberstellung der erwarteten Einsparungen bei verschiedenen Treibstoffen und Treibstoffpreisen gegen die Investitionskosten eines WZA (gestrichelte Linie), errechnet am Beispiel eines MZF mit Dynarigg auf der Route Baltimore-WHV bei $V_s = 13$ kn; Mittelwerte über ein Jahr, für 12 Fahrten je Richtung in 2008. ....	59
Abbildung 5.26: Vergleich der entscheidungsrelevanten Kosten der Alternativen ohne und mit WZA+RO (als Dynarigg) auf der RO Route Baltimore – Wilhelmshaven mit einem Mehrzweckfrachter bei 13 kn Fahrtgeschwindigkeit. ....	61

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Abweichungen zur Designgeschwindigkeit (Sindt 2013) .....	21
Tabelle 5.2: Charakteristische Daten der drei betrachteten Schiffstypen, mit Angaben der Quellen .....	40
Tabelle 5.3: sea margin auf den drei Routen mit und ohne RO, MZF, 13 kn, Mittelwerte für ein Jahr (2008) mit 1 Fahrt / Woche; WHV = Wilhelmshaven, GK = Großkreis, RO = Routenoptimierung .....	52
Tabelle 5.4: Einsparung an Vortriebsleistung durch die verschiedenen WZA in % (Flettner, Dynarigg, Kite) auf der Route BA-WHV, $V_s=13\text{kn}$ , jeweils für einen Kurs auf dem GK oder mit RO. ....	53
Tabelle 5.5: Einsparpotenzial durch den Flettner Rotor auf den 3 Routen (in % zur Route mit Wind und Wellen ohne WZA) für einen MZF, $V_s=13\text{kn}$ ., jeweils bei einer Route auf dem GK oder mit RO. ....	53
Tabelle 5.6: Zusammenstellung der Treibstoffkosten. * (BUNKERINDEX 2016); 1€ = 1,14 \$), ** (BUNKER FUEL PRICES).....	59
Tabelle 5.7: Energieverbrauch auf der Route BA-WHV über eine Fahrt / Woche gemittelt. ....	62

## Abkürzungsverzeichnis

BA	=	Bachelorarbeit
BMBF	=	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BnB	=	Branch-and-Bound
DWD	=	Deutscher Wetterdienst
DMI	=	Dänisches Meteorologisches Institut
EcoTransIT	=	Ecological Transport Information Tool
eERM	=	erweitertes Entity Relationship Modell
eEPK	=	erweiterte Ereignisgesteuerte Prozessketten
Effship	=	Efficient Shipping with low emissions
Eurostat	=	Statistische Amt der Europäischen Union
ERM	=	Entity Relationship Model
FdW	=	Fahrt durchs Wasser (engl. Speed through water= STW)
GUI	=	Graphical User Interface
GWK	=	Glattwasserkurve
HS E/L	=	Hochschule Emden-Leer
HSVA	=	Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt
kn	=	Knoten
MeMor	=	Teilprojekt 1 von ROBUST
MVC	=	Model View Controller
MZF	=	Mehrzweckfrachter
MTR	=	Model Test Report
PostgreSQL	=	object related database management system, mainly based on the SQL standard functions
P	=	Leistung allg. (power)
PB, P <sub>B</sub>	=	Motorleistung (break power)
PD, P <sub>D</sub>	=	Leistung auf der Welle
PT, P <sub>T</sub>	=	Leistung des Propellers
PE, P <sub>E</sub>	=	effektive Vorschubleistung
ROBUST	=	Routen- / Befrachtungsplanung und -steuerung für die See-Schifffahrt mit dem Hauptlauf auf See (Forschungsprojekt)
RO	=	Routenoptimierung
Rwi	=	Widerstand durch den Wind
Rwa, Rwe	=	Widerstand durch die Wellen (waves)
SBRIN	=	Erfahrungsdatenbank für den Welleneinfluss
SD	=	Stammdaten
T	=	Eintauchtiefe
TP	=	Teilprojekt
Vs	=	Schiffsgeschwindigkeit
WZA	=	Windzusatzantrieb

# 1 Einleitung

Für die Seeschifffahrt sind die Treibstoffkosten ein wesentlicher Kostenfaktor. Beim Güterverkehr auf See betragen die Treibstoffkosten heute etwa 40 – 60% der Gesamtkosten (z.B. (WORLD SHIPPING COUNCIL Mai 2008)). Eine Möglichkeit, die Treibstoffkosten zu reduzieren, ist es, das Schiff langsamer fahren zu lassen („slow steaming“), da der Treibstoffverbrauch in etwa mit der dritten Potenz zur Schiffsgeschwindigkeit zunimmt (MAN DIESEL & TURBO 2012).

Durch die Wirtschaftskrise 2008 ist der Umfang des globalen Warentransportes deutlich zurückgegangen. Dadurch hat sich eine Überkapazität bei den Schiffen im Seetransport ergeben, was zu einem erheblichen Konkurrenz- und Preisdruck auf die Reeder geführt hat. Sie sind gezwungen, alle möglichen Einsparpotenziale zu nutzen, u.a. das „slow steaming“, aber auch eine kostenoptimale Routenplanung (WIESMANN 2010, AWI). Eine andere Perspektive zur Reduzierung der Treibstoffkosten ist der Einsatz von Techniken zur Nutzung der Windenergie. In der Vergangenheit wurde der Einsatz von WZA immer wieder diskutiert (ENGLEBERT August 2012, LLOYD'S REGISTER, SCHENZLE 2010, GEITNER 2007, TRAUT et al. 2014). Die niedrigen Treibstoffkosten haben aber die Investitionen für einen WZA wirtschaftlich nicht gerechtfertigt. Die Treibstoffkosten sind in 2014 -2016 bei einem preislichen Tiefstand angekommen (BUNKERINDEX 2016), aber es ist damit zu rechnen, dass die Treibstoffkosten wieder steigen werden, die Emissionen durch die Schiffsantriebe in der Zukunft weiter reduziert werden müssen, und es damit notwendig werden wird, das Schweröl durch Diesel (MGO) zu ersetzen. Es erscheint deswegen sinnvoll, die Perspektiven für den Einsatz von Windzusatzantrieben (WZA) neu auszuloten. Um die Effektivität von WZA zu optimieren, wird in diesem Projekt auch eine Anpassung der Route an die aktuellen Wetterverhältnisse mit in Betracht gezogen.

Auf Grund des hohen Personalbedarfs, der Handhabbarkeit der Ladung und der Sicherheit des Schiffsbetriebes macht es keinen Sinn, auf die klassischen Segler (Klipper, ...) von vor mehr als 150 Jahren zurückzukommen. Vielmehr sind moderne wie auch modifizierte alte Techniken von Windantrieben auf deren Verwendungsmöglichkeit im Seetransport zu untersuchen.

Am Beispiel des Kites als Windzusatzantrieb, der technisch auf fast jedem Schiffstyp montiert werden kann, wurde in einem BMBF-Projekt gezeigt, dass auf geeigneten (windintensiven) Routen (z.B. Nordatlantikroute) bei nicht zu schneller Fahrt (z.B. 13 kn) ein Einsparpotenzial von ca. 30% erreicht werden kann - bei einem hinreichend großen Kite (BMBF 2009). Dieses Ergebnis zeigt, dass mit Windzusatzantrieben auf Seeschiffen ein Treibstoffeinsparpotenzial besteht. Dabei wurde die Route vorgegeben und nicht an die Windverhältnisse angepasst.

Eine Verlängerung der Transportzeit auf See, z.B. durch „Slow steaming“ oder durch eine Routenoptimierung, kann sich auf die gesamte Lieferkette („supply chain“) auswirken und zu unerwünschten Effekten führen (z.B. Güter zu lange unterwegs). Deswegen wird im Rahmen

des Projektes untersucht, wie sich eine Routenoptimierung zur besseren Nutzung von Windenergie auf eine Verlängerung der Transportzeit auswirkt, und ob diese durch Puffermechanismen im Hafen oder in der Lieferkette (Vor- und Nachlauf) abgefangen werden kann.

Letztendlich ist die Wirtschaftlichkeit entscheidend bei der Frage, ob ein WZA eine Perspektive darstellt. Diese hängt aber auch von externen Einflüssen ab (Preis des Treibstoffs, Umweltpolitik, Weltwirtschaft).



## 2 Zielsetzung

Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll untersucht werden, welches Einsparpotenzial beim Einsatz von Windzusatzantrieben (WZA) besteht, insbesondere wenn die Route in einem gewissen Umfang für die optimale Nutzung der Windenergie modifiziert wird, um z.B. die Windrichtung der Druckgebiete zu nutzen, also Tiefs und Hochs in passender Richtung zu umfahren bzw. zu nutzen. Ferner ist zu berücksichtigen, dass durch den Wind auch Wellen entstehen, die wiederum einen erhöhten Kraftstoffverbrauch bewirken: das „sea margin“ wird z.B. für die Nordatlantikroute mit einer Erhöhung des Treibstoffverbrauches von 20 – 35% angesetzt (MAN DIESEL & TURBO 2012).

Um das Potenzial für Treibstoffeinsparung durch einen WZA zu ermitteln, ist also nicht nur die für ein spezielles Schiff geeignete Technik für einen WZA zu betrachten. Auch die Route ist so zu optimieren, dass die aktuelle Wind- und Wellensituation auf dieser Strecke berücksichtigt wird.

Eine in Hinsicht auf den Treibstoffverbrauch optimierte Route ist in der Regel etwas länger als die direkte Route (der Großkreis). Dies kann zu einer Verlängerung bei der Lieferzeit der Ware führen, was wiederum eine Kostenerhöhung zur Folge haben kann, die in Konkurrenz zu der Kostenreduzierung durch die Einsparung an Treibstoff steht. Es ist jedoch auch möglich, dass diese Verzögerungen einer Lieferung durch Freiräume im Warenhandling und Warentransport in den Häfen sowie im Vor- und Nachlauf zum Seelauf aufgefangen werden können. Im Endeffekt ist also der gesamte Transportweg zu betrachten, um den Einsatz von WZA zu evaluieren (Abb.2.1):

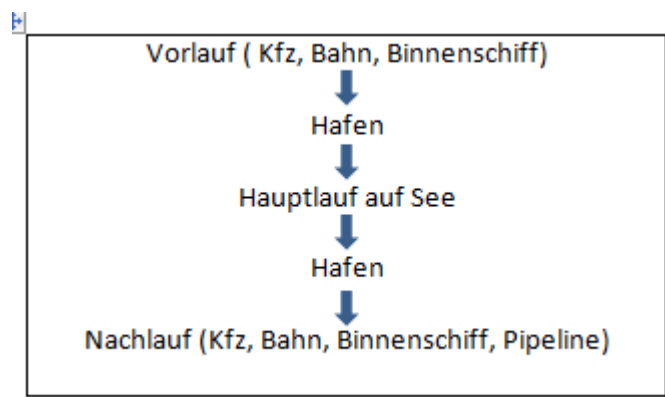


Abbildung 2.1: Gesamte modale Transportkette

In Abbildung 2.2 ist die gesamte modale Transportkette mit und ohne Routenoptimierung dargestellt. Auf Grund der Komplexität der Gesamtkette ist zu vermuten, dass eine gewisse Gestaltungsfreiheit und damit auch Freiräume zur Kompensation der Verzögerung auf See bestehen.

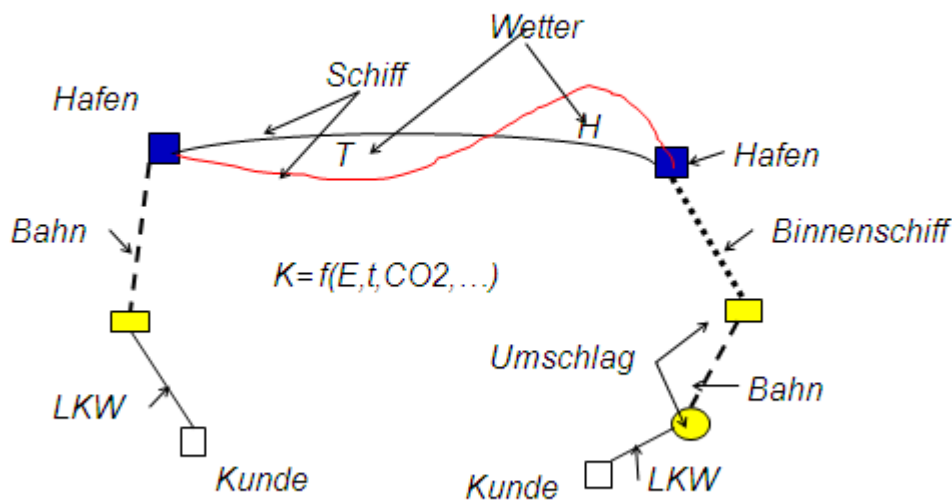


Abbildung 2.2: Darstellung der multimodalen Transportkette mit dem Hauptlauf auf See und mit den beiden Varianten „normale Route“ (schwarz) und für die Nutzung eines WZA optimierte Route (rot). T=Tiefdruckgebiet, H=Hochdruckgebiet.  $K=f(E,t,CO_2,...)$  = Transportkosten auf der gesamten Lieferkette (supply-chain).

Den Reeder interessieren die Betriebskosten auf See, den Kunden die gesamten Transportkosten. Die Realisierungschance für den Einsatz von WZA hängt davon ab, ob die Gesamtkosten durch den Einsatz eines WZA gesenkt werden können. Das Projektergebnis muss dann Auskunft darüber geben können, wie groß das Einsparpotenzial ist, und zwar unter Berücksichtigung aller Kosten, auch der Umweltkosten. Daraus wird sich ergeben, ob es sinnvoll ist, geeignete Windzusatzantriebe zu entwickeln, bzw. wovon die Wirtschaftlichkeit abhängt (z.B. von den Treibstoffkosten). Da die Kosten wiederum von Randbedingungen abhängen, die wir nicht beeinflussen können (z.B. Treibstoffkosten, Umweltauflagen, Weltwirtschaftssituation, ...), ist es sinnvoll, die Ergebnisse in Form von Szenarien darzustellen:

- Zielfunktion:
 
$$\text{Gewinn} = f(E,t, \dots, \text{Umweltkosten}) \quad \longrightarrow \quad \text{Maximum}$$
- Erwartetes Projekt- Ergebnis:
  - a) Die Größe des Einsparpotenzials durch WZA und RO (energetisch und finanziell)
  - b) Eine Antwort auf die Frage: Ist ein WZA sinnvoll?

### 3 Stand der Technik

Eine ausführliche Darstellung des Standes der Technik findet sich im Teilprojekt 1(TP1).

Drei Punkte, die für das Projekt wesentlich sind, werden hier herausgestellt:

- Der Einfluss von Wind und Wellen auf den Energieverbrauch eines Schiffs
- Die Routenoptimierung,
- Die Auswahl möglicher WZA

#### 3.1 Einfluss von Wind und Wellen auf den Gesamtwiderstand

Der Beitrag von Wind und Wellen zum Gesamtwiderstand eines Schiffes wird in den Grundlagen der Schiffsbau-technik diskutiert (BLENDERMANN 1993, BLUME September 1977). Für die Berechnung des aktuellen Energiebedarfs zur Überwindung dieser Widerstände bei bestimmten Wetterverhältnissen gibt es zwar diverse Modelle, aber kaum eine experimentelle Verifizierung für ein reales, seegängiges Schiff. Für die Simulation dieser Energien innerhalb einer Routenoptimierung ist aber eine hinreichend genaue Berechnung (im Verhältnis zur Genauigkeit des Energieverbrauches des Schiffes allgemein) notwendig. Die im Projekt verwendeten Modelle und deren Evaluierung durch Messungen auf einem seegängigen Schiff werden im Kap. 5.2 diskutiert. Details finden sich in den Teilprojekten TP2 und TP3.

#### 3.2 Routenoptimierung

Ein „Wetterrouting“ ist seit langem Stand der Technik auf Schiffen. Hierbei ist das Hauptziel gefährliche Wettersituationen für das Schiff zu vermeiden. Dies kann auf verschiedene Art erfolgen:

- a) Das Schiff erhält täglich einen Wetterbericht über das Fahrgebiet (früher per Funk, heute als Wetterkarte), und der Kapitän entscheidet, ob er vom geplanten Kurs abweicht.
- b) Von einer externen Stelle (z.B. vom Deutschen Wetterdienst (DWD) oder (AWT , SKYSAILS) erfolgt eine Beratung, auch in Hinblick auf die Wetterentwicklung, wieder mit dem Ziel, gefährliche Situationen zu vermeiden, aber auch, um optimale Routen (in Bezug auf Treibstoffkosten oder Ankunftszeit) vorzuschlagen. Dies kann durch individuelle Abschätzung der Wetterentwicklung erfolgen oder über ein Programm, das entlang des fraglichen Reisegebietes mit der Wettervorhersage eine geeignete Route berechnet. Hierbei nimmt die Genauigkeit der Vorhersage mit dem Zeithorizont ab.

### 3.3 Auswahl möglicher Windzusatzantriebe

Eine Übersicht über die nach derzeitigen praktischen und technischen Gesichtspunkten diskutierten WZA findet sich z.B. bei (SCHENZLE 2010, OTTO 1992). Es werden folgende WZA in Betracht gezogen (siehe auch (LLOYD'S REGISTER):

- Der **Flettner-Rotor** wurde bereits in den 20er Jahre des vorigen Jahrhunderts auf zwei Schiffen erfolgreich getestet (die „Buckau“ 1922 und die „Barbara“ 1926). Aktuell wurde er noch einmal auf einem Schiff der Firma ENERCON realisiert (E-Ship1). In einem Forschungsprogramm (Interreg-Programm Marigreen) wird an der HS E/L an der Optimierung gearbeitet.
- Der **Kite** wurde von der Firma SkySails bis zu einer Größe von ca. 320 m<sup>2</sup> auf Frachtschiffen eingesetzt. Das Verhalten wurde in einem Forschungsprojekt (BMBF 2009) von der HS E/L modelliert. Der Einsatz von größeren Kites ist aber noch nicht Stand der Technik.
- Das **Dynarigg** wurde um die 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts von PRÖLSS vorgeschlagen, im Windkanal evaluiert (WAGNER 1967) und auf dem „Maltese Falcon“, einer Dreimast-Yacht, realisiert (DIJKSTRA & PERKINS 2004). Für das Dynarigg gibt es technische Realisierungen als feste (einfach zu handhabende) Segel (Shin\_Aitoku\_Maru) oder mit Tuchsegeln (Maltese Falcon). Eine einfachere technische Realisierung wird von der Firma Dykstra in den NL für ein Frachtschiff geplant (DYKSTRA NAVAL ARCHITECTS 2013).

## 4 Konzept

### 4.1 Randbedingungen

Im vorliegenden Projekt werden primär die Komponenten des Energieverbrauchs für den Transport betrachtet. Die zu erwartenden Projektergebnisse bezüglich der Wirtschaftlichkeit werden von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängen, die wir nicht beeinflussen können; z.B.

- der Auslastung der globalen Handelsflotte (Weltkonjunktur),
- dem Preis des Treibstoffs,
- den Umweltauflagen (z.B. Fahren mit Schweröl oder Diesel / MGO).

Die Ergebnisse werden deswegen in Form von Szenarien für verschiedene Randbedingungen diskutiert. Diese ergeben sich aus dem Einsparpotenzial (Energie, Kosten), der Verringerung der Umweltbelastung und den zusätzlichen Kosten durch einen WZA. Sie sind u.a. als Funktion

- der Schiffsgeschwindigkeit,
- der Effektivität eines WZA,
- der Treibstoffart, bzw. -kosten,
- der zusätzlichen Investitionskosten und
- der zusätzlichen Betriebskosten

zu diskutieren.

### 4.2 Auswahl der Windzusatzantriebe (WZA)

Es werden solche WZA diskutiert, deren Technik und Funktion bekannt und auch in Einzelfällen erprobt sind, so dass ein Einsatz im großen Stil technisch möglich erscheint. Ferner soll ein WZA auf einem Transportschiff

- die Funktion des Schiffes, die Beladungs- und Entladungsvorgänge nicht wesentlich beeinträchtigen,
- keine zusätzliche Arbeitsbelastung des Schiffpersonals darstellen,
- die Wirtschaftlichkeit des Schiffes erhöhen.

Im Projekt wurden nur solche WZA in Erwägung gezogen, die den oben genannten Kriterien genügen und bereits in der Vergangenheit eine gewisse technische Realisierung hatten, so dass keine grundsätzlichen Probleme einer Realisierung entgegenstehen.

## Ergebnis

Es wurden die folgenden WZA ausgewählt:

- Kite,
- Flettner,
- Dynarigg (einstellbare feste Segelflächen oder verstellbare Masten mit Tuchsegel)

Für den Kite gibt es aus dem BMBF-Projekt (BMBF 2009) ausreichende Daten, um es in der Routenoptimierung zu simulieren.

Der Flettnerrotor ist seit über 100 Jahren bekannt und kommt gerade wieder zur Anwendung im E-Ship1 der Firma (ENERCON GMBH 2013). Die Berechnungsdaten zur Auslegung eines Flettnerrotors können einem Forschungsbericht entnommen werden (WAGNER et al. 1985).

Das Dynarigg wurde an Hand von Literaturwerten modelliert (WAGNER 1966, WAGNER 2000). Im Projekt werden für die Simulation dieser Windantriebe generell nur Literaturwerte verwendet. Im Rahmen des vorliegenden Projektes werden keine eigenen WZA getestet oder entwickelt.

