



Abb. 1: Die Messdaten des ROBUST-Projekts wurden auf der „BBC Hudson“ ermittelt

# Einsparpotenziale in der Seeschifffahrt

**ROUTENOPTIMIERUNG UND WINDZUSATZANTRIEBE** Im Rahmen des Forschungsprojekts ROBUST wurden Maßnahmen zur Routenoptimierung und der Einsatz von Windzusatzantrieben in der Seeschifffahrt analysiert und ein Berechnungstool entwickelt, das die Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen und Szenarien darstellen kann

Prof. Dr. Michael Schlaak

Mehr als fünf Jahre lang hat sich ein Forschungsteam des Hochschulinstituts für Logistik (HILOG) an der Hochschule Emden/Leer (HSEL) in Zusammenarbeit mit der Hochschule Osnabrück, der Universität Bremen und dem Deutschen Wetterdienst mit der Frage beschäftigt, welche Einsparpotenziale sich durch den Einsatz von Verfahren zur Routenoptimierung sowie von Windzusatzantrieben auf Seeschiffen ergeben. Auf der Abschlusskonferenz des Projekts ROBUST (Routen- und Befrachtungsplanung und -Steuerung

für die Seeschifffahrt), das durch das Land Niedersachsen gefördert und über die VW-Stiftung „VW vorab“ finanziert wurde, sind die Forschungsergebnisse am Maritimen Kompetenzzentrum MARIKO in Leer präsentiert worden..

## Problemstellung

In der Seeschifffahrt sind die Treibstoffkosten mit heute etwa 40–60 Prozent der Gesamtkosten ein wesentlicher Kostenfaktor. Gleichzeitig trägt die internationale Seeschifffahrt mit einem Anteil von ca. drei Prozent bei CO<sub>2</sub>, ca. 13 Prozent bei NOx

und ca. zwölf Prozent bei SOx erheblich zu den globalen anthropogenen Emissionen bei [1].

Berücksichtigt man für das heute noch weitgehend verwendete Schweröl (mit ca. 2,5 Prozent Schwefelanteil) die zusätzlich entstehenden Umweltkosten, d.h. die Abschätzung der monetären Auswirkungen der Emissionen, so ergibt sich laut Umweltbundesamt pro Tonne Schweröl ein Betrag von der Größenordnung von rund 2000 Euro, also etwa das Zehnfache des derzeitigen Preises für Schweröl HFO [2]. Diese Einschätzung zeigt, dass für die

Zukunft ein deutlicher Handlungsbedarf besteht.

Seit 2008 wachsen die Kapazitäten der Welthandelsflotte stärker als der globale Warentransport. Ferner haben die hohen Treibstoffkosten in den Jahren 2010-2013 dazu geführt, dass „eco-ships“ mit geringem Treibstoffverbrauch in Auftrag gegeben wurden. Die Effekte führten zu einer Überkapazität in der Handelsflotte und haben die Gewinne der Reederei drastisch sinken lassen [3]. Nach weitreichenden schiffstechnischen Optimierungen in den letzten Jahren und der Praktizierung des „slow steamings“ erscheinen die Möglichkeiten größerer Treibstoffeinsparung ausgeschöpft.

Das Ziel der Konferenz war es daher, zusätzliche Einsparpotenziale sowie die daraus abgeleitete Wirtschaftlichkeit dieser Ansätze bei dem derzeitigen Stand der Technik abzuschätzen. Daraus ergaben sich die folgenden Schwerpunkte:

- › Analyse und Optimierung des Schiffsbetriebs durch Auswertung von Schiffsdaten (der „gläserne Schiffsbetrieb“),
- › wetterbedingte Optimierung der Route (RO) ohne Windzusatzantriebe (WZA),
- › Einsatz von Windzusatzantrieben (WZA) mit und ohne Routenoptimierung (RO).

Da aufgrund der fehlenden praktischen Umsetzung aktuell kaum Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit des windbasierten Routings sowie zum Einsatz von Windzusatzantrieben vorliegen, wurde im

Rahmen des Forschungsprojektes ROBUST in einem ersten Schritt ein Simulationstool entwickelt, mit dem Aussagen zur Energieeinsparung beim Einsatz von WZA getroffen werden können und zwar auch unter Berücksichtigung einer Anpassung der Route zur optimalen Nutzung der Windenergie. Diese Simulationsergebnisse fließen in einem zweiten Schritt in ein Analysetool ein, durch das die Wirtschaftlichkeit dieser Ansätze – abhängig von verschiedenen Parametern – bewertet werden kann. Die in der Simulation verwendeten Modelle wurden durch Messungen auf einem weltweit eingesetzten Mehrzweckfrachter evaluiert.

### Messungen auf einem Mehrzweckfrachtschiff

Ziel der Schiffsmessungen auf dem Mehrzweckfrachter „BBC Hudson“ (Abb. 1) der Reederei Briese war zum einen die Aufstellung einer Übersicht über das Verhalten des Schiffs in Wind und Wellen sowie über die Fahrweise des Schiffes und zum anderen die experimentelle Überprüfung der in den Simulationen verwendeten Modelle. Dabei handelt es sich um

- › das Modell des Glattwasserwiderstandes in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit (Verifizierung der „Glattwasserkurve“ GWK aus dem „model test report“ MTR),
- › das Modell des Wellenwiderstands (Kooperationspartner: HSVA Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH) und
- › das Modell des Windwiderstandes.

Über einen Zeitraum von zwei Jahren wurden Wellenhöhe, -periode und -richtung (Projektpartner: Oceanwaves GmbH, Lüneburg, mit Wellenradarsystem WAMOS), Windgeschwindigkeit und -richtung (METEK GmbH, Elmshorn, mit Ultraschallmessung), Leistung auf der Welle (Hoppe Marine GmbH, Hamburg, mit Torsionsmessung), Kraftstoffverbrauch (Hoppe mit Massendurchflussmessung) sowie Rollen und Stampfen (Hoppe mit Bewegungs- und Beschleunigungsmesssystem HOSIM) gemessen und die zehnmütigen Mittelwerte per Satellit an die HSEL gesendet. Zusätzlich wurden von der Schiffstechnik Zeit, Ort, Kurs, Fahrt über Grund, Fahrt durchs Wasser und Kompasskurs übernommen.

Die Modelle zur Berechnung der Leistung von Segelantrieben konnten im Rahmen der Schiffsmessungen nicht evaluiert werden, sie wurden auf der Basis von Literaturdaten erstellt.

### Das Simulationsmodell

Das Simulationsmodell wurde entwickelt, um Abschätzungen über die Energieeinsparungen beim Einsatz einer wetterbasierten Routenoptimierung sowie eines Windzusatzantriebes durchzuführen. Es enthält folgende Module:

### Modellierung des Energieverbrauches

Unter Berücksichtigung eines Antriebsbeitrages durch einen WZA ergeben sich die einzelnen Komponenten der Leistung zu: >



## Offshore – Maritime Weather Forecasts

Source: Vestas



### Special advice and forecasts

#### Our Offshore support

- General weather situation, text and graphics
- Tabulated forecasts for any position or route
- Forecasts for all important weather elements in high resolution
- Wind forecasts at different levels
- On request individual advice by qualified meteorologists
- Update twice a day

Deutscher Wetterdienst  
Postfach 301190  
20304 Hamburg  
E-Mail: [offshore@dwd.de](mailto:offshore@dwd.de)  
Internet: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)