## 4.3 Auswahl der Schiffe

Für die Auswahl der zu betrachtenden Schiffstypen werden folgende Kriterien zu Grunde gelegt:

- Der Einsatz von WZA sollte möglich und sinnvoll sein:
- Die Schiffe sollten nicht zu schnell fahren ( $\leq 15$ kn), da sonst der Wind nur selten genutzt werden kann.
- Der Transport der Waren für diese Schiffstypen sollte i.d.R. nicht zeitkritisch sein.
- Aufbauten für WZA sollten möglich sein, ohne die Funktion des Schiffes wesentlich einzuschränken.
- Die Anzahl der ausgewählten Schiffstypen sollte einen erheblichen Anteil am Welthandel realisieren.

### Ergebnis:

Es werden folgende Schiffstypen betrachtet:

- Mehrzweckfrachter MZF (typischerweise ca. 15 T to)

- Bulker (typischerweise ca. 37 T to)
- Tanker (typischerweise ca. 115 T to)

Details zur Auswahl der Schiffe und transportierten Güter finden sich im TP4.

#### 4.4 Auswahl der Fahrweise der Schiffe

Im Rahmen des Projektes fahren die Schiffe mit konstanter Geschwindigkeit. Eine Fahrweise mit konstanter Maschinenleistung wird hier nicht betrachtet, da dabei die Schiffsgeschwindigkeit nicht konstant ist. Sie wird durch Wind und Wellen ständig modifiziert und die Komplexität der RO dabei erhöht. Eine kontinuierliche Veränderung der Geschwindigkeit bzw. der Motorleistung, um z.B. eine Ankunftszeit einzuhalten, wird hier nicht in der Routenoptimierung betrachtet, da damit teilweise gegenläufige Ziele verfolgt würden (Zeit oder Energie) und es schwer ist, ein Einsparpotenzial zu definieren.

##### **Ergebnis:**

- $V = \text{konst}$  (z.B. 18kn, 15kn, 13kn, 10 kn),
- $P = \text{konst}$  (hier nicht betrachtet).

#### 4.5 Auswahl der Routen

Es werden zunächst nur drei Routen betrachtet, die verschieden lang sind und sich in den Wetterverhältnissen charakteristisch unterscheiden:

##### **Ergebnis:**

- Nordsee (Norwegen - Deutschland): kurz, in beiden Richtungen etwa gleich starke turbulente Windverhältnisse
- Nordatlantik (Nordamerika - Deutschland), mittellang, turbulente Windverhältnisse vorwiegend in einer Richtung
- Atlantik (Südamerika - Deutschland), lang, in beiden Richtungen vorwiegend stabile Windverhältnisse.

#### 4.6 Auswahl der Transportgüter

Die Korrelation zwischen Strecke und Waren (damit verknüpft die Schiffstypen) ist im TP4 / Cargodatenbank erläutert. Für die Betrachtung der Kosten der Gesamtkette müssen die Waren berücksichtigt werden, die mit den Schiffen und auf Land transportiert werden.

##### **Kriterien:**

- Die Transportgüter müssen zu den ausgewählten Routen und zu den ausgewählten Schiffstypen passen

- die wichtigsten Warengruppen und Schiffstypen sollten vertreten sein.

### **Ergebnis:**

Ergebnisse sind im TP 4 abgeleitet. Beispielhaft sind genannt:

- Projektladung von USA (Baltimore) nach Deutschland (WHV) (Nordatlantik-Route): mit dem MZF
- Schüttgüter von Uruguay nach Deutschland, Emden (Atlantik-Route), Bulker
- Öl von Norwegen (Bergen) nach Wilhelmshaven (Nordsee-Route), Tanker.

Auf der Basis dieser Ergebnisse können dann auch die globalen Einsparpotenziale für die verschiedenen Szenarien prognostiziert werden.

## **4.7 Auswahl der Wetterdaten**

Um die Wirkung von Wind und Wellen auf die Antriebsleistung, bzw. auf den Treibstoffverbrauch von Schiffen und um die Leistung von WZA zu berechnen, werden geeignete Wetterdaten für die globalen Seehandelsrouten benötigt. Für die Ermittlung des maximalen Einsparpotenzials durch WZA auf den definierten Routen werden für den Zeitraum des Durchfahrens die Analysenwerte ( $t=0$  der Modellrechnung) genommen. Das sind die „richtigen“ Werte, d.h. die Werte, die aufgrund von Berechnungen (unterstützt von Messwerten von Mess-Stationen und von Satellitenwerten) für den aktuellen Zeitpunkt von den Wetterdiensten berechnet und geliefert werden.

Für eine Routenvorhersage müssen die Vorhersagewerte ab dem Start-Zeitpunkt verwendet werden. In der Regel ist der Vorhersagezeitraum auf sieben Tage begrenzt (DWD), da ab diesem Zeitpunkt die Ungenauigkeit der Vorhersagewerte zu groß wird.

Es gibt eine Reihe von Anbietern für Wetterdaten, bspw. den Amerikanischen Wetterdienst NOAA (U.S. Climate Reference Network after one decade of operations: status and assessment. 2012). Im Vorläuferprojekt „Zero Emissionship“ (Aschenbeck und et al. 2008) wurden die ECMWF-Daten (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) verwendet.

### **Ergebnis:**

Im vorliegenden Projekt wurde mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) zusammengearbeitet. Es wurden die Analysenwerte und die Vorhersagewerte für den Zeitraum 2006 bis einschließlich 2010 vom DWD zur Verfügung gestellt. Dabei wurden die für die Berechnung notwendigen Daten bereits vom DWD aus der Gesamtheit der Daten herausgefiltert (Abbildung 4.1):



<b><u>Eingelesene Daten aus den DWD</u></b>	
Wetterdaten	
10m-Windgeschwindigkeit	[m/s/10]
Windrichtung	[°]
Signifikante Wellenhöhe	[m/10]
Höhe der Windsee	[m/10]
Richtung der Windsee	[°]
Peak-Periode der Windsee	[s/10]
Höhe der Duenung	[m/10]
Richtung der Duenung	[°]
Peak-Periode der Duenung	[s/10]

Abbildung 4.1: Struktur der vom DWD zur Verfügung gestellten Wetterdaten

Die Werte beziehen sich auf eine Erdoberfläche von  $0,75^\circ$ . Entsprechend ist die Auflösung der Daten begrenzt. Analysenwerte werden jeweils für  $T_0 = 0$  Uhr und 12 Uhr UTC berechnet (Ergebnis der Modellrechnung), daraus werden die Vorhersagewerte für  $T = T_0 + n \cdot 3h$  berechnet. Maximale Vorhersage ist sieben Tage. Danach ist die Unsicherheit so hoch, dass eine Vorhersage nicht mehr sinnvoll ist.

## 4.8 Vorgehensweise

Für den Warentransport hat der Kunde das Ziel, eine Ware möglichst kostengünstig und schnell von einem Punkt A zu einem Punkt B zu transportieren. Die verschiedenen Transportunternehmen auf Land und auf See haben jeweils das Ziel, auf den entsprechenden Teilstrecken einen möglichst hohen Gewinn zu erzielen, begrenzt durch die Marktgegebenheiten. Insbesondere gilt dies für den Charterer eines Schiffes, da hier eine große Investition zu amortisieren ist:

Gewinn (Vor- und Nachlauf)  $\longrightarrow$  Maximum

Gewinn (Hauptlauf auf See)  $\longrightarrow$  Maximum

In der Summe:

Gewinn (Gesamtkette)  $\longrightarrow$  Maximum

### Durchführung:

- Im 1. Schritt ist deswegen zu untersuchen, in wie weit Vor- und Nachlauf vom Hauptlauf (Abbildung 2.2) getrennt betrachtet werden können. Das hängt davon ab, in wie weit in den Häfen und den anderen Knoten Puffermöglichkeiten vorhanden sind, um Schwankungen in der Transportzeit auf See auszugleichen.

- Im 2. Schritt wird der Energieverbrauch von definierten Schiffen auf ausgewählten Routen als Funktion von Geschwindigkeit, Ladung (Tiefgang), von Wind und Wellen und von der Wirkung eines Windzusatzantriebes berechnet. Dazu ist der Energieverbrauch des Schiffs zu modellieren, und zwar
  - im Glattwasser (Glattwasserkurve GWK)
  - durch den Einfluss von Wind und Wellen
  - durch den Einfluss eines WZA.

Die Modellierung des Energieverbrauchs des Schiffs unter verschiedenen Betriebsbedingungen und unter Einfluss von Wind und Wellen wird durch Installation einer geeigneten Messtechnik auf einem MZF evaluiert (TP3).

Die Modelle der WZA können hier nur auf der Basis von Literaturdaten modelliert werden. Im Rahmen des Projektes können keine WZA gebaut und getestet werden.

- Im 3. Schritt wird eine Routenoptimierung (RO) mit der Zielsetzung einer Minimierung des Energieverbrauches in einem zeitlich vorgegebenen Rahmen für die Transportzeit entwickelt.
- Im 4. Schritt wird die Wirtschaftlichkeit eines WZA auf der Basis
  - Der Energieeinsparung,
  - der Energiekosten,
  - der Investitionskosten und
  - der Betriebskosten ermittelt.

## 5 Durchführung und Ergebnisse

### 5.1 Analyse von Transportketten

Die Energieeinsparung auf der Hauptroute auf See durch die RO und einem WZA ist i.d.R. mit einer längeren Reisezeit verknüpft. Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Wie ist die wirtschaftliche Bedeutung einer Energieeinsparung auf See?
- Wie wirkt sich die Verlängerung der Transportzeit auf die gesamte Kette aus?
- Kann die Verlängerung im Vorlauf und Nachlauf ausgeglichen werden?
- Wo gibt es Freiräume in der gesamten Kette?

Zur Klärung erfolgt

- eine Analyse der wirtschaftlichen Relevanz der Energieeinsparung (am Beispiel)
- eine Analyse der praktizierten Lieferzeiten in der Seeschifffahrt.

#### 5.1.1 Analyse der wirtschaftlichen Relevanz der Energieeinsparung

Der Anteil der Treibstoffkosten an den Gesamtkosten für den Seetransport wird allgemein mit ca.40% - 60% beziffert (WORLD SHIPPING COUNCIL Mai 2008), hängt aber wesentlich von dem aktuellen Preis des Rohöls ab. Anhand eines Beispiels einer mittellangen Route, des Transports von Zellulose von Uruguay nach Deutschland, wurden diese Angaben überprüft (Abbildung 5.1). Bezogen auf die Gesamtkosten des reinen Seetransports ist der Anteil der Treibstoffkosten hier ca. 73%. Dies liegt sicher auch an den zum Zeitpunkt der Analyse geltenden Treibstoffkosten (2015). Details finden sich im Teilprojekt 0 (TP 0). Bezogen auf die Gesamtkette machen die Treibstoffkosten auf See immer noch ca. 42% aus, sie stellen zweifelsohne den dominierenden Kostenfaktor dar.

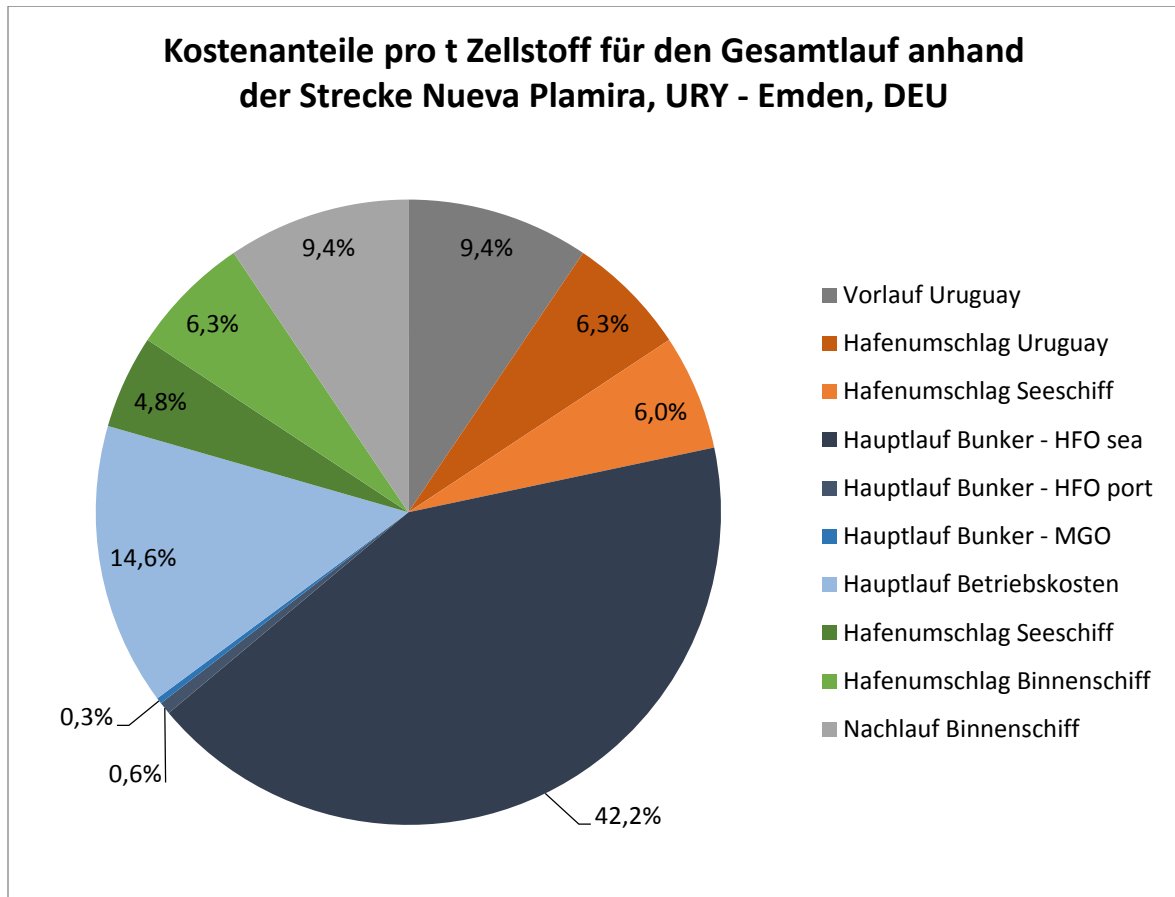


Abbildung 5.1: Kostenanalyse eines Transports von Zellulose von Uruguay nach Deutschland, inklusive Vor- und Nachlauf (siehe TP0).

Der Preis des Treibstoffs basiert auf dem Einsatz des Schweröls (z.B. IFO 380). Sollte durch Umweltvorschriften die Verfeuerung dieses Schweröls weiter eingeschränkt werden, so werden sich Treibstoffkosten drastisch erhöhen. Es erscheint deswegen sinnvoll, das im Rahmen des Projektes ermittelte Einsparpotenzial zunächst nur auf den Energieverbrauch zu beziehen. Die finanzielle Umsetzung der Energieeinsparung hängt von vielen, nicht kalkulierbaren Faktoren ab. Hierfür können höchstens verschiedene Szenarien diskutiert werden.

### 5.1.2 Freiheitsgrade in der Lieferzeit

Vorhandene Freiheitsgrade in der Transportzeit können zwischen unterschiedlichen Gütern abweichen. Werden mehrere Güter gleichzeitig transportiert, so bestimmt das Gut mit dem geringsten Freiheitsgrad den Gesamtfreiheitsgrad des Transportes. Dies ist ein Grund, um im Projekt die Containerschiffe nicht zu betrachten.

Im Seeverkehr wird die Transportzeit i. d. R. aus der Designgeschwindigkeit eines Seeschiffes abgeleitet bzw. Erfahrungswerte angenommen. Bedingt durch die Schifffahrtskrise lässt sich verstärkt beobachten, dass Schiffe unterhalb der Designgeschwindigkeit fahren und sich die Transportzeit verlängert. Diese Vorgehensweise wird auch als „slow steaming“ in der Schiff-

fahrt bezeichnet. Vermutlich ist „slow steaming“ nur möglich, weil Freiheitsgrade zur Verfügung stehen. Ob dies auch auf Schiffstypen des Projektes Robust zutrifft, wurde mittels AIS-Daten für ausgewählte Seeschiffe mit Hilfe der Plattform Marinetraffic.com überprüft (SINDT 2013). Es zeigte sich, dass erhebliche Verlängerungen (Tage) in der Lieferzeit derzeit praktiziert werden. In der Tabelle 5.1: Abweichungen zur Designgeschwindigkeit (Sindt 2013) ist dargestellt, wie die prozentuale Abweichung zwischen ermittelter Geschwindigkeit und Designgeschwindigkeit ist.

Tabelle 5.1: Abweichungen zur Designgeschwindigkeit (Sindt 2013)

Schiffstyp	Design- geschwindigkeit / kn	Ermittelte Geschwindigkeit / kn	Prozentuale Abweichung
MZF	15	9,4	37%
Bulker	14	7,8	44%
Tanker	15	9,9	35%

Zusammenfassend lässt sich daraus ableiten, dass im Seetransport eine Verlängerung der Transportzeit (bezogen auf die Designgeschwindigkeit) um bis zu 44% praktiziert wird. Erste Ansätze zur Analyse der Freiheitsgrade in der Gesamtkette wurden von A. Burget mittels Experteninterviews als auch von S. Heitmann mittels Umfrage analysiert (HEITMANN 2012, BURGET 2012). Daraus lässt sich ableiten, dass Warenempfänger i.d.R. eine längere Lieferzeit um bis zu zwei Tage für geringwertige und zeitlich unkritische Güter tolerieren. Die Planbarkeit muss gegeben sein, d.h. der angegebene Zeitpunkt muss dann (auch wenn er später ist) möglichst genau eingehalten werden, damit der weitere Ablauf im Hafen und im Nachlauf geplant werden kann.

Die bei dem Einsatz eines WZA und einer RO zu erwartende Reisezeitverlängerung wurde durch Simulation ermittelt (siehe Kap5.5). In Abbildung 5.2 sind die Reisezeiten für eine Fahrt Baltimore (USA) – Wilhelmshaven (D) über ein Jahr (bei einer Fahrt / Woche) dargestellt. Bei einer Fahrt über den Großkreis (GK) ergibt sich bei  $v=13$  kn eine Reisezeit von 284 h, bei einer für die Verwendung eines WZA optimierten Route ist die Reisezeit maximal 10 h länger.

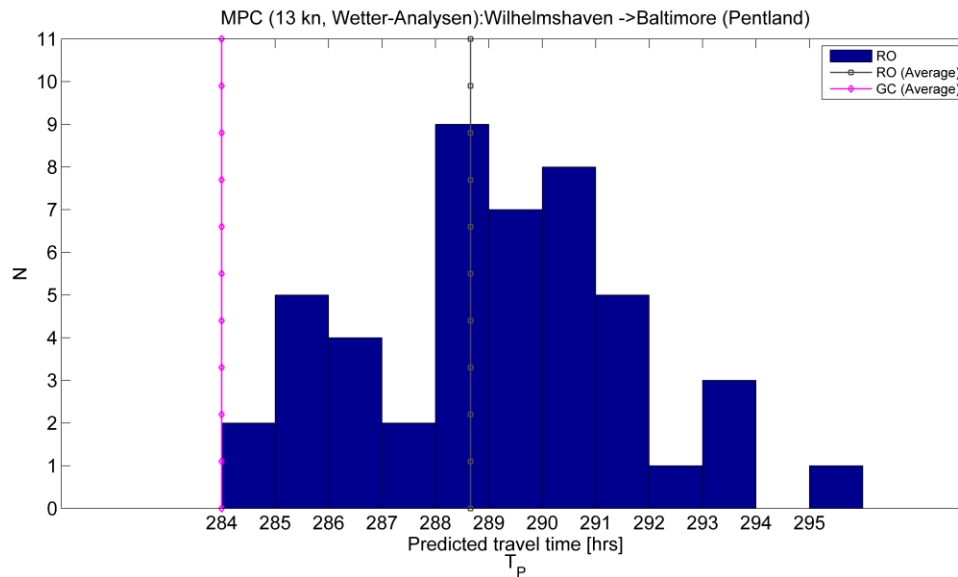


Abbildung 5.2: Reisezeiten mit und ohne RO und WZA (Flettner) über ein Jahr berechnet: Fahrt auf dem GK. 284 h, mit WZA und RO ergibt sich eine mittlere Reisezeit von 289 h mit einer Streubreite von max. 6 h um den Mittelwert

### Simulationsergebnis:

Maximale zu erwartende Reisezeitverlängerung auf der Route BA-WHV:

Im Mittel ca. 5h, mit einer Variationsbreite von

$$\Delta t/t = 12\text{h}/284\text{h} = 4\%$$

Bei einer Reisezeit von ca. 20 Tagen (z.B. für eine Route Südamerika-Deutschland) wäre das:  
 $\Delta t = 1$  Tag

### 5.1.3 Ergebnis:

Da die Schwankungen der Reisezeit durch die RO und einem WZA im Rahmen der praktizierten Reisezeit-Schwankungen liegt, ist es nicht nötig, die Wirkung der Schwankungen der Transportzeit durch die RO und den WZA auf die Gesamtkette zu untersuchen:

**Hauptroute auf See und Vor- und Nachlauf auf dem Festland können entkoppelt betrachtet werden.**

Für die Zielgröße, den Gewinn, ergibt sich damit:

$$\text{Gesamtgewinn} = G(\text{Hauptlauf}) + G(\text{Vor- und Nachlauf}) \longrightarrow \max$$

wird erreicht durch

$$G(\text{Hauptlauf}) \longrightarrow \max \quad \text{und} \quad G(\text{Vor- und Nachlauf}) \longrightarrow \max$$

d.h.  $G$ (Hauptlauf) und  $G$ (Vor- und Nachlauf) können unabhängig voneinander betrachtet, also auch unabhängig voneinander optimiert werden. Da für die Optimierung des Vor- und Nachlaufes eines Seetransportes verschiedene Akteure für sich das Optimum suchen, wird im Rahmen des Projektes nur die Optimierung des Hauptlaufes betrachtet. Die Schnittstelle zwischen Hauptlauf auf See und Vor- und Nachlauf stellt der Hafen dar. Deshalb wird die Funktion des Hafens im Rahmen einer Dissertation untersucht und modelliert (FOLKERTS 2016).

## 5.2 Leistungsberechnung

### 5.2.1 Grundlagen

Die Antriebsleistung bzw. der Energieverbrauch des Schiffs dient dazu, die verschiedenen Reibungskräfte zu überwinden:

- den Glattwasserwiderstand  $R_{GW}$
- zusätzliche Widerstände durch Fouling, Ruder, ....
- Den Widerstand durch Wind und Wellen aufs Schiff:  $R_{WI}$ ,  $R_{WE}$ .

Der Schiffswiderstand wird außerdem durch die aktuelle Fahrtsituation bestimmt:

- die Schiffsgeschwindigkeit,
- den Trimm
- den Tiefgang
- die Oberflächenrauigkeit des Schiffskörpers
- .....

Es ist schwierig, die einzelnen Beiträge zum gesamten Schiffswiderstand zu ermitteln. Der Glattwasserwiderstand wird durch den Schiffskörper bestimmt, aber auch durch den Ruderwinkel, den Tiefgang, den Trimm und die Wassertemperatur beeinflusst. Normalerweise wird  $R_{GW}$  über Modellmessungen in einem Becken bestimmt („model test report“) und dann auf die tatsächliche Schiffsgröße hochgerechnet. Alternativ kann  $R_{GW}$  auch theoretisch berechnet werden (HOLTROP, J., MENNEN, G. G. J., SCHNEEKLUTH & BERTRAM 1998). Die Widerstandserhöhung durch Fouling wächst zwischen zwei Werftaufenthalten und kann zu einem zusätzlichen Treibstoffverbrauch von bis zu ca. 40% betragen (FATHOM SHIPPING, KHIATANI 1985). Der Gesamtwiderstand bestimmt bei einer gegebenen Antriebsleistung die resultierende Schiffsgeschwindigkeit, wobei die effektive Vortriebsleistung  $P_E$  durch verschiedene Wirkungsgrade mit der Motorleistung  $P_B$  verknüpft ist. Eine Übersicht über die Berücksichtigung der verschiedenen Widerstände und Wirkungsgrade in dem Simulationsprogramm zeigt Abbildung 5.3

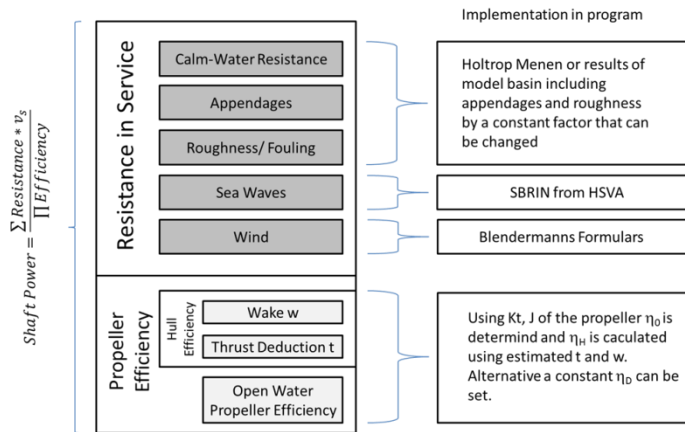


Abbildung 5.3: Berücksichtigung der verschiedenen Widerstände und Propellereigenschaften im Simulationsprogramm der Routenoptimierung (BENTIN et al. 2016).

Die Widerstandserhöhung durch Wind und Wellen kann zu einer Verringerung der Schiffsgeschwindigkeit von bis zu 30% führen [z.B. (TOWNSIN, R.L., KWON, Y.J. 1983)]. Um diese Widerstandserhöhung zu bestimmen, können komplexe Berechnungsmethoden, basierend auf Potenzialtheorie und Reibungsberechnungen, herangezogen werden. Obwohl für diese Berechnungen ein hoher Rechenaufwand eingesetzt werden muss, ist die erreichte Genauigkeit begrenzt. Die im Rahmen des vorliegenden Projektes benutzten Modellrechnungen und „Model Test Reports“ sind einfacher und werden an Hand von Schiffsmessungen evaluiert, bzw. gefittet (Abschnitt 5.2.8). Die zur Überwindung der Widerstände

$$R_T = R_{GW} + R_{WI} + R_{WE}$$

notwendige Leistung ist dann

$$P_{\text{ges}} = R_T \cdot V_S$$

Die entsprechenden Leistungen entlang der Wirkungskette sind in Abbildung 5.4 dargestellt und werden nachfolgend erklärt. Die von der Maschine abgegebene Leistung nimmt bis zur effektiven Leistung für den Schiffsvortrieb durch die verschiedenen Effektivitätswerte entlang der Wirkungskette ab (siehe z.B. MAN 2012):

$P_{\text{ges}} = P_E = R_T \cdot V_S$ : effektive Vortriebsleistung (effective towing power)

$P_E = \eta_H \cdot P_T$ ; mit

$P_T$ : Vorschubleistung vom Propeller abgegeben (thrust power delivered)

$\eta_H$ : hull efficiency; häufig im Bereich 1,1

$P_T = \eta_B \cdot P_D$  mit

$P_D$ : Leistung der Welle an den Propeller (power delivered to propeller)

$\eta_B$  = Propellerwirkungsgrad am Schiffskörper (propeller efficiency behind hull)

$\eta_B = \eta_0 \cdot \eta_R$  mit

$\eta_0$  = Freifahrtwirkungsgrad; Wirkungsgrad des Propellers ohne Schiffsrumpf: = 0,35 – 0,75



$\eta_B$  = Rotationswirkungsgrad (relative rotative efficiency): 1,0 – 1,07 für Einzelpropeller am Rumpf

$$P_B = \eta_s * P_B \quad \text{mit}$$

$P_B$  = von der Maschine abgegebene Leistung (break power)

$\eta_s$  = Wirkungsgrad der Wellenleistung (shaft efficiency): around 0,985

Die aufzubringende Leistung unter Berücksichtigung eines Antriebsbeitrages durch einen WZA ergibt sich dann zu:

$$P = P_{gw} + P_{we} + P_{wi} - P_{wza},$$

wobei die Leistungen je nach betrachteter Stelle in der Wirkungskette  $P_B$ ,  $P_D$ ,  $P_T$ ,  $P_E$  sein können.

Der Treibstoffverbrauch der Antriebsmaschine ergibt sich dann zu

$$dm/dt = k * P_B$$

mit  $k$  = Wirkungsgrad der Maschine (SFOC): =  $f$  (Drehzahl, Heizwert des Treibstoffs, Maschineneffektivität, ...)

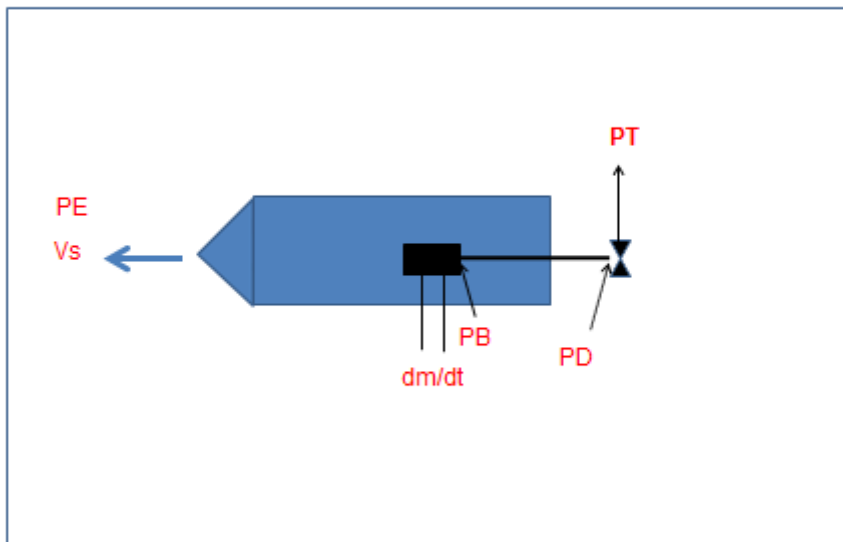


Abbildung 5.4: Die verschiedenen Leistungen entlang der Wirkungskette vom Motor zum effektiven Schiffsvortrieb: PB: vom Motor abgegeben; PD: Leistung an den Propeller geliefert; PT: Leistung vom Propeller an das Wasser übertragen; PE: effektive Vortriebsleistung;  $dm/dt$  = Treibstoffverbrauch

### 5.2.2 Vorgehensweise

Für die Routenoptimierung muss das Verhalten der Schiffe in Wind und Wellen simuliert werden. Dazu werden benötigt:

- die Schiffseigenschaften inklusive des Verhaltens bei Wind und Wellen,
- die Eigenschaften (die Funktion) der verwendeten Windzusatzantriebe (WZA) und
- die Wetterdaten (Wind und Wellen).

Die Schiffseigenschaften werden beschrieben durch:

- die Glattwasserkurve (GWK),
- die Wirkung des Windes auf das Schiff
- die Wirkung der (See-) Wellen auf das Schiff

Ziel ist es, die Differenz der Energieverbräuche des Schiffs bei einer Fahrt durch glattes Wasser (GWK) und der Energieverbräuche unter Berücksichtigung von

- Wind direkt aufs Schiff
- Wellen aufs Schiff
- Windzusatzantrieben

auf den verschiedenen Routen zu ermitteln.

#### Glattwasserkurve

Die Basis für alle Auswertungen ist die Glattwasserkurve (GWK). Da nur die Veränderungen des Leistungsbedarfs durch Wind, Wellen und den Zusatzantrieb interessant sind, ist die erforderliche Genauigkeit der Glattwasserkurve in der Simulation begrenzt: Es reicht, eine „hinreichend genaue“ Näherungsformel (basierend auf den „model test report“ für die Glattwasserkurve der betrachteten Schiffe zu entwickeln, wobei eine angenommene zusätzliche Rauigkeit der Schiffshaut durch Bewuchs mit einem Faktor berücksichtigt wird.

#### Wirkung des Winds auf das Schiff

Der zusätzliche Widerstand durch den Wind  $R_{wi}$  wird nach der Formel von Blendermann berechnet (BLENDERMANN 1993, BLENDERMANN 1966).

#### Wirkung der (See-) Wellen auf das Schiff

Der zusätzliche Widerstand durch die Seewellen  $R_{we}$  wird nach einem Programm der HSVA (sbrin) berechnet. Das Programm berechnet das Verhalten verschiedener Schiffstypen (8 Basisformen, charakterisiert durch 7 Hauptparameter) im Seewellenspektrum, charakterisiert durch die Wellenperiode, die Richtung der Welle zum Schiffskurs und die signifikante Wellenhöhe. Das Programm wurde in 1977 von P. Blume in der HSVA in FORTAN entwickelt (BLUME September 1977). Für die Verwendung im Routenoptimierungstool wurde es in Java umgeschrieben (TRAUMÜLLER 2012).

Durch Messungen auf einem seegängigen, normalen Handelsschiff (Mehrzweckfrachter) werden die Modelle für den Einfluss von Wind und Wellen überprüft.

### 5.2.3 Glattwasserkurven (GWK)

Der Widerstand des Schiffs im „glatten Wasser“, bzw. die Leistung zur Überwindung dieses Widerstandes, kann auf verschiedene Weise ermittelt werden:

- Über theoretische Berechnungen auf Grund der Schiffsform, z.B. über das Programm PARAMARIN (KÜMMEL 2011)
- Über Messungen am Modell, das üblicherweise bei einem neuen bzw. modifizierten Schiffsrumpf gebaut wird (Model Test Report); auf der Basis dieser Messungen wird dann die GWK ( $P=f(V_s, \text{Tiefgang/Beladung, ...})$ ) des realen Schiffs errechnet.

Nach der grundlegenden Formel von Bernoulli ist der Schiffswiderstand (Widerstandskraft)

$$R \sim 1/2 * \rho * V_s^2 * A_s \quad \text{bzw.} \quad R = C * V_s^2$$

mit  $\rho$  = Dichte des Wassers,  $V_s$  = Geschwindigkeit des Schiffs zum Wasser,  $A_s$  = die benetzte Oberfläche des Schiffskörpers.  $C$  ist ein Widerstandsbeiwert, der hauptsächlich von der Schiffskörperform, der Schiffsgeschwindigkeit der Viskosität des Wassers abhängt. Siehe TP 2 und (KRISTENSEN & LÜTZEN 2012, ITTC 2011)

Für die Leistung zur Überwindung der Widerstandskraft  $R$  gilt:

$$P = R * V_s$$

So dass man ansetzen kann

$$P = C * V_s^3$$

Die Formel gilt weitgehend für langsam fahrende Schiffe, je schneller die Schiffe werden, umso mehr sind andere Effekte zu berücksichtigen, so dass sich folgende Erfahrungswerte ergeben (siehe z.B. (MAN DIESE & TURBO 2012).

- Für langsam fahrende Schiffe (Bulkler, Tanker):  $P = C * V_s^{3,5}$
- Für Schiffe mittlerer Größe und mit mittlere Geschwindigkeit fahrend:  $P = C * V_s^{4,0}$
- Für schnell fahrende Schiffe (Containerschiffe):  $P = C * V_s^{4,5}$

Die in diesem Projekt betrachteten Schiffe (Bulkler, MZF, Tanker) sind eher als langsam fahrend einzuordnen, weswegen für die GWK zunächst  $P = C * V_s^{3,5}$  angesetzt wird.

Aus den Modelluntersuchungen zur Konzeption des Schiffs sind in den MTR die auf die tatsächliche Schiffsgröße hochgerechneten Werte als Funktion der Schiffsgeschwindigkeit angegeben, und zwar für zwei Eintauchtiefen: T (Full Load TFL, Ballast TBA). Aus diesen Daten wurden für das vorliegende Projekt eine vereinfachte GWK abgeleitet:

$$P_D = f(V_S, T)$$

$P_D$  = Leistung auf der Welle (an den Propeller abgegeben)

$V_S$  = Geschwindigkeit des Schiffs durchs Wasser

$T$  = Eintauchtiefe

Für eine Eintauchtiefe  $T$  wurde zunächst aus den entsprechenden tabellarischen Werten des MTR für

$$P \sim V^x$$

der Exponent ermittelt. Aus den Daten ergibt sich für den betrachteten Geschwindigkeitsbereich allerdings kein konstanter Exponent. Außerdem hängt er vom Tiefgang ab. Es wurde entweder für  $x$  ein Mittelwert angesetzt oder eine Abhängigkeit von  $T$  berücksichtigt.

Dann wurde aus dem Unterschied der beiden Kurven ( $T=T_{FL}$  und  $T=T_{Ba}$ ) eine  $T$ -Abhängigkeit für die Wellenleistung abgeleitet:

$$P_D(\text{MTR}) = (A_1 * T + A_2) * V_S^x .$$

Ferner wird davon ausgegangen, dass  $P_D(\text{MTR})$  nicht genau mit dem realen  $P_D$  des Schiffs übereinstimmt (Veränderung der Oberflächenrauigkeit durch Fouling, ...), so dass angesetzt wird

$$P_D = C * P_D(\text{MTR}),$$

wobei  $C$  experimentell (oder erfahrungsmäßig) abgeschätzt wird.

Die im Projekt angesetzten Werte für

$$P_D = (a_1 * T + a_2) * V_S^x \quad \text{mit} \quad a_1 = C * A_1 \quad \text{und} \quad a_2 = C * A_2$$

sind in der Tabelle für die betrachteten Schiffstypen aufgelistet (Tabelle 5.2).

#### 5.2.4 Wirkungsgrade

Die Wirkungsgrade  $\eta_D$ ,  $\eta_S$ ,  $\eta_0$ ,  $\eta_H$ ,  $\eta_R$  sind von der Schiffsgeschwindigkeit, dem Tiefgang, der Schiffsform und dem Propeller abhängig. Sie finden sich in dem MTR als Funktion der Schiffsgeschwindigkeit und des Tiefgangs ( $T_{FL}$ ,  $T_{Ba}$ ). Für das vorliegende Projekt wurden zur Berechnung des Energieeinsparpotenzials die Werte für eine „aktuelle“ Arbeitsgeschwindigkeit (eher „slow steaming“) der Schiffe ausgewählt und dann der Mittelwert aus den Werten für  $T_{FL}$  und  $T_{Ba}$  gebildet, da sich während der Fahrt der Tiefgang verändert, und die Schiffsgeschwindigkeit auch nicht als konstant angesehen werden kann (Tabelle 5.2).

#### 5.2.5 Einfluss von Wind auf das Schiff

Der Einfluss des Windes auf den Energieverbrauch des Schiffes wird im vorliegenden Projekt über den Ansatz von „Blendermann“ berücksichtigt (BLENDERMANN 1993). Der zusätzliche Windwiderstand errechnet sich dann zu

$$R_{Wi} = \frac{\rho_{air}}{2} V_R^2 CD_{IAF} A_F \frac{\cos \varepsilon}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_{IAF} A_F}{CD_t A_L}\right) (\sin(2\varepsilon))^2}$$

$\rho_{air}$  ist die Dichte der Luft. Für die Beiwerte  $\delta$ ,  $CD_t$ ,  $CD_{IAF}$  werden die Vorschlagswerte von Blendermann genommen (BLENDERMANN 1996, BLENDERMANN 1994) und in der Tabelle 5.2 für die verschiedenen Schiffstypen aufgelistet.  $\varepsilon$  ist der Winkel zwischen der Windrichtung (aus der der Wind kommt) und dem Geschwindigkeitsvektor des Schiffs. Die Werte für

$A_l$  (laterale Windangriffsfläche [m<sup>2</sup>]) und  $A_F$  (Fläche des Hauptluftspants [m<sup>2</sup>])

sind für die betrachteten Schiffe ebenfalls in Tabelle 5.2 angegeben. Beide Werte werden sich mit der Beladung und dem Tiefgang verändern. Es wird hier davon ausgegangen, dass sich das Verhältnis  $A_F/A_L$  im Nenner nicht wesentlich mit dem Tiefgang ändert, während für  $A_F$  im Zähler eine Abhängigkeit vom Tiefgang angesetzt wird und durch

$$A_F(T) = 0,8 B (A_F / (0,8 B) + T_{FL} - T)$$

ersetzt wird. Dabei sind  $B$  die Breite des Aufbaus und  $T_{FL}$  der Tiefgang bei Full Load.

### 5.2.6 Einfluss von Wellen auf das Schiff

Der Welleneinfluss auf den Kraftstoffverbrauch des Schiffs wird über ein Programm der HSVA ermittelt (BLUME September 1977). Details finden sich im Anhang TP2. Als Eingabewerte sind neben der Schiffsgeschwindigkeit die Schiffsmaße  $L_{pp}$  und  $B$  und der CB Wert (block coefficient) erforderlich. Alle Werte ergeben sich aus den MTR der betrachteten Schiffe und sind in der Tabelle 5.2 aufgeführt. Die CB Werte sind jeweils bei Full Load und Ballast im MTR angegeben:

$$CB_{FL} \text{ bei } T = T_{FL} \text{ und } CB_{Ba} \text{ bei } T = T_{Ba}$$

Für den aktuellen Tiefgang wird im Programm linear interpoliert:

$$C_B(T) = CB_{FL} - [(CB_{FL} - CB_{Ba}) / (T_{FL} - T_{Ba})] (T_{FL} - T)$$

### 5.2.7 Schiffsmessungen

#### 5.2.7.1 Zielsetzung

Zur Verifizierung der Programme zur Berechnung des Einflusses von Wind und Wellen auf den Schiffswiderstand bzw. auf den Leistungsbedarf wurden Messungen auf einem MZF durchgeführt (Abbildung 5.5).



Abbildung 5.5: Die BBC Hudson, auf der die Messungen durchgeführt wurden

In der Abbildung 5.6 sind die Informationen dargestellt, die für die Evaluation der Programme benötigt werden, teilweise als Messgrößen, teilweise nur über mathematische Modelle (WZA).

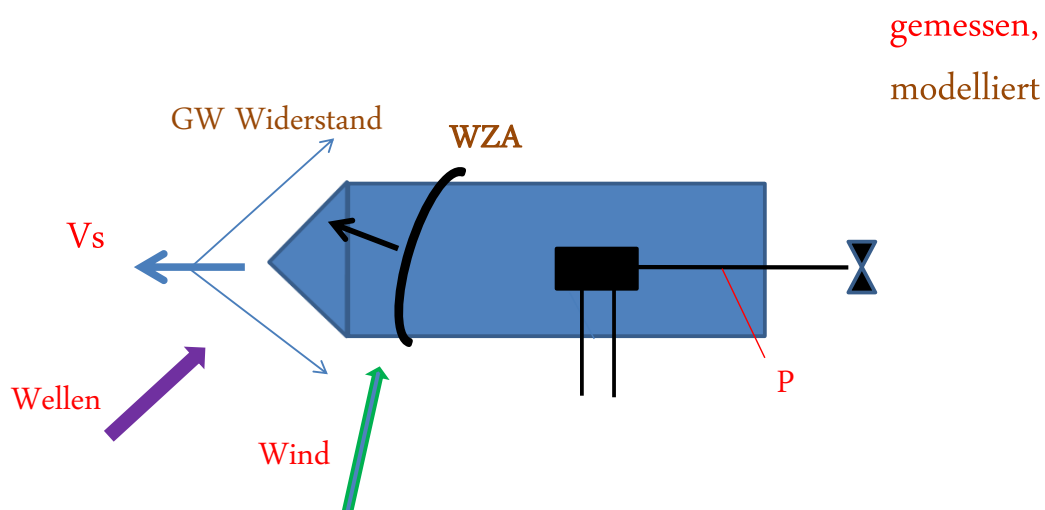


Abbildung 5.6: Informationen für die Evaluation der Programme zur Ermittlung der Leistung des Schiffs unter Berücksichtigung von Wind, Wellen und WZA.

Ziel der Schiffsmessungen ist die experimentelle Überprüfung der Modelle:

- Programm zur Ermittlung von Schiffswiderständen (Glattwasserwiderstand), bzw. die berechnete GWK aus dem „model test report“ (MTR)
- Programm der HSVA zur Ermittlung des Wellenwiderstands
- Programm zur Berechnung des Windwiderstandes
- Leistungen von Segelantrieben können im Rahmen der Schiffsmessungen nicht gemessen werden (andere finanzielle Größenordnung)

Ferner ergibt sich durch die Messung von Wind und Wellen auf den verschiedenen Weltmeeren die Möglichkeit, die Wettervorhersagen zu evaluieren.

#### 5.2.7.2 Durchführung:

Eingesetzte Technik (Details: siehe TP3):

- Für die Wellenmessungen: Wamos der Firma Oceanwaves,
- Windmessung: Ultraschallmessgeräte der Firma Metek,
- Leistungsmessung auf der Welle: Torsionsmessgerät der Firma Hoppe,
- Durchflussmessungen: Massendurchflussmessgeräte der Firma Hoppe,
- Schiffsbewegungen (Rollen und Stampfen): HOSIM der Firma Hoppe.

Vom Schiff übernommene Daten:

- GPS-Daten (Zeit, Ort, Kurs und Fahrt ü. Gr.),
- Kurs durchs Wasser (Kompasskurs und Fahrt durchs Wasser / Logge).

Die Verknüpfung der Messgrößen auf der BBC Hudson ist in Abbildung 5.7: Schematische Darstellung (elektrische Verknüpfung) der installierten Messtechnik (Abbildung 5.7) dargestellt.

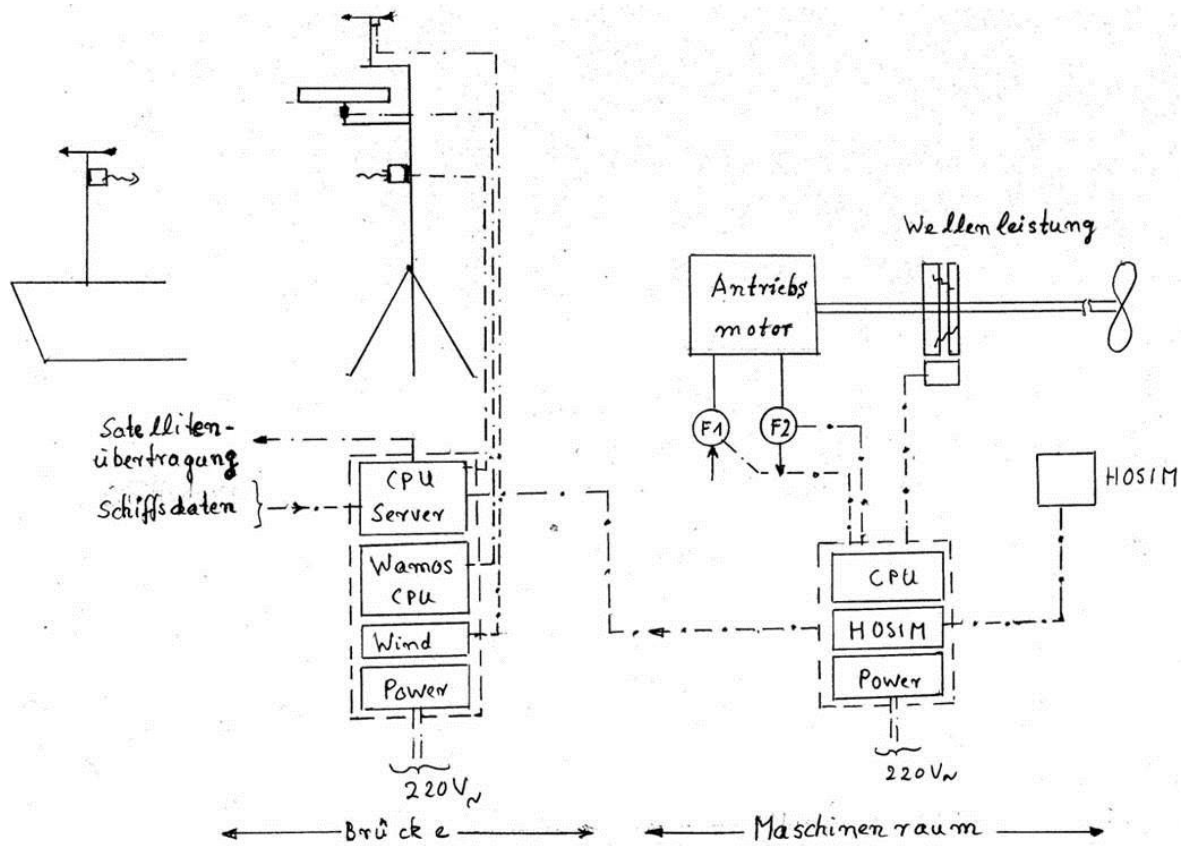


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung (elektrische Verknüpfung) der installierten Messtechnik.

### Organisatorisches:

Zur Betreuung der Messtechnik wurde entweder ein zusätzlicher Offizier (3. Offizier) oder ein Praktikant eingesetzt. Beide waren aber auch für die „normale“ Schiffsarbeit eingesetzt.

### Datenhandling:

#### Übertragung:

Schiff – Satellit – HS E/L - (Anwi-server + Hoppe):

- alle 10 min einen Datensatz mit 64 Messwerten,
- 1x/d über Satellit an den HS Server (Notes)
- derzeit etwa 100 000 Datensätze über 2 Jahre

#### Datenselektion / Szenarienbildung:

- Datenaufnahme und Ablage in einer SQL Datenbank
- Szenarienbildung über ein Java Programm



## 5.2.8 Anpassung der Modelle an die Messergebnisse auf der BBC Hudson

### 5.2.8.1 Zielsetzung

Zur Anpassung der Modellfunktion

$$P_D = P_D(\text{GWK}) + P_D(\text{Wellen}) + P_D(\text{Wind})$$

an die Messungen werden folgende Parameter variiert:

#### a) für die GWK

$$P_D(\text{GW}) = c (0,019 * T + 0,260) V_s^{3,5} \quad \text{der Parameter } c.$$

Der Vergleich mit den Messwerten (für das erste Jahr) führt zu  $c = 1,05$ . Dieser Wert kann durch den Bewuchs mit der Zeit zunehmen.

Das Ergebnis ist in Abbildung 5.8 dargestellt, und zwar für Full Load ( $T = 8.3 \text{ m}$ ) und für Ballast ( $T = 4.3 \text{ m}$ ). Ferner zeigt die Abbildung 5.8 die mit PARAMARIN berechnete GWK. Die Messwerte liegen i.d.R. oberhalb der Leistungskurve  $P_D(\text{GW})$ , was durch den zusätzlichen Leistungsbedarf durch den Einfluss von Wind und Wellen zu erklären ist. Alle Messwerte sind Mittelwerte von Szenarien. Innerhalb der Szenarien sollten die Werte weitgehend konstant sein.

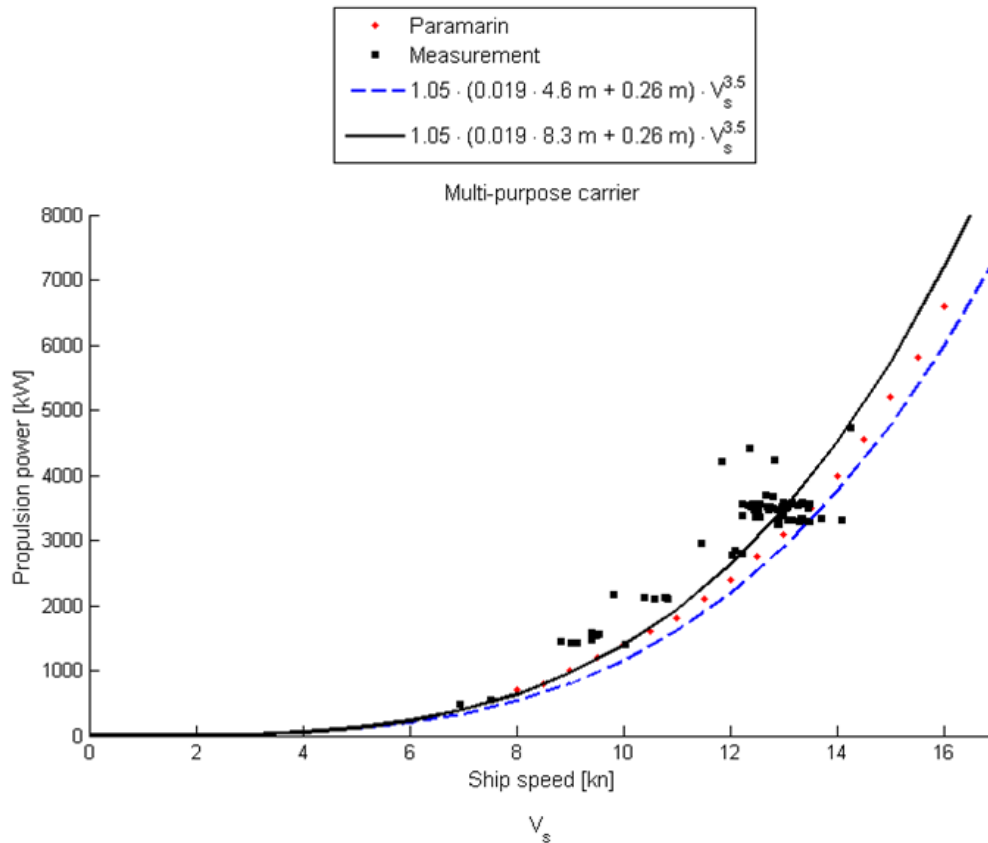


Abbildung 5.8: Aufgebrachte Leistung des Schiffes (auf der Welle) als Funktion der Schiffsgeschwindigkeit; Modellkurven auf Basis der MTR (bei verschiedenen Tiefgängen) und auf der Basis des Schiffskörpers berechnet (PARAMARIN); die Messungen (Mittelwerte von Szenarien) liegen i.d.R. oberhalb der GWK auf Grund der Wind- und Welleneinflüsse.

#### b) für den Einfluss des Windes auf das Schiff

Hier wird in der Formel von Blendermann der Wert für  $CD_{LAF}$  variiert. Der angesetzte Wert 0,9 ist nahe an den von BLENDERMANN vorgeschlagenen Werten (0,6 - 0,9).

#### c) Einfluss der Wellen

In dem HSVA Programm zur Berechnung des Einflusses von Wellen auf den Energiebedarf des Schiffes sind für verschiedene Formfamilien charakteristische Werte in einer Datenbank (SBRIN) abgelegt. Die Zuordnung der in der SBRIN Datenbank gespeicherten Werte zu dem speziellen Schiff erfolgt über Schiffsdaten und Daten über die Wellen ( $\Gamma_p$  und  $H_s$ ). In der Programmvariante von 1992 hat die HSVA eine Anpassung in der Bewertung von  $\Gamma_p$  vorgenommen. Diese Anpassung wurde übernommen, und es wurden keine weiteren Anpassungen von Parametern vorgenommen.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.8- 5.11 dargestellt.

#### 5.2.8.2 Probleme der Anpassung, bzw. der Genauigkeit:

##### a) konstante Bedingungen

Um die Wirkung einzelner Einflussgrößen zu betrachten, z.B. die Wirkung der Wellenhöhe, sollten bei der Evaluation der Programme die anderen Einflussgrößen konstant bleiben (z.B. der Wind, die Schiffsgeschwindigkeit, ...). Die ist nicht realistisch, es verändern sich ständig während der Messungen verschiedene Einflussgrößen, so dass nur das Gesamtmodell evaluiert werden kann. Für die Auswertung werden Szenarien herausgefiltert, für die in einem Zeitraum ( $\geq 1$ h) möglichst alle relevanten Werte hinreichend konstant sind.

##### b) Genauigkeiten der Messgrößen:

Eine wesentliche Einflussgröße ist die Schiffsgeschwindigkeit (Fahrt durchs Wasser), da sie mit dem Exponenten 3,5 in die Modellierung eingeht. Aber gerade diese Größe ist am ungenauesten zu messen: die Logge liefert keine vertrauenswürdigen Werte. Hier wurde die Geschwindigkeitsmessung über die Wellenmessung (WAMOS) und die GPS Messungen (Fahrt über Grund) mit herangezogen, um die Logge zu „fitten“ (siehe TP3).

##### c) Relevanz der Modelle

Alle verwendeten Programme für die verschiedenen Wirkungen (GW-Widerstand, Wellenwiderstand, Windwiderstand) basieren auf vereinfachten Modellvorstellungen. Komplexere (und aufwendigere) Modelle machen aber für diese Anwendung keinen Sinn:

- die begrenzte Messgenauigkeit erlaubt es nicht, detailliertere Informationen zu gewinnen,
- die Anwendung der Modelle in der Routenoptimierung begrenzt die Komplexität, da sonst die Rechenzeit stark zunehmen würde, was in keinem Verhältnis zu der Güte der anderen Daten (z.B. die Wettervorhersagedaten) stünde.

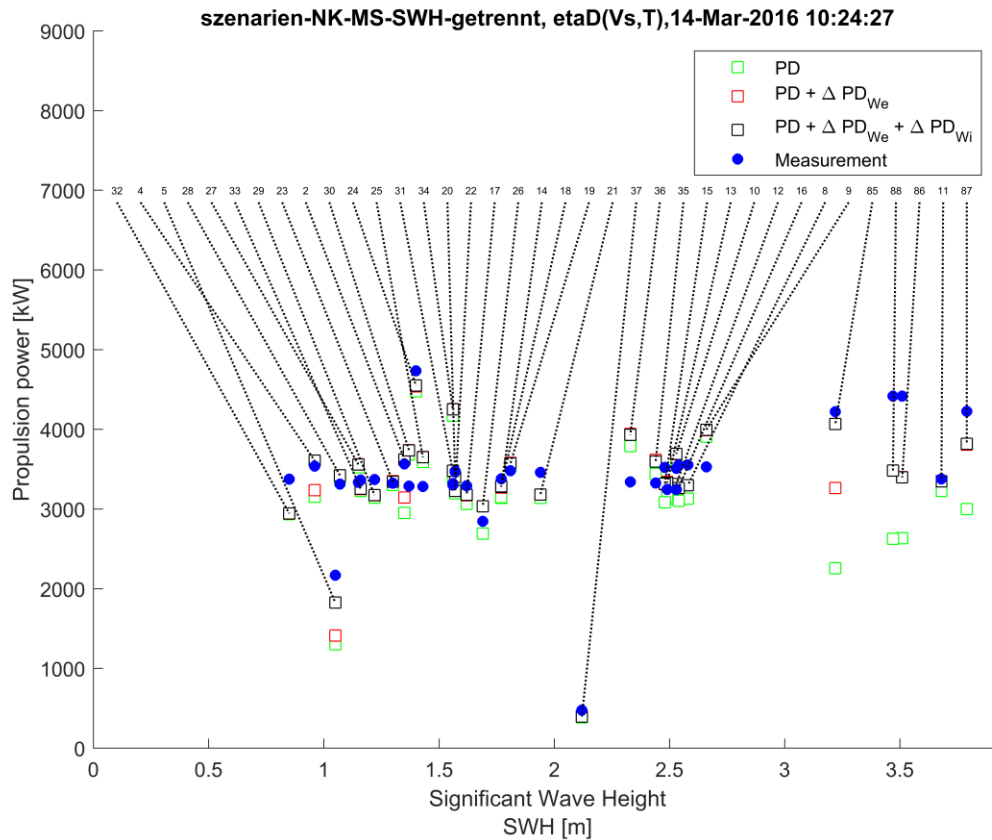


Abbildung 5.9: Vortriebsleistung bei verschiedenen Wellenhöhen. Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem Messwerten (blau) nach dem Fit: PD (grün) nur der GW-Wert,  $(PD + \Delta PD_{We})$  (rot) gibt den berechneten Wert für den GW-Wert und den Beitrag durch Wellen,  $(PD + \Delta PD_{We} + \Delta PD_{Wi})$  (schwarz) gibt den berechneten Wert bei Berücksichtigung der Beiträge durch den GW –Wert und den Beitrag von Wind und Wellen. Die Nummern in der Darstellung kennzeichnen die Szenarien, aus denen die dargestellten Ergebnisse stammen.

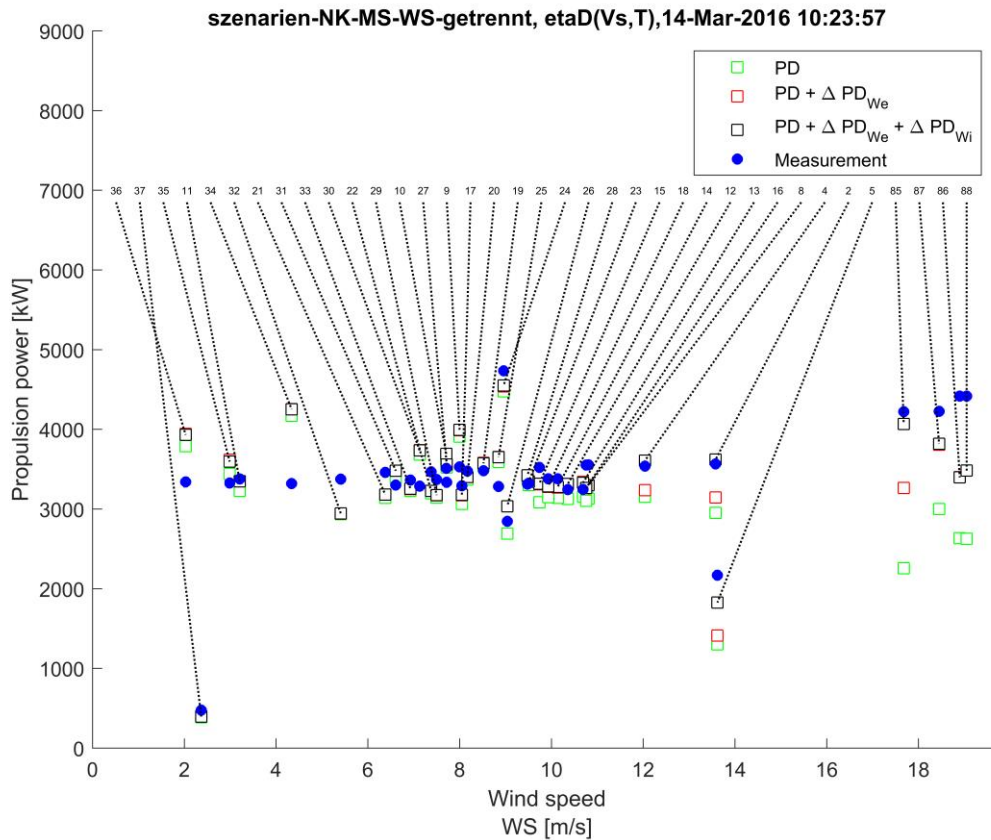


Abbildung 5.10: Vortriebsleistung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem Messwerten (blau) nach dem Fit: PD (grün) nur der GW-Wert,  $(PD + \Delta PD_{We})$  (rot) gibt den berechneten Wert für den GW-Wert und den Beitrag durch Wellen,  $(PD + \Delta PD_{We} + \Delta PD_{Wi})$  (schwarz) gibt den berechneten Wert bei Berücksichtigung der Beiträge durch den GW-Wert und den Beitrag von Wind und Wellen. Die Nummern in der Darstellung kennzeichnen die Szenarien, aus denen die dargestellten Ergebnisse stammen.

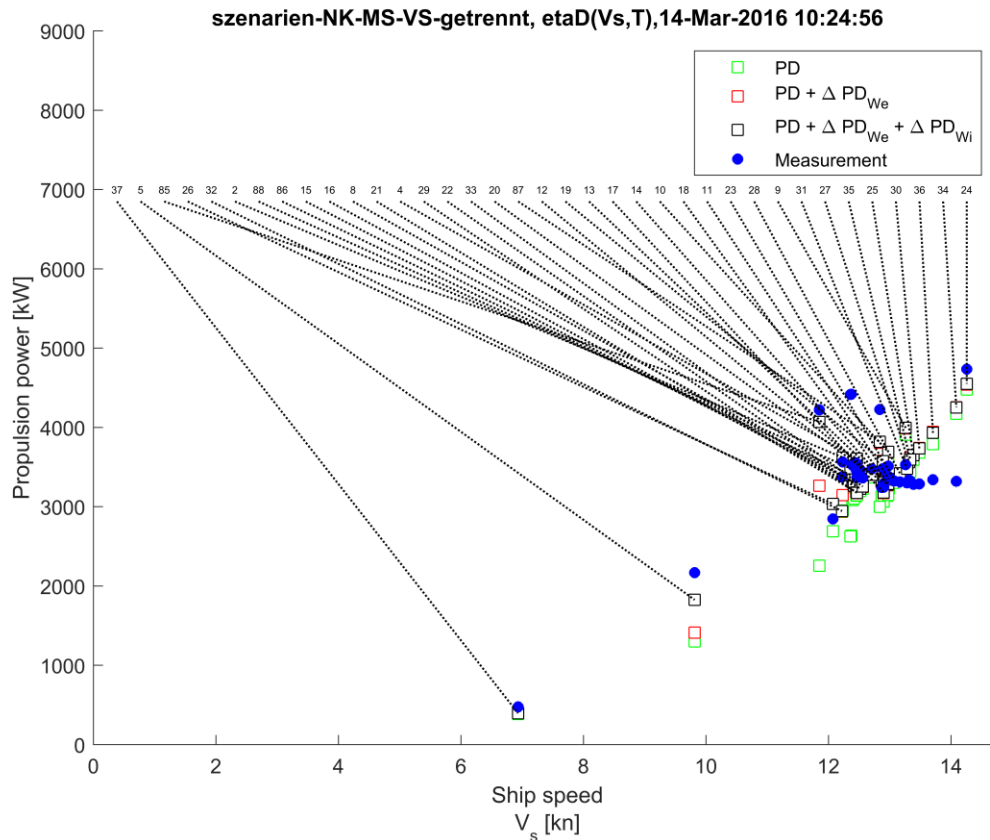


Abbildung 5.11: Vortriebsleistung bei verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten. Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen mit dem Messwerten (blau) nach dem Fit: PD (grün) nur der GW-Wert,  $(PD + \Delta PD_{We})$  (rot) gibt den berechneten Wert für den GW-Wert und den Beitrag durch Wellen,  $(PD + \Delta PD_{We} + \Delta PD_{Wi})$  (schwarz) gibt den berechneten Wert bei Berücksichtigung der Beiträge durch den GW –Wert und den Beitrag von Wind und Wellen. Die Nummern in der Darstellung kennzeichnen die Szenarien, aus denen die dargestellten Ergebnisse stammen.

### 5.2.8.3 Ergebnis

Die Ergebnisse zeigen, dass die Modellrechnungen mit Wetter- und Schiffsdaten die Leistung des Schiffes i.A. gut beschreiben. Die Streuung der Messwerte im Vergleich zu den simulierten Werten mag viele Ursachen haben:

- Änderungen von Randbedingungen, die nicht erfasst wurden,
- Fehler der Logge,
- Begrenzte Genauigkeit der Modelle.

Die Modelle sind im Mittel aber ausreichend genau, um die Einflüsse durch Wind und Wellen auf den Vortrieb des Schiffes mit den Wetterdaten zu erfassen und zu beschreiben.

### **5.2.9 Charakterisierung der betrachteten Schiffe**

In der nachfolgenden Tabelle 5.2 sind die für die Simulation der Schiffsleistung relevanten Parameter für die drei hier betrachteten Schiffstypen zusammengestellt.

Tabelle 5.2: Charakteristische Daten der drei betrachteten Schiffstypen, mit Angaben der Quellen

<b>Schiffsdaten</b>						
		Quelle		Quelle		Quelle
Typ	Bulker		MZF		Tanker	
Kapazität / Größe DWT	37600	MTR 2004.5.28 China Ship Sc. Research Center	17500	MTR CY04-T06-1208 Shanghai Ship and Shipping research Institute	114 000	MTR BS103-480-06050E, by Kordi
Name	BBC Neptune	BBC Document / Marine Traffic	BBC Hudson	BBC Documents , Marine Traffic	crude oil tanker	
Länge ü. a./m	190	MTR Table 2	143	BBC Doc , Marine Traffic	250	
Länge pp /m	183	MTR Table 2	133	MTR Ta. 3.1	240	MTR Tab.1
Breite ü. a.	28,5	MTR Table 2	22,8	MTR Ta. 3.1	44	MTR Tab.1
aktuelle Schiffsgeschwindigkeit/ kn (relevant für die eta)	13,5		13,5		13	
aktueller Tiefgang/ m	10,4		7		14,8	MTR Tab.1
<b>Leistungsdaten</b>						
Verbrauchsfaktor K in kg/h/kW PB	0,221	BBC Marine traffic	0,210 (0,185)	BBC Doc. (Robust exp)		
etaS transmission coefficient	0,985	MTR Ta. 3	0,985	MTR 4.1	0,985	
etaH (mean FL-Ba)	1,15	MTR Ta. 19/20	1,22	MTR 4.3/ Tab. 4 /7	1,2	MTR Tab.13/15
eta0 (mean FL-Ba)	0,62	MTR Ta. 19/20	0,57	MTR 4.3/ Tab. 4 /7	0,572	MTR Tab.13/15
etaR (mean FL-Ba)	0,97	MTR Ta. 19/20	0,99	MTR 4.3/ Tab. 4 /7	1	MTR Tab.13/15
etaD (mean FL-Ba)	0,69	MTR Ta. 19/20	0,69	MTR 4.3/ Tab. 4 /7	0,69	MTR Tab.13/15



<b>Glattwasserperformance</b>						
<b>A1</b>	0,0106	Fit Robust, MTR Tab 23	0,019	Fit Robust MTR Tab. 4/7	0,26	Fit Robust, MTR Tab 13/15
<b>A2</b>	0,4069	Fit Robust, MTR Tab 23	0,26	Fit Robust MTR Tab. 4/7	1,059	Fit Robust, MTR Tab 13/15
<b>c</b>	1,1	Annahme	1,1	Annahme	1,1	Annahme
a1 = c*A1 (MTR)	0,0116	Fit Robust, MTR Tab 23	0,021	Fit Robust MTR Tab. 4/7	0,286	Fit Robust, MTR Tab 13/15
a2 = c*A2(MTR)	0,45	Fit Robust, MTR Tab 23	0,286	Fit Robust MTR Tab. 4/7	1,165	Fit Robust, MTR Tab 13/15
T FL/m	10,4	MTR Table 2	8,3	MTR 2	14,8	MTR Tab.1
T BA/m	5,16	MTR Table 2	4,6	MTR 2	7,3	MTR Tab.1
x	3,5		3,5		3,5-0,053(T-TB)	
<b>Windeinflussgrößen</b>						
rhoair	1,25	Blendermann	1,25		1,25	
delta	0,4	Blendermann	0,4	Blendermann	0,4	Blendermann
Laterale Windangriffsfläche AL/m <sup>2</sup>	1590	RK (Ba thesis)	1690	RK (Ba thesis)	4040	RK (Ba thesis)
Fläche Lufthauptspant AF/m <sup>2</sup>	496	RK(Ba thesis)	530	RK (Ba thesis)	1410	RK (Ba thesis)
CDt	0,7	Blendermann	0,7	Blendermann	0,7	Blendermann
CDIAF	0,9	Blendermann	0,8	Blendermann	0,85	Blendermann
<b>Welleneinflussgrößen</b>						
CBFL block coefficient bei FL	0,84	MTR Table 2	0,784	MTR 3.1	0,834	MTR Tab 12
CBBa block coefficient bei Ba	0,77	MTR Table 2	0,724	MTR 3.1	0,781	MTR Tab 14

### 5.3 Modellierung der Windzusatzantriebe (WZA)

Für die Modellierung des WZA werden folgende Typen verwendet (Abbildung 5.12):

- Der **Kite** wurde im BMBF-Projekt (ELSNER, R. / SCHLAAK, M. ET AL. Januar 2009), ausführlich untersucht und ist auch im Anhang TP0 (MeMoR) beschrieben.
- Der **Flettner-Antrieb**: Für die Modellierung wurden die Ergebnisse eines BMBF Forschungsprojektes benutzt (WAGNER et al. 1985).
- **Segel**: Für das vorliegende Projekt wurde das Dynarigg betrachtet. Es ist erfolgreich auf dem Maltese Falcon realisiert und es ist eine benutzbare Datenbasis verfügbar (WAGNER 1967).



Abbildung 5.12: Die betrachteten Windzusatzantriebe: ein Kite (links oben, <http://www.skysails.info/deutsch/skysails-marine/>), ein Flettner-Antrieb (links unten, <http://www.marinetraffic.com/en/photos/of/ships/shipid:151866/#forward>), ein starres Segel (ähnlich Dynarigg, rechts oben [http://de.wikipedia.org/wiki/Shin\\_Aitoku\\_Maru](http://de.wikipedia.org/wiki/Shin_Aitoku_Maru)), und das Dynarigg (rechts unten, <http://www.decaboyachtpainting.com/?project=maltese-falcon&lang=de>)

Für die Kraft durch den WZA kann allgemein angesetzt werden:

$$F_{WZA} = A * F(C_w, C_a, AWA)$$

Wobei bedeuten:

A: die „Größe“ des WZA

F(...): die Eigenschaft des WZA, beschrieben durch das Polardiagramm mit

- $C_w$ ,  $C_a$  den Widerstands- und Auftriebsbeiwerten und
- AWA (Apparent Wind Angle): Winkel des scheinbaren Winds zur Fahrtrichtung des Schiffs.

### Polardiagramme

Die Details der Berechnung finden sich im TP2. Das Ergebnis ist in der Abbildung 5.13 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

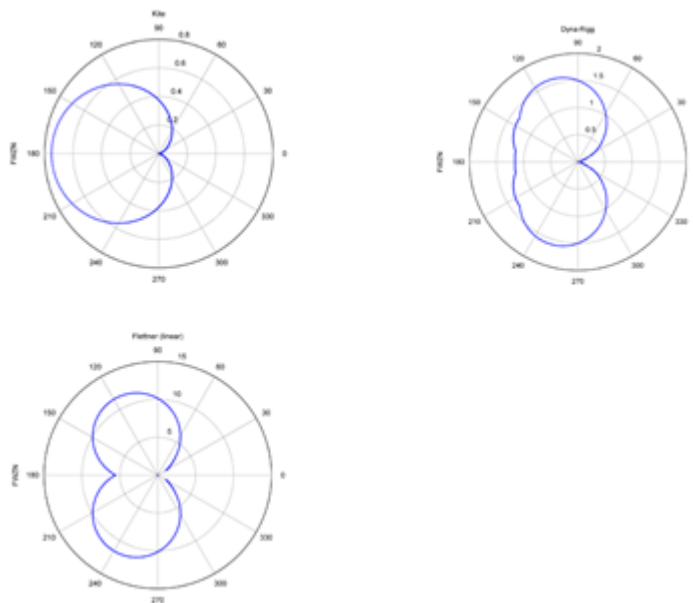


Abbildung 5.13: Die Polardiagramme der WZA: Kite, Dynarigg und Flettner-Rotor

### Dimensionierung der WZA

Die Dimensionierung basiert auf folgenden Kriterien:

- ähnliche Kraft bei seitlichem Wind ( $AWA=90^\circ$ ),
- praxisnah, d.h. nach der Dimensionierung des E-Ship1 (Flettner-Rotoren) und ähnlich der Dimensionierung des Dynariggs auf dem Maltese Falcon.

### **Ergebnis:**

- Kite:  $800 \text{ m}^2$
- Dynarigg: 3 Masten zu je  $800 \text{ m}^2$
- Flettner: 4 Rohre je  $25 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  (E-Ship1)

Die Beeinträchtigung untereinander, der drei Masten mit dem Dynarigg bzw. der vier Flettner-Rotoren wurde vernachlässigt.

## 5.4 Routenoptimierung

Eine Routenoptimierung für Schiffe ist im Prinzip nichts Neues. Es gibt eine Vielzahl von Anbietern, die ein „weather-routing“ für Schiffe anbieten (AWT, SkySails, DWD,...). In der Vergangenheit diente die Routenberatung dazu, Bereiche schweren Wetters zu vermeiden/zu umfahren. Heute erfolgt eine Routenberatung auch mit dem Ziel eine kostengünstige Fahrweise vorzuschlagen.

Anders ist die Zielsetzung der Routenoptimierung für Segelyachten auf Hochseeregatten. Hier soll der Wind optimal genutzt werden, um möglichst schnell zum Ziel zu kommen.

Beide Ziele decken sich nicht mit dem Projektziel von ROBUST. Hier soll eine optimale Route gefunden werden, wenn der klassische Schiffsantrieb (Motorantrieb) durch einen Windzusatzantrieb (WZA) teilweise ersetzt wird, um Treibstoff einzusparen, allerdings unter Berücksichtigung von logistisch gegebenen Randbedingungen (Ankunft der Transportgüter in einem vorgegebenen/ geplanten Zeitfenster). Hierfür gibt es kein fertiges Programm, dieses wird im Rahmen des Projektes entwickelt.

### 5.4.1 Auswahl der Methode und Vorgehensweise

Verschiedene Methoden der Routenoptimierung sind im TP1 (MeMoR) aufgeführt. Für die Programmierung wurden folgende Methoden und Programme noch einmal diskutiert und bewertet:

- Isochronenmethode,
- Branch-and-Bound,
- evolutionäre Methoden,
- multiple Agenten Systeme,
- neuronale Netze,
- Erfahrungsoptimierung.

Für das Projekt wird die Branch-and-Bound-Methode ausgewählt.

### 5.4.2 Das Routenoptimierungsprogramm

#### 5.4.2.1 Die Branch-and-Bound-Methode

Branch-and-bound (BnB) bezieht sich auf eine Gruppe von Optimierungsalgorithmen, in denen der mögliche Lösungsraum als Baum modelliert wird (Abbildung 5.14). Die Wurzel eines Baumes stellt dabei den Anfangszustand und die Blätter die möglichen Zielzustände dar. Ziel

des BnB-Algorithmus ist es, einen möglichst optimalen Pfad von der Wurzel zu einem der Blätter zu finden, welche jeweils eine mögliche Lösung darstellt. Die „Kosten“ (Zielgröße) eines Pfades entstehen dabei durch die Summe der Kantengewichte (Summe der „Kosten“ zwischen den Wegpunkten).

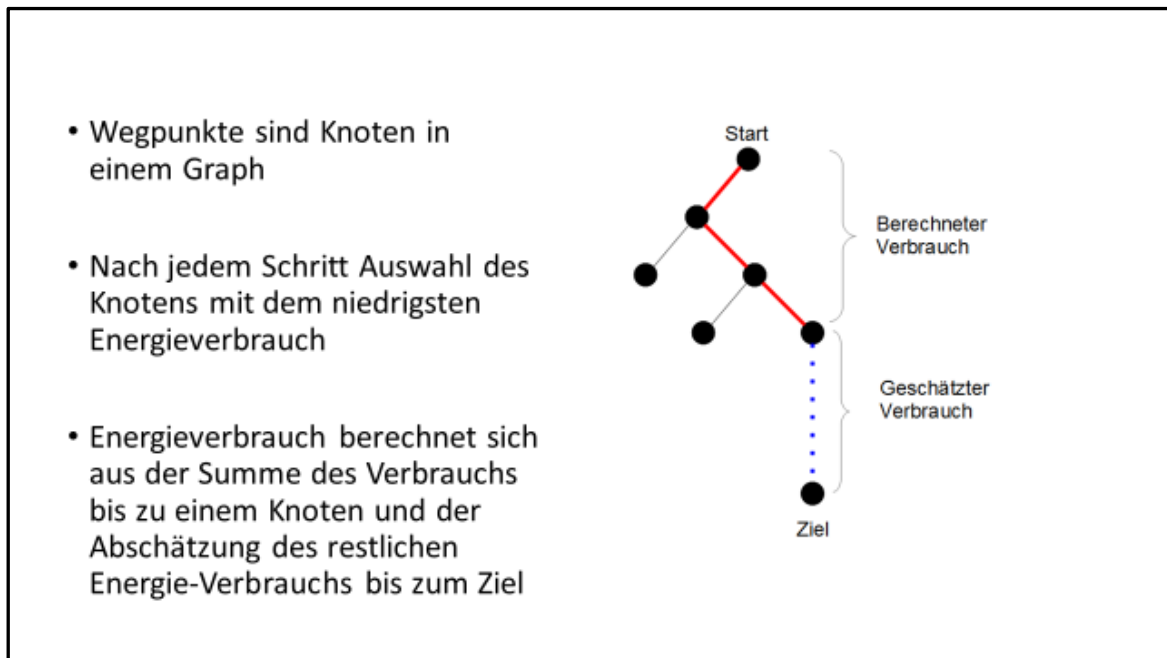


Abbildung 5.14: Schematische Darstellung einer Routenoptimierung nach der Branch-Methode

Im Zusammenhang mit der Routenoptimierung von Schiffen beschreibt der Baum mögliche Pfade vom Hafen, von dem das Schiff aus startet, zum Zielhafen. Die mit den Kanten assoziierten Gewichte beziehen sich auf den Energieverbrauch des Schiffes. Durch  $V_s = \text{konst}$  und eine feste Fahrtzeit pro Kante ist jede Kante des Baumes gleich lang, mit Ausnahme der letzten Kante zum Ziel. Zu beachten ist, dass Knoten neben der räumlichen Dimension noch die zeitliche Dimension besitzen, da das Wetter sich mit der Zeit ändert. Bei der Suche nach einem möglichst energieeffizienten Pfad von der Wurzel bis zum Ziel arbeitet der Algorithmus iterativ in zwei Schritten:

- Branch

Die BnB Methode untersucht den Verbrauch von einem Knoten des Baumes zu den unmittelbaren Nachfolgern und bestimmt den Verbrauch zu den Nachfolgern aus der Summe des Verbrauchs bis zum letzten Knoten und dem Verbrauch vom letzten bis zum nächsten Knoten. Da der Algorithmus den Baum in diesem Schritt vergrößert, spricht man auch vom Expandieren des Baumes.

- Bound

Die BnB Methode verwirft einen Knoten und den gesamten darauffolgenden Teil-Baum, wenn der Verbrauch bis zu dem Knoten bereits höher ist als der Verbrauch für einen anderen bekannten Pfad. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Pfad sehr weit von der direkten

möglichen Route (Großkreis) abweicht und dieser Pfad aufgrund der längeren Strecke sogar mit sehr günstig geschätzten Wetterbedingungen zu einem höheren Energieverbrauch als die direkte Route führen würde. Um diesen Vergleich durchführen zu können, werden für alle Pfade untere Schranken (lower bounds) und obere Schranken (upper bound) für den Energieverbrauch berechnet.

Allgemein gesagt könnten also theoretisch auch alle möglichen Pfade des Baumes wie in einer Breitensuche (breadth-first-search) durchsucht werden. Da dies aber zu aufwändig ist, verwirft der BnB-Algorithmus frühzeitig Pfade, wenn bereits eine bessere Lösung gefunden wurde.

- A\* Algorithmus

Der A\* (A-Stern)-Algorithmus ist eine spezielle Variante des BnB. Die Besonderheiten liegen darin, wie in jedem Schritt der nächste für die Verzweigung zu betrachtende Knoten ausgewählt wird und wie die „Kosten“ (hier der Energiebedarf) von einem Knoten bis zum Zielhafen geschätzt werden. Der A\*-Algorithmus untersucht in jedem Schritt den Knoten mit dem geringsten zu erwartenden Energieverbrauch vom Start der Route bis zu dem Knoten und von diesem Knoten bis zum Zielhafen. Für die Abschätzung des Energieverbrauchs vom aktuellen Knoten bis zum Zielhafen schätzt eine Heuristik den Energieverbrauch (Heuristik: mit begrenztem Wissen zu einer wahrscheinlichen / pragmatischen Lösung kommen).

Damit der A\*-Algorithmus die optimale Route evaluieren kann, darf die Heuristik den Verbrauch nur unter-, aber nicht überschätzen. Je mehr die Heuristik den Energieverbrauch aber unterschätzt, umso größer wird der zu betrachtende Lösungsraum, was wiederum zu einer längeren Laufzeit des Algorithmus führt. Die Heuristik sollte den zu erwartenden Energieverbrauch von einem Knoten bis zum Ziel also möglichst genau abschätzen.

Die Vorteile des A\*-Algorithmus liegen darin, dass er ein Optimum findet (d.h. der Energieverbrauch ist minimal), komplett ist (d.h. wenn es eine mögliche Route gibt, wird sie gefunden) und in der Regel wesentlich effizienter als einfache Verfahren (z.B. Breitensuche) ist, da er den zu betrachtenden Lösungsraum durch die Verwendung einer Heuristik einschränkt. Der A\*-Algorithmus führte gegenüber der naiven BnB-Implementierung zu einer deutlichen Verringerung der Laufzeit des Algorithmus. Abbildung 5.15 zeigt den Algorithmus während des Programmablaufes. Die schwarzen Felder kennzeichnen Positionen, die für die weitere Routenoptimierung nicht weiter berücksichtigt werden. Die weißen Felder (Blätter) sind mögliche Kandidaten, um den Baum weiter zu expandieren. Abhängig von der Methode, wie die Restenergie vom aktuellen Knoten bis zum Ziel geschätzt wird, und der Anzahl der Verzweigungen dauert eine Routenoptimierung einige Minuten bis zu Stunden. Details sind in TP2 dargestellt. Das Ergebnis der Routenoptimierung (Abbildung 5.16) ist eine Liste mit Wegpunkten (gelb), die eine alternative Route zum Großkreis (rot) darstellen). Die Abweichung der optimierten Route vom Großkreis hängt vom Einsparpotential des WZA, von dem Freiheitsgrad (der erlaubten Verlängerung der Fahrtzeit) und vom Wetter ab.

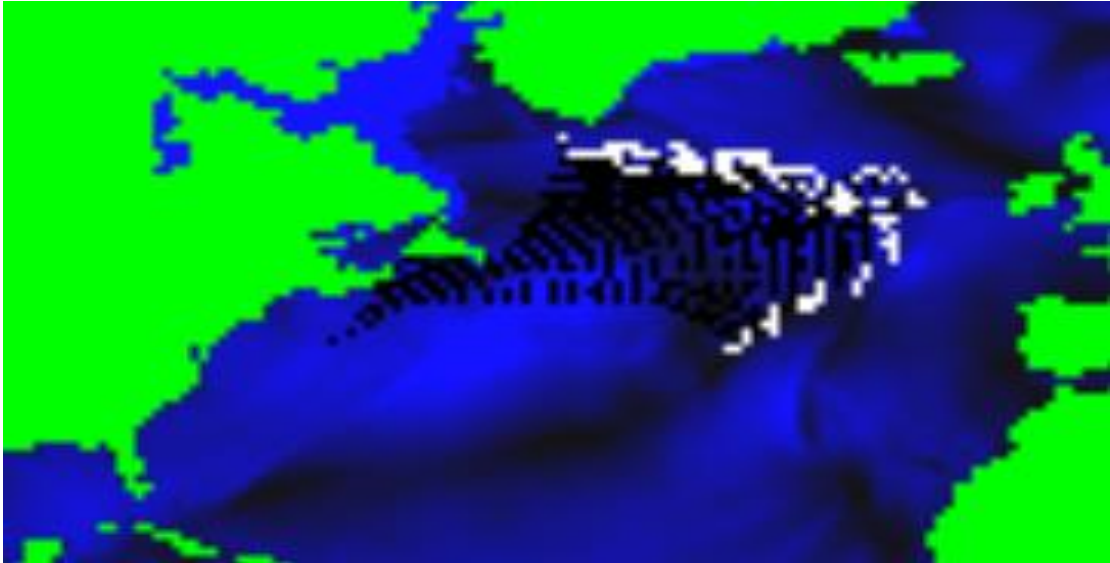


Abbildung 5.15: Laufender A\*-Algorithmus für die Routenoptimierung.

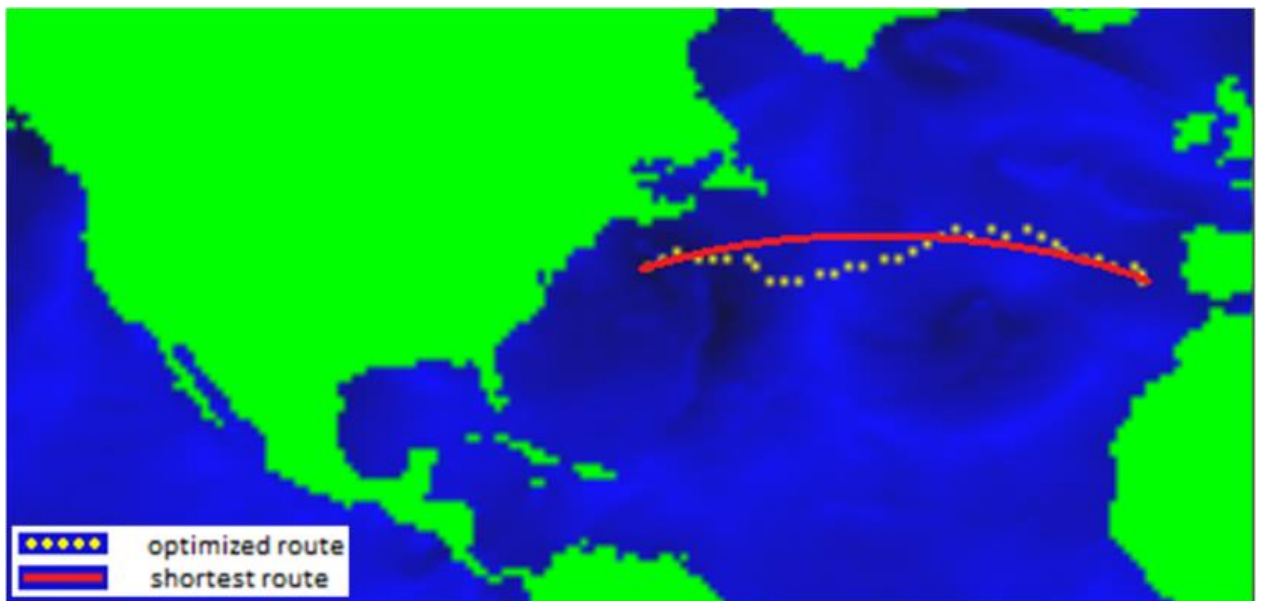


Abbildung 5.16: Ergebnis der A\* Routenoptimierung: rot = Großkreis, gelbe Punkte die Wegpunkte der optimierten Route.

### 5.4.3 Einsparpotenzial und Routenplanung

Das Routenoptimierungsprogramm kann für zwei verschiedene Ziele verwendet werden.

- a) Berechnung des Energieeinsparpotenzials durch WZA

Für die Berechnung des Energie-Einsparpotenzials durch den WZA und durch die Anwendung der Routenoptimierung werden historische Analysenwerte der Wetterdaten verwendet

(z.B. von 2008). Hierbei stehen bei der Berechnung der Energie in der Routenoptimierung bei allen Knoten immer die „richtigen“ Wetterdaten zur Verfügung.

#### b) Routenplanung

Beim Start der Fahrt stehen die Wetterdaten der Vorhersage zur Verfügung, maximal für 7 Tage. Für die Heuristik (Abschätzung der Restenergien in der Routenoptimierung) können verschiedene Methoden verwendet werden (TP2), z.B. wird für den Zeitraum  $> 7$  Tage als Energiewert zwischen zwei Knoten immer der Mittelwert von vorherigen Routenabschnitten eingesetzt.

## 5.5 Einsparpotenzial und Reisezeit auf verschiedenen Routen

### 5.5.1 Berechnungen

Mit Hilfe des Routenoptimierungsprogramms wurde das Einsparpotenzial der betrachteten Schiffe (MZF, Bulker, Tanker) mit den ausgesuchten WZA (Flettner, Dynarigg, Kite) auf den definierten Routen berechnet. Beispielhaft wird nachfolgend der Energieverbrauch für einen MZF (Bsp. BBC Hudson) auf der Route Baltimore(USA) – Wilhelmshaven(D) berechnet. Dabei wurden die historischen Wetterdaten der Jahre 2005 - 2009 verwendet, und zwar die „Analysenwerte, d.h. die tatsächlichen berechneten Wetterdaten auf den Routenabschnitten. Damit ergibt sich das „tatsächliche“ Einsparpotenzial. Für eine aktuelle Routenplanung müssten die Vorhersagewerte genommen werden.

#### Daten:

- Route: Baltimore – Wilhelmshaven in beiden Richtungen, je 1 x pro Woche
- Schiff: BBC Hudson, L= 143 m, DW= 17 Tt
- Schiffsgeschwindigkeit:  $V_s = 10 \text{ kn} - 15 \text{ kn}$
- WZA:
  - Flettnerantrieb mit 4 Rotoren, je 25m hoch und  $D = 4 \text{ m}$
  - Dynarigg:  $3 \times 800 \text{ m}^2$
  - Kite:  $800 \text{ m}^2$ .
  - Wetterdaten: Analysendaten 2008

### 5.5.2 Ergebnisse:

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.17 bis 5.22 dargestellt. Es ist die notwendige Maschinenleistung (als Leistung auf der Welle  $P_D$  berechnet) für die jeweilige Route bei verschie-



denen Bedingungen dargestellt. Die Mittelwerte sind als senkrechte Linien dargestellt, und zwar:

- für Fahrten auf dem Großkreis GK ohne Berücksichtigung von Wind und Wellen und WZA (clear water),
- für Fahrten auf dem GK mit Berücksichtigung von Wind und Wellen,
- für Fahrten auf dem GK mit Berücksichtigung von Wind und Wellen und mit Einsatz eines Flettner-WZA,
- für Fahrten mit RO unter Berücksichtigung von Wind und Wellen und
- für Fahrten mit RO unter Berücksichtigung von Wind, Wellen und einem Flettner-WZA, letzteres auch als statistische Verteilung.

Zunächst ist für die Route von Baltimore nach WHV die Abhängigkeit der benötigten Maschinenleistung von der Schiffsgeschwindigkeit und zwar mit und ohne Verwendung eines Flettner-Rotors dargestellt (Abbildung 5.17 bis Abbildung 5.19). Bei der niedrigen Reisege-  
schwindigkeit von 10 kn wird deutlich weniger Motorleistung benötigt als bei höheren Ge-  
schwindigkeiten. Das hat zwei Gründe: erstens ist der Schiffswiderstand bei kleinen Ge-  
schwindigkeiten kleiner, zweitens kann mehr Wind durch den WZA genutzt werden.

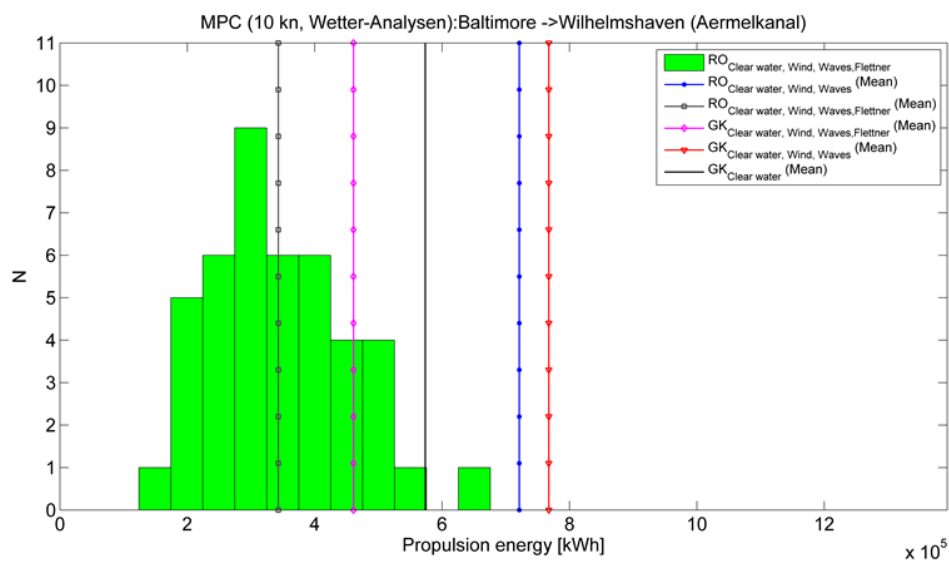


Abbildung 5.17: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von  $V_s = 10$  kn und verschiedenen Randbedingungen; Flettner als WZA.

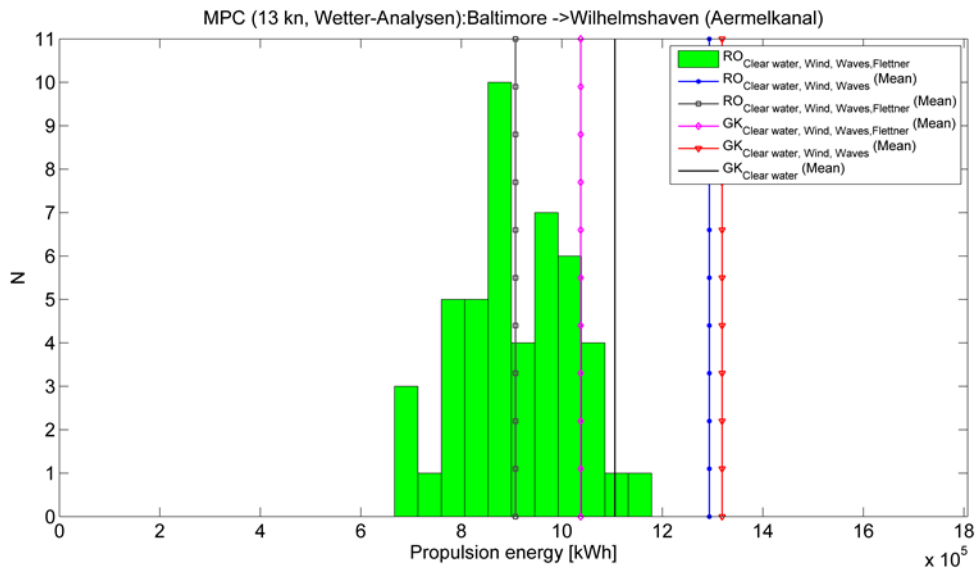


Abbildung 5.18: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von  $V_s = 13$  kn und verschiedenen Randbedingungen; Flettner WZA.

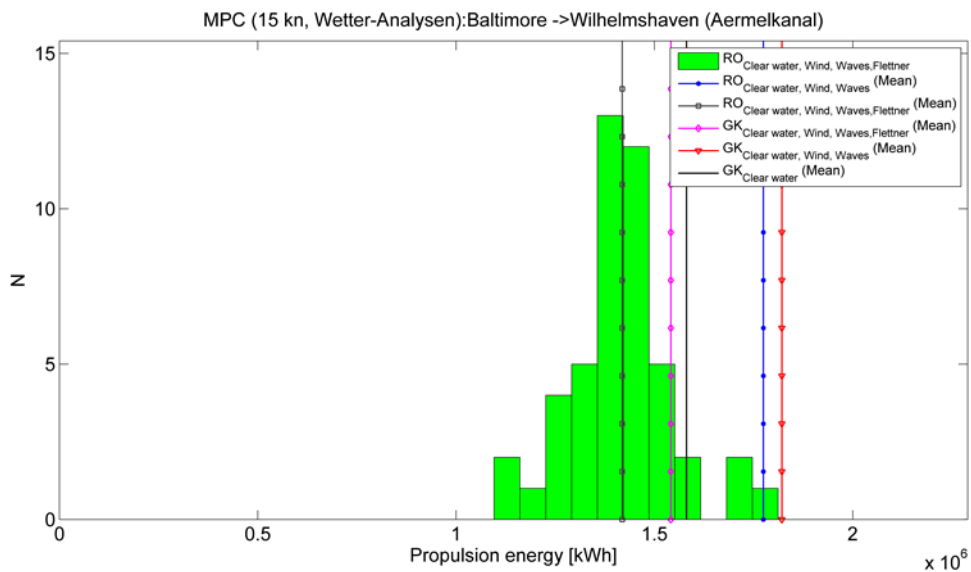


Abbildung 5.19: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von  $V_s = 15$  kn und verschiedenen Randbedingungen; Flettner als WZA.

Im Vergleich der Abbildung 5.18 und der Abbildung 5.20 ist der Unterschied des Energiebedarfs bei 13 kn für die beiden Richtungen  $Ba > WHV$  und  $WHV > Ba$  dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Hauptwindrichtung von West nach Ost auf dem Nordatlantik vorherrscht. In dieser Richtung wird weniger Zusatzenergie benötigt als auf der Fahrt von Ost nach West.

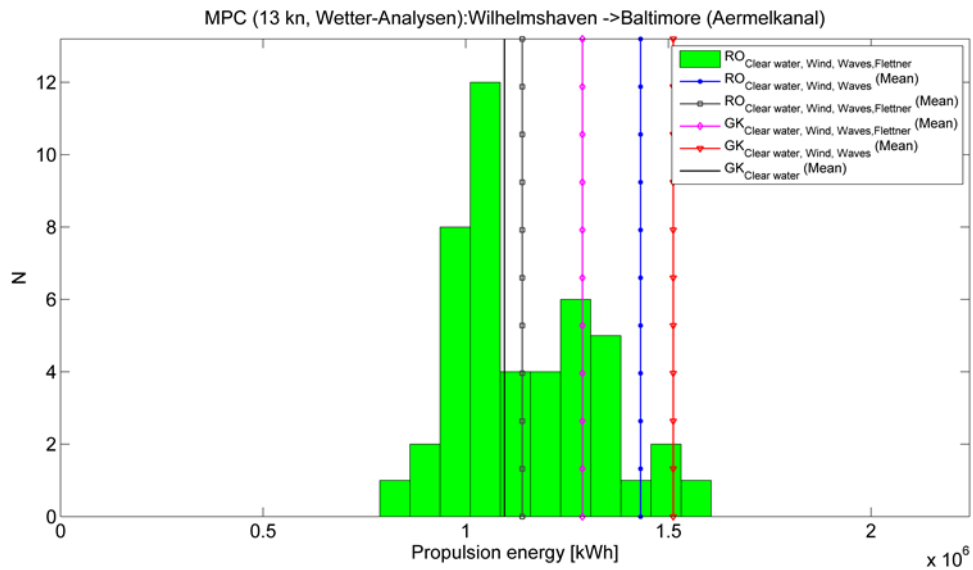


Abbildung 5.20: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von WHV nach Baltimore bei einer Schiffsgeschwindigkeit von  $V_s = 13\text{kn}$  und verschiedenen Randbedingungen; Flettner als WZA.

In Abbildung 5.18, Abbildung 5.21 und Abbildung 5.22 werden die drei WZA bei  $V = 13\text{kn}$  auf der Route Ba>WHV verglichen. Auf dieser Route ist der Unterschied zwischen den 3 WZA gering.

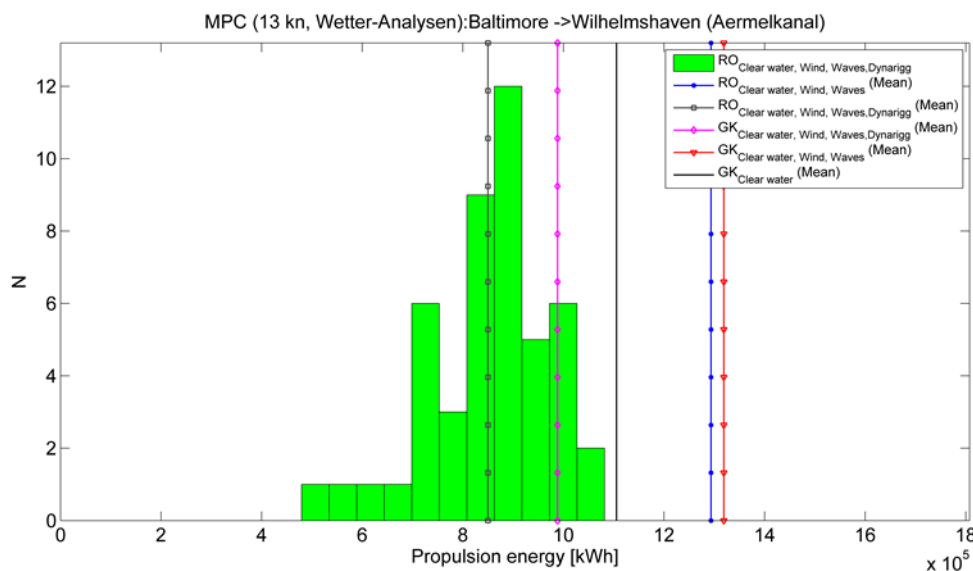


Abbildung 5.21: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von  $V_s = 13\text{kn}$ ; Dynarigg als WZA.

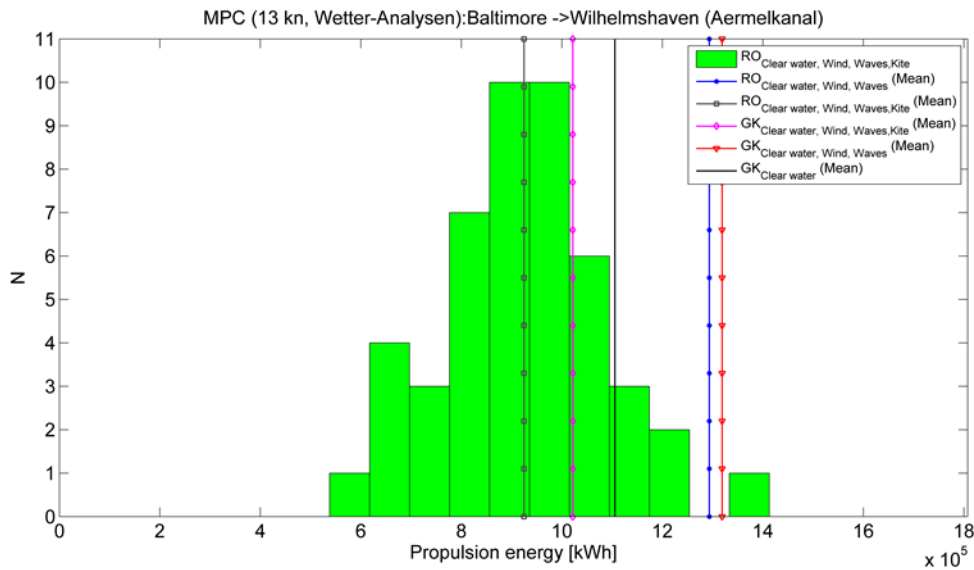


Abbildung 5.22: Die maschinell aufzubringende Energie eines MZF auf der Route von Baltimore nach WHV bei einer Schiffsgeschwindigkeit von  $V_s = 13$  kn; Kite als WZA.

### 5.5.3 Auswertungen

#### a) „Sea-margin“

Der zusätzliche Energiebedarf zur Überwindung von Wind und Wellen auf den betrachteten Routen ist in Tabelle 5.3 dargestellt. Durch die Routenoptimierung kann der „sea margin“ auf den windstarken Routen deutlich verringert werden.

Tabelle 5.3: sea margin auf den drei Routen mit und ohne RO, MZF, 13 kn, Mittelwerte für ein Jahr (2008) mit 1 Fahrt / Woche; WHV = Wilhelmshaven, GK = Großkreis, RO = Routenoptimierung

	Sea margin auf GK [%]	Sea margin mit RO [%]	Einsparung durch RO [%]
Baltimore>WHV	21	17	4
WHV>Baltimore	39	31	8
Nuevo Palmira>Emden	20	18	2
Emden>Nuevo Palmira	13	12	1
Bergen>WHV	15	13	2
WHV>Bergen	16	14	2

#### b) Energieeinsparung durch die WZA

In Tabelle 5.4 werden die Einsparpotenziale (in % der Energie ohne WZA) durch die 3 WZA auf der windstarken Route Baltimore - Wilhelmshaven vorgestellt. Für die Richtung von West nach Ost bringen die 3 WZA ähnliche Einsparungen. Für die Richtung von Ost nach West

(entgegen die Hauptwindrichtung) bringt das Dynarigg die besten Werte. Das entspricht der Eigenschaft des Dynarigg „am Wind Kurse“ besser nutzen zu können als die anderen betrachteten WZA (siehe Polardiagramme in Abbildung 5.13).

c) Routenabhängigkeit des Einsparpotenzials

In Tabelle 5.5 ist das Einsparpotenzial eines MZF mit einem Flettner Rotor auf den drei betrachteten Routen dargestellt. Die Nordatlantikroute hat auf Grund der Wetterverhältnisse das größte Einsparpotenzial. Die Routenoptimierung bringt gegenüber der direkten Route auf dem GK noch einmal ca. 10%, so dass sich insgesamt ein Einsparpotenzial auf dieser Route von ca. 25 – 35% ergibt. Auf der Route Europa – Südamerika herrschen stabilere Wetterverhältnisse (im Vergleich zum Nordatlantik), auch mit im Mittel geringeren Windstärken, so dass hier das Einsparpotenzial durch einen WZA nur etwa 13-15% beträgt, kaum richtungsabhängig. Auf der Nordseeroute WHV-Bergen beträgt das Einsparpotenzial ca. 20%, nahezu richtungsunabhängig, da die Route senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung verläuft.

Tabelle 5.4: Einsparung an Vortriebsleistung durch die verschiedenen WZA in % (Flettner, Dynarigg, Kite) auf der Route BA-WHV,  $V_s=13\text{kn}$ , jeweils für einen Kurs auf dem GK oder mit RO.

	Flettner Rotor	Dynarigg	Kite
BA>WHV; GK	21	25	23
BA>WHV; RO	31	35	29
WHV>BA; GK	14	21	10
WHV>BA; RO	24	33	19

Tabelle 5.5: Einsparpotenzial durch den Flettner Rotor auf den 3 Routen (in % zur Route mit Wind und Wellen ohne WZA) für einen MZF,  $V_s=13\text{kn}$ ., jeweils bei einer Route auf dem GK oder mit RO.

	Flettner /GK	Flettner/ RO
Baltimore>WHV(Pentland)	24	35
WHV>Baltimore (Pentland)	15	27
Nuevo Palmira>Emden	7	13
Emden>Nuevo Palmira	11	15
Bergen>WHV	15	20
WHV>Bergen	16	19

## d) Reisezeiten

Abbildung 5.23 zeigt die Fahrtzeitverteilung beim Einsatz eines Flettner WZA auf der Route Ba>WHV und Routenoptimierung. Im Mittel ergibt sich eine Fahrtzeitverlängerung um ca. 5h, eine maximale Verlängerung von 17h, also < 1 Tag. In umgekehrter Richtung sind die Werte geringfügig höher: 6h / 22h, also auch < 1Tag.

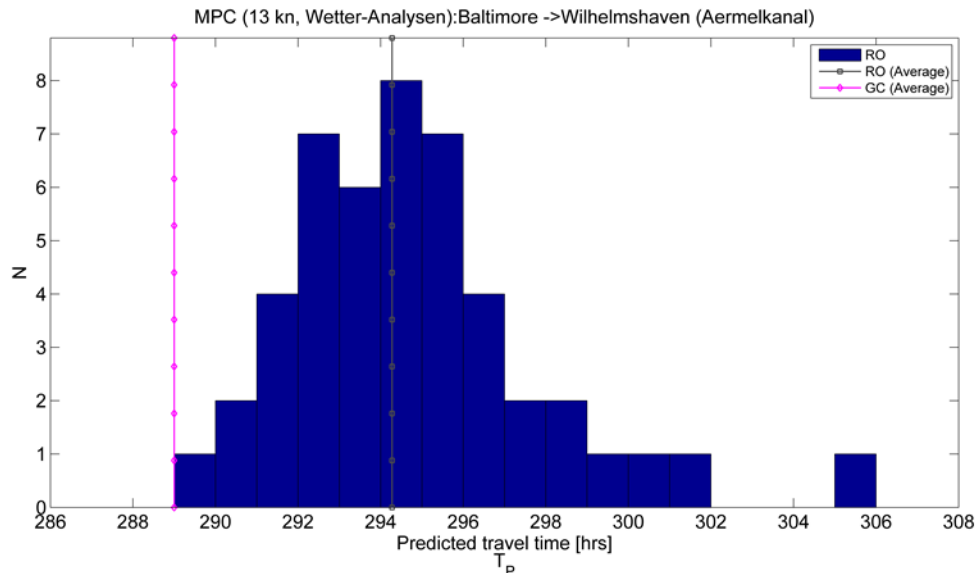


Abbildung 5.23: Verteilung der Fahrtzeiten bei Einsatz eines Flettner Rotors und Routenoptimierung auf der Route Baltimore – WHV, verglichen mit der Fahrtzeit auf dem GK, Mittelwerte für 2008 und eine Fahrt / Woche.

## 5.6 Unsicherheit in der Routenplanung

Die Berechnung der Energieeinsparpotenziale durch WZA und Routenoptimierung erfolgte mit den „Analysendaten“, d.h. mit den historischen „richtigen“ Wetterdaten. Bei der Routenplanung muss von den Vorhersagedaten ausgegangen werden, die mit wachsendem zeitlichen Horizont ungenauer werden.

Die Berechnung der optimalen Route erfolgt zum Startzeitpunkt mit den Vorhersagewerten, die für sieben Tage in der Zukunft vorliegen. Ab diesem Zeitpunkt werden bei der Routenoptimierung für die restliche Zeit eine Fahrt auf dem GK mit mittlere Energiewerte (aus der bisher pro Segment errechneten Energie) berücksichtigt. Alle 24 h kann diese Routenoptimierung mit den dann neu zur Verfügung stehenden Vorhersagewerten neu aufgesetzt werden. Die Routenoptimierung wird umso sicherer je dichter das Schiff an das Ziel heran kommt (Details im TP2)

Bevor eine „optimale“ Route beim Start festgesetzt wird ist es relevant zu wissen mit welcher Genauigkeit (Wahrscheinlichkeit) diese Route den errechneten Einspareffekt bringt. Im Rahmen einer Promotion (ZASTRAU 2016) wurde eine Methode entwickelt, um eine Güte, bzw.

Unsicherheit für eine geplante Route vorherzusagen. Ist diese Unsicherheit zu groß (für das errechnete Einsparpotenzial) wird man auf diese optimierte Route verzichten und evtl. lieber auf dem GK fahren.

### Konzept der Ermittlung der Unsicherheit

Das Konzept beruht auf der Erfahrung, dass die Unsicherheit in der Vorhersage mit der Turbulenz der Wettersituation auf der Route wächst. Je stabiler eine Wettersituation ist und damit auch die Vorhersagegüte, umso sicherer lässt sich der Einfluss des Wetters auf den Energieverbrauch eines Schiffes abschätzen. Je turbulenter das aktuelle Wetter auf der betrachteten Route ist, umso unsicherer werden die errechneten Energiewerte sein, da kleine räumliche Verschiebungen von Tiefs oder Hochs in der Umgebung der Route zu großen Effekten in der Energieberechnung führen können.

Deswegen werden auf der mit den Vorhersagewerten ermittelten optimierten Route auch im Umfeld der Wegpunkte die Wetterdaten für die Energieberechnung herangezogen (Abbildung 5.24). Je größer diese Streuung ist, d.h. umso größere die Wetterturbulenzen im Umfeld dieses Wegpunktes sind, umso größer ist die Streuung der errechneten Energie an diesem Punkt. Werden die Streuungen über alle Wegpunkte aufsummiert, dann erhält man eine Gesamtstreuung durch die Wettersituation entlang der Route.

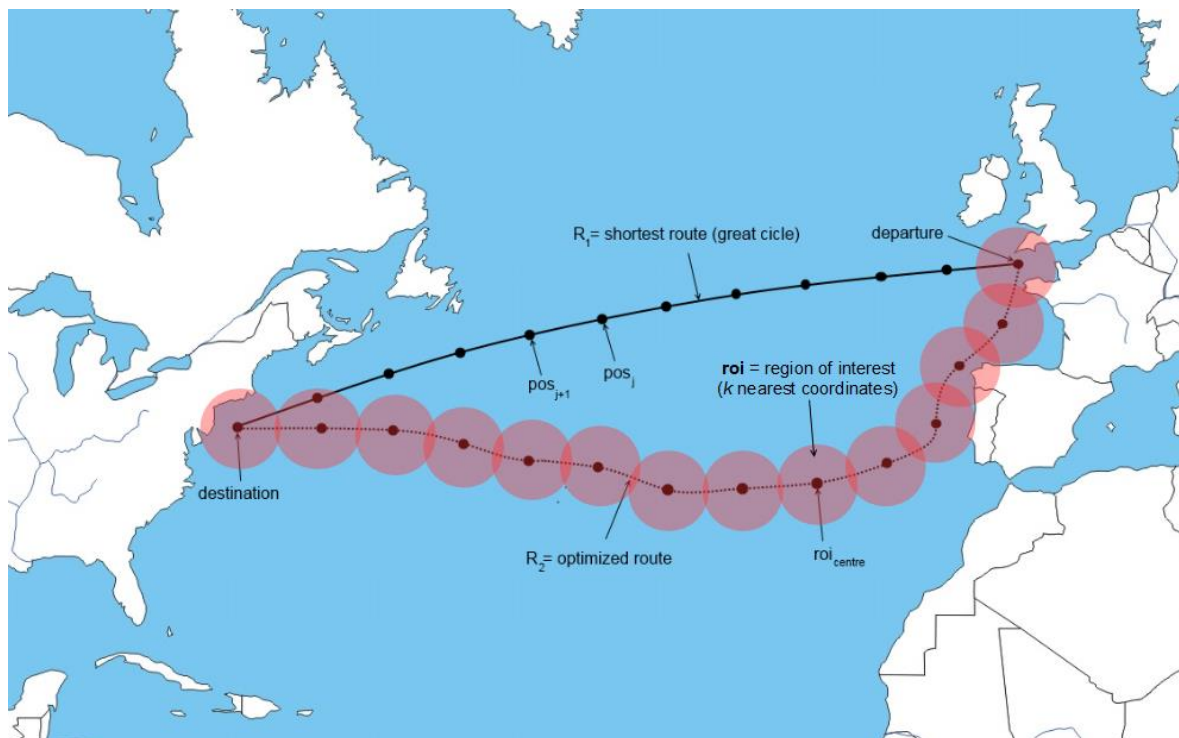


Abbildung 5.24: Darstellung der Charakterisierung der Umfelder der Wegpunkte (rot) entlang einer optimierten Route, in denen die Energieverteilung durch die Schwankungen der Wetterdaten in diesen Regionen errechnet wird.

## 5.7 Umweltbelastung

### 5.7.1 Emissionen der Seeschifffahrt

Die internationale Seeschifffahrt trägt zu den globalen anthropogenen Emissionen erheblich bei (INTERNATIONAL MARITIME ORGANISATION 2014)

- mit ca. 3% der CO<sub>2</sub> Emissionen,
- mit ca. 13% der NO<sub>x</sub> Emissionen und
- mit ca. 12% der SO<sub>x</sub> Emissionen.

Bezogen auf den Treibstoffverbrauch, bzw. bezogen auf die durch die Verbrennung erzeugte Energie, ergeben sich für das heute noch weitgehend verwendete Schweröl (mit ca. 2,5% S) folgende Emissionsfaktoren e(i) (CORBETT 2003):

- 655 g CO<sub>2</sub>/kWh
- 17 g NO<sub>x</sub>/kWh
- 10 g SO<sub>x</sub> /kWh
- 0,6 g HC / kWh
- 1,25 g PM10/ kWh

Mit den Energiewerten, die auf den betrachteten Routen benötigt werden, kann mit den oben angegebenen Emissionsfaktoren die Emission errechnet werden.

### 5.7.2 Emissionen auf der gesamten „supply Chain“

Für die gesamte Transportkette vom sendenden Kunden bis zum empfangenden Kunden kann die Emission über das Programm Ecotransit berechnet werden (siehe TP5).

### 5.7.3 Umweltkosten

Für die Berechnung der durch die Emissionen verursachten Umwelt- und Gesundheitskosten gibt das UBA folgenden Ansatz für die spezifischen Umweltkosten SUK (UMWELTBUNDESAMT August 2012):

- 80 €/t CO<sub>2</sub>, steigend auf ca. 260 € in 2050
- 15.400 €/t NO<sub>x</sub>
- 13.200 €/t SO<sub>2</sub>



Daraus errechnen sich die umweltbezogenen Zusatzkosten der Seeschiffe (bezogen auf Schweröl):

$$UK = (SUK(CO_2) * e(SO_2) + SUK(NO_x) * e(NO_x) + SUK(SO_x) * e(SO_2)) * E$$

Mit den spezifischen Umweltkosten (SUK) ergibt sich

$$UK = (446 \text{ €/MWh}) * E$$

Rechnet man die Energie auf den Verbrauch  $m$  an Treibstoff mit dem SFOC von 0,18 kg/kWh Wert um

$$m = (0,18 \text{ kg/kWh}) * E,$$

so ergibt sich für die Umweltkosten (für die Verwendung von Schweröl HFO):

$$UK = (2478 \text{ €/t}) * m$$

Vergleicht man diese Kosten mit dem derzeitigen Preis für Schweröl HFO

$$\text{Treibst.} - K = (200 \text{ €/t}) * m,$$

so erkennt man, dass ein enormer Handlungsbedarf für die Zukunft besteht: Die Verwendung des billigen Schweröls für die Seeschifffahrt ist umweltpolitisch gesehen unverantwortlich.

## 5.8 Wirtschaftlichkeit für den Hauptlauf auf See

Im Endeffekt entscheidet die Wirtschaftlichkeit über die zukünftigen Entwicklungen zur Energieeinsparung in der Seeschifffahrt. Die in diesem Abschnitt dargestellten Berechnungen der Wirtschaftlichkeit basieren einerseits auf dem Energieeinsparpotenzial durch einen WZA, andererseits auf den zusätzlichen Kosten durch einen WZA. Beide Komponenten hängen von diversen Parametern ab: das Einsparpotenzial in €, von dem Treibstoffpreis, dem WZA, dem Schiff, der Fahrweise, ...; die Kosten hängen von den Investitionskosten den Betriebskosten ab. Ein Berechnungstool, das es erlaubt alle wesentlichen Parameter (auch die Umweltkosten) zu berücksichtigen ist im TP0 beschrieben.

Für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines WZA wird hier der Einsatz eines Dynariggs (siehe Kap. 4.2) auf einem MZF bei 13 kn auf der Route Baltimore-Wilhelmshaven mit Routenoptimierung diskutiert. Es ergeben sich aus dem Projekt heraus folgende Perspektiven:

### A) Betrieb mit RO ohne zusätzliche Investitionen

Bei der Minimierung des „sea margins“ durch eine RO (ohne WZA) ergibt sich ein Einsparpotenzial (im Vergleich zur Fahrt über den Großkreis) je nach Route / Wetterverhältnissen bis zu 8 % (siehe Tabelle 5.3). Hierbei fallen keine Investitionskosten an. Dieses Einsparpotenzial wird derzeit von den Reedern durch eine Routenberatung weitgehend schon genutzt, allerdings für verschiedene Randbedingungen (Zielfunktionen).

### B) Einsatz von WZA

#### B1) Berechnung über die Amortisation eines WZA

Die Rentabilität von WZA hängt neben den Investitionen im Wesentlichen von den Treibstoffkosten und von den Auflagen zum Umweltschutz ab. Unter folgenden Aspekten wurde eine grobe Abschätzung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt (Abbildung 5.25):

- Es wird für die WZA jeweils eine Investitionssumme von 4 Mio + 5 % Kapitalverzinsung angesetzt (ohne Entwicklungskosten), zusätzliche Betriebskosten durch den WZA werden vernachlässigt.
- Der WZA hat eine geschätzte Nutzungsdauer von 10 Jahren, aber nach 5 Jahren soll der WZA Gewinn bringen.
- Die Treibstoffkosten sind in Tabelle 5.6 aufgelistet.
- Alle anderen Kosten werden konstant angesetzt, d.h. auch die Kosten einer Fahrtzeitverlängerung werden nicht berücksichtigt, da diese Veränderungen kleiner als 1 Tag iat, also im derzeitig praktizierten Rahmen liegen.

Tabelle 5.6: Zusammenstellung der Treibstoffkosten. \* (BUNKERINDEX 2016); 1€ = 1,14 \$), \*\* (BUNKER FUEL PRICES)

Treibstoffart	Kosten heute (April 2016)*	Kosten 2013**
IFO 380 / Schweröl	Rotterdam 200 US \$ /t = 175 €/t	600 US \$ /t = 526€/t
MGO / Diesel	Rotterdam 380 US \$ / t = 333€/t	900 US \$/t = 790€/t

Das mittlere Einsparpotenzial (über ein Jahr gemittelt) kann der Tabelle 5.7 entnommen werden:

- für die die Route BA-WHV gemittelt: 469 MWh /Route (gemittelt)
- für die die Route WHV-BA gemittelt: 496 MWh /Route (gemittelt)

Für 12 Routen / Jahr je Richtung ergibt sich folgendes Einsparpotenzial:

$$\Delta E = 12 \times 469 \text{ MWh} + 12 \times 496 \text{ MWh} = 11580 \text{ MWh},$$

mit dem SFOC = 0,18 kg/kWh errechnet sich die eingesparte Treibstoffmenge / Jahr zu

$$\Delta m = 2084 \text{ t}$$

Mit den Kostenfaktoren Kf aus Tabelle 5.6 errechnet sich dann die eingesparte Summe für die verschiedenen Treibstoffen zu (Abbildung 5.25)

$$\Delta K = \Delta m * Kf$$

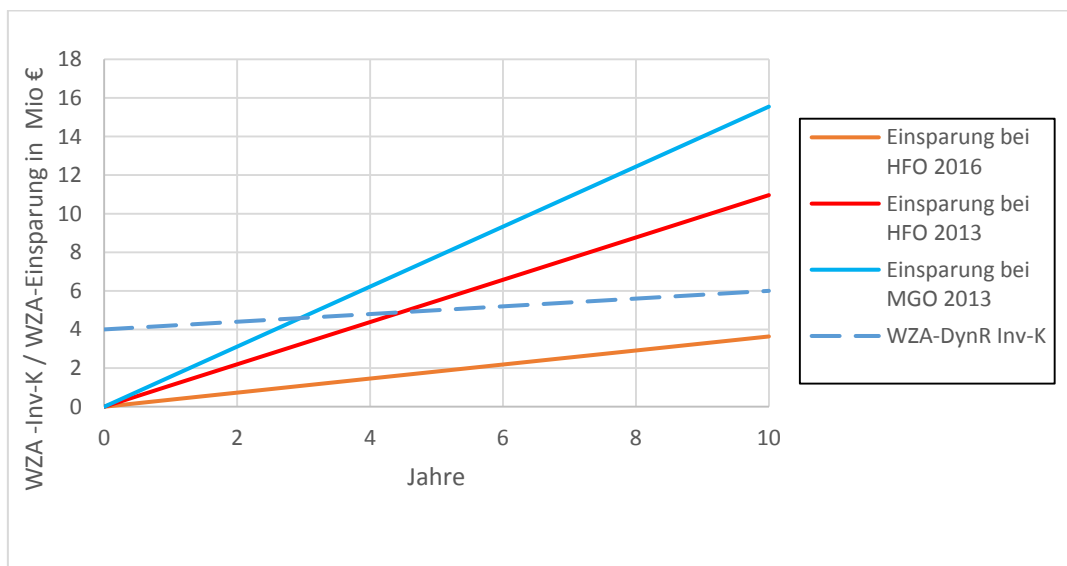


Abbildung 5.25: Gegenüberstellung der erwarteten Einsparungen bei verschiedenen Treibstoffen und Treibstoffpreisen gegen die Investitionskosten eines WZA (gestrichelte Linie), errechnet am Beispiel eines MZF mit Dynarigg auf der Route Baltimore-WHV bei  $V_s = 13 \text{ kn}$ ; Mittelwerte über ein Jahr, für 12 Fahrten je Richtung in 2008.

Es ergibt sich ein break-even-point für die Wirtschaftlichkeit, der im Wesentlichen von den Treibstoffkosten abhängt. Es zeigt sich, dass bei den derzeitigen Treibstoffkosten (Schweröl

HFO 2016) eine Rentabilität nicht gegeben ist. Hingegen sollte bei den Treibstoffpreisen von 2013 eine Rentabilität gegeben sein, insbesondere dann, wenn durch Umweltauflagen HFO durch MGO (Diesel) ersetzt werden muss.

### **B2) Berechnung über die kalkulatorische Abschreibung und Zinsen**

Es wird das gleiche Szenarium wie unter B1 zu Grunde gelegt. Es werden die folgenden Kosten betrachtet:

- die Treibstoffkosten
- die Investitionskosten für einen WZA
- die Betriebskosten für einen WZA.

Alle anderen Kosten werden für den Betrieb mit und ohne WZA als gleich angesetzt. Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit wird für dieses Beispielszenarium die Kostenvergleichsrechnung herangezogen (TP0)).

**Alternative 1** repräsentiert dabei die Situation ohne die Investition in einen Windzusatzantrieb. Entscheidungsrelevant sind damit nur die Energiekosten.

**Alternative 2** repräsentiert dabei die Situation der Investition in einen Dynarigg-WZA. Entscheidungsrelevant ist damit die Summe aus Energiekosten sowie Kapitalkosten des WZA (Kalkulatorische Abschreibungen über 10 Jahre, Kalkulatorische Zinsen) und Betriebskosten für den WZA.

Das Ergebnis ist in Abbildung 5.26 dargestellt. Der Kostenvergleich dieses Beispielszenariums zeigt, dass durch den WZA in Verbindung mit der Routenoptimierung schon ab einem Treibstoffpreis von ca. 250 EUR/to die Kosten mit WZA niedriger sind als die Kosten ohne WZA., d.h. dass sich der WZA rechnet. Bei der Berechnung unter B1 wird zu Grunde gelegt, dass sich der WZA schon ab dem 5 Jahr amortisiert hat, unter B2 wird eine Nutzung von 10 Jahren in den kalkulatorischen Abschreibungen und Zinsen berücksichtigt. Deswegen ist der Grenzwert für die Treibstoffkosten hier etwa halb so groß wie bei der Betrachtung B1.

Diese Werte gelten aber nur für die windintensive Nordatlantikroute und für die Spezifikationen des berücksichtigten MZF und des speziellen WZA. Umweltkosten werden nicht berücksichtigt. Diese werden in TP5 betrachtet.

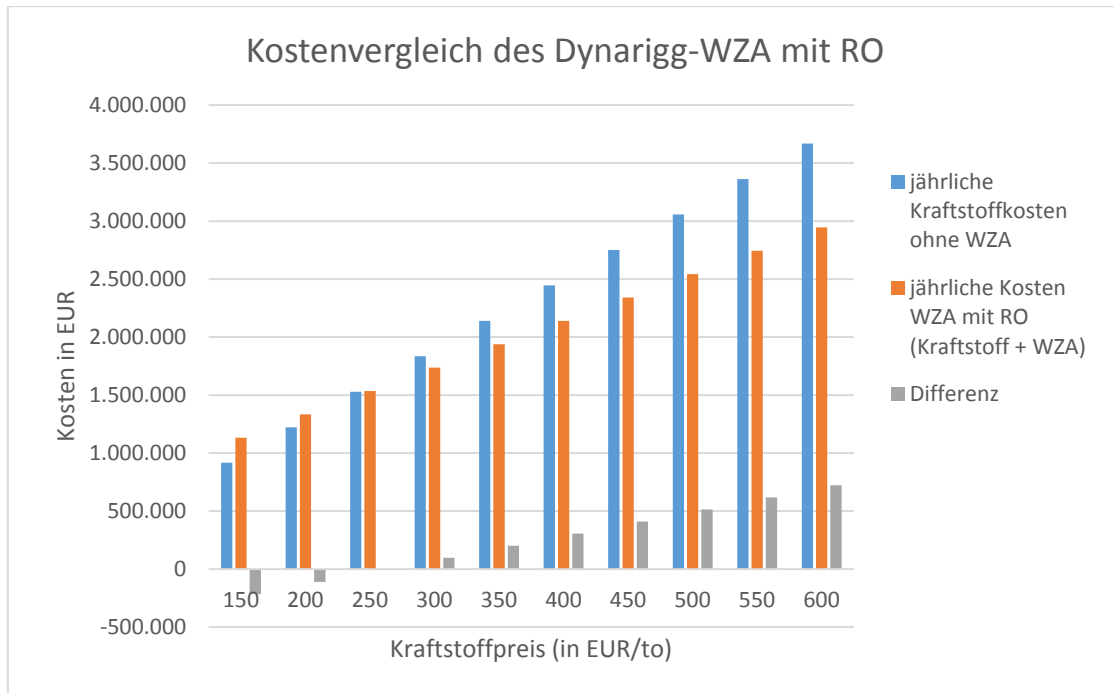


Abbildung 5.26: Vergleich der entscheidungsrelevanten Kosten der Alternativen ohne und mit WZA+RO (als Dynarigg) auf der RO Route Baltimore – Wilhelmshaven mit einem Mehrzweckfrachter bei 13 kn Fahrtgeschwindigkeit.

Im Rahmen des FSP ROBUST wurde für die Diskussion der Wirtschaftlichkeit ein Berechnungstool entwickelt, das es erlaubt, die Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussgrößen zu diskutieren, also auch die Veränderung der Kostenfaktoren bei einem Betrieb mit einem WZA (siehe TP0).

Tabelle 5.7: Energieverbrauch auf der Route BA-WHV über eine Fahrt / Woche gemittelt.

Start	Baltimore				
Ziel	Wilhelmshaven - Ärmelkanal				
MZF, 13kn, Dynarigg					
	MIN [Std]	MAX [Std]	AVG [Std]		
Fahrtzeit (Großkreis)	288	288	288		
Fahrtzeit (Routenoptimierung mit Wind und Wellen)	289	293	290,4255319		
Fahrtzeit (Routenoptimierung mit Wind, Wellen und Dynarigg)	290	300	294,2553191		
	MIN [kWh]	MAX [kWh]	AVG [kWh]	Einsparung [kWh]	Einsparung [%]
Vortriebsleistung (Großkreis)	1105409,038	1105409,038	1105409,038		
Vortriebsleistung (Großkreis mit Wind und Wellen)	1159835,234	1643051,359	1318882,496		0
Vortriebsleistung (Großkreis mit Wind, Wellen und Dynarigg)	657058,3851	1299955,378	988244,1307		25,06958477
Vortriebsleistung (Routenoptimierung mit Wind und Wellen)	1154658,502	1598899,697	1293306,927		1,939184825
Vortriebsleistung (Routenoptimierung mit Wind, Wellen und Dynarigg)	520639,1958	1068210,635	849806,6034	469075,8927	35,56616257
Start	Wilhelmshaven- Ärmelkanal				
Ziel	Baltimore				
	MIN [Std]	MAX [Std]	AVG [Std]		
Fahrtzeit (Großkreis)	285	285	285		
Fahrtzeit (Routenoptimierung mit Wind und Wellen)	285	295	290,1489362		
Fahrtzeit (Routenoptimierung mit Wind, Wellen und Dynarigg)	286	303	293,5531915		
	MIN [kWh]	MAX [kWh]	AVG [kWh]		Einsparung [%]
Vortriebsleistung (Großkreis)	1095397,022	1095397,022	1095397,022		
Vortriebsleistung (Großkreis mit Wind und Wellen)	1189484,996	2039003,762	1511955,786		0
Vortriebsleistung (Großkreis mit Wind, Wellen und Dynarigg)	826773,6222	1733863,342	1191931,33		21,16625756

Vortriebsleistung (Routenoptimierung mit Wind und Wellen)	1177061,428	1800234,701	1431126,819		5,345987433
Vortriebsleistung (Routenoptimierung mit Wind, Wellen und Dynarigg)	718713,7026	1436662,663	1015892,427	496063,3581	32,80938258

## 6 Engpässe der Lieferkette

Im Kapitel 5 wurde dargelegt, dass die gesamte Lieferkette (Abbildung 2.2) nicht als Gesamtheit optimiert zu werden braucht, da die praktizierten Reisezeitschwanken auf der Seeroute größer sind als die, die sich durch eine wetterinduzierte Routenoptimierung (mit und ohne WZA) ergeben.

Demzufolge kann auch die Gewinnoptimierung für den Hauptlauf sowie für den Nach- und Vorlauf in der Lieferkette jeweils separat erfolgen. Da für den Vor- und Nachlauf die einzelnen Logistikpartner schon für sich eine Optimierung durchführen, wird diese im Rahmen des Projektes nicht aufgegriffen, sondern es wird nur die Wirtschaftlichkeit der Hauptroute untersucht.

Die praktizierten Hafenzeiten (siehe TP0) lassen allerdings vermuten, dass hier teilweise (oder zeitweise) Engpässe bestehen. Aus diesem Grund wird im vorliegenden Projekt im Rahmen einer Dissertation (FOLKERTS 2016) ein software-tool entwickelt, das es erlaubt den Hafen als Ganzes, wie auch den Ablauf einzelner Schiffsbewegungen und Lade- und Entladevorgänge zu simulieren. Dieses Tool soll es ermöglichen, die Vorgänge im Hafen besser zu verstehen und gegebenenfalls zu optimieren, um die Hafenzeiten für die Schiffe zu minimieren.



## 7 Zusammenfassung

Die entwickelte Routenoptimierung erlaubt auch schon ohne WZA aber unter Berücksichtigung der aktuellen Wettersituation eine Energieeinsparung von bis zu 8% auf der Nordatlantikroute (bei einer Schiffsgeschwindigkeit von ca. 13 kn) durch geschickte Routenführung. Der als „sea margin“ bekannte Einfluss des Wetters auf den Energieverbrauch wird dadurch minimiert.

Es wurden drei interessante Windzusatzantriebe WZA von realistischer Größe modelliert (Kite, Flettner-Rotor, Dynarigg) und das durch die WZA ermöglichte Energie-Einsparpotenzial auf verschiedenen Routen und bei verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten simuliert. Auf der windreichen Nordatlantikroute kann danach ein Einsparpotenzial von bis zu 35% bei einer moderaten Schiffsgeschwindigkeit von 13 kn bei einem MZF erzielt werden.

Für die Modellierung des Einflusses von Wind und Wellen auf den Energieverbrauch eines Schiffes wurden vorhandene Programme genutzt und durch eine zweijährige Messkampagne auf einem weltweit fahrenden MZF evaluiert. Diese Messdaten stehen auch für weitere wissenschaftliche Arbeiten zur Verfügung (z.B. im Nachfolgeprojekt „Marigreen“).

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde ein Berechnungstool entwickelt, das alle wesentlichen Kosten- und Erlösfaktoren berücksichtigt. Die Wirtschaftlichkeit hängt von vielen äußeren Einflussfaktoren ab, so dass hier sinnvoll nur verschiedene Szenarien diskutiert werden können. Eine grobe Abschätzung zeigt, dass bei den derzeitigen Treibstoffkosten (2016) und beim Einsatz von Schweröl HFO sich der Einsatz eines WZA nicht rechnet. Legt man die Treibstoffkosten von 2013 zu Grunde so ergibt sich für den Reeder durch Einsatz eines WZA ein gewisser finanzieller Gewinn, der deutlich höher wird, wenn auf Grund von Umweltgesichtspunkten der Betrieb der Schiffe von Schweröl auf Diesel (MGO) umgestellt werden sollte.

Im Rahmen des Projektes wurde als Dissertation auch ein Verfahren entwickelt, die Unsicherheit in der Vorhersage des Energieverbrauches durch die Unsicherheit in der Wettvorhersage abzuschätzen.

Die Betrachtung der gesamten Transportkette hat gezeigt, dass die derzeit praktizierten zeitlichen Schwankungen im Hauptlauf auf See genügend Freiraum für die zeitlichen Schwankungen durch eine Routenoptimierung für den Hauptlauf auf See aufzeigen. Für die gesamte Transportkette ist der Hafen, als Schnittstelle zwischen dem Hauptlauf auf See und dem Vor- und Nachlauf des Warentransports auf dem Land, von besonderer Bedeutung. In einer weiteren Dissertation wird ein Tool entwickelt, mit dem die Funktion von Warenumschlägen im Hafen analysiert und optimiert werden kann.

## 8 Literatur

- AWT: Voyage Calculator, 2 S., Download unter <http://www.awtworldwide.com/assets/ArticleFiles/SG-AWT-Shipping-Voyage-Calculator-screen.pdf>. (04.12.2015).
- BENTIN, M., ZASTRAU, D., SCHLAAK, M., FREYE, D., ELSNER, R., KOTZUR, S. (2016): A new Routing Optimization Tool – Influence of Wind and Waves on Fuel Consumption of Ships with and without Wind assisted Ship Propulsion Systems. *Transportation Research Procedia*, (14), 153–162.
- BLENDERMANN, W. (1966): Windloading of ships - collected data from wind tunnel tests in uniform flow; in: IfS-Report 574; Uni Hamburg.
- BLENDERMANN, W. (1993): Schiffsförmigkeit und Windlast – Korrelations- und Regressionsanalyse von Windkanalmessungen am Modell, Inst. für Schiffbau; Univ.-Bibl. der Techn. Univ. Hamburg-Harburg, Hamburg, Hamburg-Harburg, 50 S.
- BLENDERMANN, W. (1994): Parameter identification of wind loads on ships. *ScienceDirect*, Elsevier, (Vol. 51, Issue 3, May 1994).
- BLENDERMANN, W. (1996): Wind loading of ships – collected data from wind tunnel tests in uniform flow.
- BLUME, P. (September 1977): Berechnung des Seeverhaltens für eine systematisch variierte Formfamilie, Hamburg.
- BMBF (2009): Zero Emission Ship – BMBF Verbundprojekt: Forschung für den Klimaschutz und dem Schutz vor Klimawirkungen: Entwicklung eines integrierten Antriebs- und Nutzungskonzeptes auf der Basis von Windkraft; Fkz 01LS05080 (SkySails, Hamburg) und Fkz 01LS05081 (FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven).
- BUNKER FUEL PRICES: Transport-related Price Indices. MINISTRY OF TRANSPORT, NEW ZEALAND, HRSG., DOWNLOAD UNTER <http://www.transport.govt.nz/ourwork/tmif/transportpriceindices/ti008/>. (5.9.21016).
- BUNKERINDEX (2016), Download unter [www.bunkerindex.com](http://www.bunkerindex.com).
- BURGET, A. (2012): Entwicklung einer Zielfunktion und ihrer warenempfängerinduzierten Freiheitsgrade und Restriktionen für die Routenplanung des Hauptlaufes im Seeverkehr unter besonderer Berücksichtigung windinduzierter Vortriebskräfte. Masterarbeit, Hochschule Osnabrück, Osnabrück.
- CORBETT, J. (2003): Updated emissions from ocean shipping. *J. Geophys. Res.* 108, (D20).
- DIJKSTRA, G., PERKINS, T. (2004): The Maltese Falcon: the realisation. 18th International HISWA-Symposium, Amsterdam, Download unter <http://www.hiswasymposium.com/assets/files/pdf/2004/Dijkstra@hiswasymposium-2004.pdf>.
- DYKSTRA NAVAL ARCHITECTS (2013): The Ecoliner Concept – Future Design in Progress, 22 S. (08.12.2015).
- ELSNER, R. / SCHLAAK, M. ET AL. (Januar 2009): Testergebnisse des SkySails-Systems, *Schiff & Hafen*, 15 S., Download unter

- [https://www.schiffundhafen.de/fileadmin/user\\_upload/PDF/suh-Jahresinhalt2009.pdf](https://www.schiffundhafen.de/fileadmin/user_upload/PDF/suh-Jahresinhalt2009.pdf). (25.01.2016).
- ENERCON GMBH, unter Mitarbeit von SCHMIDT, A., VAHS, M. (2013): Entwicklung eines innovativen Schiffsantriebes gekennzeichnet durch den Einsatz von Magnus-Rotoren zur Windenergienutzung in Kombination mit einem hierauf abgestimmten Antriebspropeller – Abschlussbericht zum Entwicklungsprojekt gefördert unter Az.: 25741-24/0 von der DFU.
- ENGLEBERT, P. (August 2012): Wind Propulsion For Cargo Ships – A New Approach, Brittany, France.
- FATHOM SHIPPING: Hull Fouling Control: The Era of Innovation, Download unter <https://gcaptain.com/hull-fouling-control-innovation/>.
- FOLKERTS, C. (2016): Simulation von Häfen (Arbeitstitel).
- GEITNER, M. (2007): Betriebssimulation von Frachtschiffen mit Windzusatzantrieb. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin.
- HEITMANN, S. (2012): Analyse der Veränderungspotenziale von Lieferzeit und Liefertreue bei Einsatz von Windhilfsantrieben in der Seeschifffahrt für ausgewählte Warengruppen im Rahmen des Forschungsschwerpunktes ROBUST, HS Osnabrück, FK Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Osnabrück.
- HOLTROP, J., MENNEN, G. G. J.: A statistical power prediction method. International Shipbuilding Progress, Vol. 25. 1978.
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANISATION (2014): Revision of the IMO Comprehensive Manual on Port Reception Facilities. IMO, HRSG., 194 S., Download unter [www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=2014-MEPC-67-11.pdf](http://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=2014-MEPC-67-11.pdf). (29.06.2016).
- (2011): ITTC-Recommended Procedures and Guidelines – Propulsion/Bollard Pull Test.
- KHIATANI, M. (1985): Der Einfluß des Zusatzwiderstandes durch Seegang und Wind auf den Schiffsentwurf. Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, (463).
- KRISTENSEN, H., LÜTZEN, M. (2012): Prediction of Resistance and Propulsion Power Ships, University of Southern Denmark/Technical University of Denmark.
- KÜMMEL, R. (2011): Abschätzung des Gesamtwiderstands eines Seeschiffs unter Einfluss von Umweltbedingungen an Hand eines Beispiels. Bachelorarbeit, Hochschule Emden/ Leer, Emden/ Leer.
- LLOYD'S REGISTER: Wind-powered shipping, Download unter <http://www.lr.org/en/marine/technology-and-innovation/technology/windpoweredshipping.aspx>. (30.08.2016).
- MAN DIESE & TURBO (2012): Basic Principles of ship propulsion.
- MAN DIESEL & TURBO (2012): Basic Principles of Ship Propulsion. MAN DIESEL & TURBO, HRSG., Kopenhagen, 45 S. (03.12.2015).
- Marine Traffic – Flettner-Antrieb, Download unter <http://www.marinetraffic.com/en/photos/of/ships/shipid:151866/#forward>. (2016).
- OTTO, H. (1992): Windantrieb für Schiffe. Windenergie aktuell 1992, (11).
- SCHENZLE, P. (2010): Windschiffe im 21. Jahrhundert? Aktuelle Ansätze zum Windvortrieb von Schiffen. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 104 (2010), 55–65.
- SCHNEEKLUH, H., BERTRAM, V. (1998): Ship Design for Efficiency and Economy – Second Edition, Butterworth-Heinemann (Elsevier), Oxford, 229 S.

- SINDT, M. (2013): Ermittlung realer Schiffsgeschwindigkeiten aus AIS Daten, HS Emden/Leer: Hochschul-Institut Logistik.
- SkySails – Kite-Antrieb, Download unter <http://www.skysails.info/deutsch/skysails-marine>. (2016).
- TOWNSIN, R.L., KWON, Y.J. (1983): Approximate formulae for the speed loss due to added resistance in wind and waves. *Transa. RINA*, p. 199.
- TRAUMÜLLER, A. (2012): Reengineering eines legacy systems zur Interpretation des Seeverhaltens für eine systematisch variierende Formfamilie. Bachelorarbeit, Hochschule Emden/Leer, Emden.
- TRAUT, M., GILBERT, P., WALSH, C., BOWS, A., FILIPPONE, A., STANSBY, P., WOOD, R. (2014): Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy* 113, 362–372.
- UMWELTBUNDESAMT (August 2012): Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr – Empfehlungen des Umweltbundesamtes, Umweltbundesamt, 06844 Dessau-Roßlau.
- WAGNER, B. (1966): Windkanalversuche mit gewölbten Plattensegeln, mit Einzelmasten sowie mit Plattensegeln bei Mehrmastanordnung.
- WAGNER, B. (1967): Windkanalversuche für einen sechsmastigen Segler nach Pröls.
- WAGNER, B. (2000): Kleine Segeltheorie, Kiel.
- WAGNER, C., ANDERSSON, G., RAULIEN, A., SAUER, I., BELLON, M. (1985): Weiterentwicklung des Flettner-Rotors zum modernen Windzusatzantrieb – Phase I, Band 1 + 2, Hamburg, 200 S., Download unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fbdig06/516891545.pdf>.
- WIESMANN, A. (2010): Slow steaming – a viable long-term option?, *Wärtsilä – In Detail*, 49–55.
- WORLD SHIPPING COUNCIL (Mai 2008): Record Fuel Prices Place Stress on Ocean Shipping, 3 S., Download unter [http://www.worldshipping.org/pdf/wsc\\_fuel\\_statement\\_final.pdf](http://www.worldshipping.org/pdf/wsc_fuel_statement_final.pdf). (07.12.2015).
- ZASTRAU, D. (2016): Estimation of Uncertainty of Weather-dependent Energy Predictions with Application to Weather Routing and Wind Power Generation. Dissertation, Universität Bremen, Bremen.