**Deutscher Wetterdienst**  
Wetter und Klima aus einer Hand





Abb. 2: Die betrachteten Windzusatzantriebe Kite, Flettner-Antrieb und Dynarigg

$$P_{ges} = P_{Gw} + P_{We} + P_{Wi} - P_{WZA}$$

Die Leistung zur Überwindung des Glatwasserwiderstandes  $P_{Gw}$  und die Abhängigkeit vom Tiefgang  $T$  wurden auf der Basis der Model Test Reports (MTR) ermittelt. Der Einfluss des Restwiderstandes (z.B. Oberflächenrauigkeit) wurde durch einen Vorfaktor  $C$  als Funktion von Tiefgang und Geschwindigkeit berücksichtigt:

$$P_{Gw} = C * P(MTR) = C * (A_1 * T + A_2) * V_s^x$$

Die zur Überwindung des Einflusses von Wind auf den Schiffskörper nötige Leistung  $P_{Wi}$  wird nach Blendermann [4] berechnet. Der Einfluss der vom Wind erzeugten Wellen auf die Leistung  $P_{We}$  wird mit einem HSVA Programm ermittelt [5]. Die verwendeten Programme wurden mit den Messungen auf der „BBC Hudson“ evaluiert und dann mit unterschiedlichen

Konfigurationen auf verschiedene Schiffstypen angewandt [6]. Der berechnete Energieverbrauch verringert sich bei Einsatz eines WZA um  $P_{WZA}$ .

#### Modellierung der betrachteten WZA

Einen Überblick über die nach derzeitigem Stand der Technik interessanten Windzusatzantriebe zeigt [7]. In dem entwickelten Simulationsmodell werden folgende WZA-Typen betrachtet (Abb. 2):

- › Der Kite wurde in einem früheren BMBF-Projekt bereits ausführlich untersucht und modelliert [8].
- › Der Flettner-Antrieb wurde Anfang des letzten Jahrhunderts entwickelt und erstmals auf der „Buckau“ 1922 realisiert. Eine moderne Realisierung erfolgte auf dem „E-Ship 1“ des Unternehmens Enercon [9]. Für die Modellierung wurden die Ergebnisse eines BMBF Forschungsprojektes benutzt [10]. Über aktuelle Forschungsarbeiten an

der HSEL zur Optimierung der Effektivität von Flettner Rotoren wurde berichtet [11].

› Segel: Für das vorliegende Projekt wurde das Dynarigg betrachtet. Es ist erfolgreich auf dem „Maltese Falcon“ realisiert und eine belastbare Datenbasis ist verfügbar [12].

Für die Kraft durch den WZA kann allgemein angesetzt werden:

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

Dabei charakterisieren  $A$  die „Größe“ des WZA und  $F$  die Eigenschaft des WZA, beschrieben durch das Polardiagramm ( $C_w, C_a$  = Widerstands- und Auftriebsbeiwerte und  $AWA$  = Apparent Wind Angle). Die Polardiagramme wurden auf der Basis der Literaturwerte erstellt. Die Dimensionierung wurde so parametrisiert, dass bei seitlichem Wind ( $AWA = 90^\circ$ ) alle drei Antriebe eine ähnliche Kraft zur Verfügung stellen, und dass für die Flettner-Rotoren das „E-Ship1“ als Vorlage dient. Die Beeinträchtigung untereinander, d.h. der drei Masten mit dem Dynarigg bzw. der vier Flettner-Rotoren wurde vernachlässigt.

#### Modellierung der Routenoptimierung

Während die frühere Routenberatung im Wesentlichen auf die Sicherheit des Schiffes (Vermeidung von Schlechtwettersituationen) zielte, erlauben die Satellitenübertragung von Schiffsdaten und eine bessere Wettervorhersage einen weit größeren Umfang an effektiver Routenberatung (siehe z.B. AWT, Skysails [13]).

Das Projekt ROBUST fokussiert auf die Erstellung einer energieminierten Route, wenn der klassische Schiffsantrieb



Abb. 3: Ergebnis der A\*-Routenoptimierung (rot = Großkreis, gelbe Punkte = Wegpunkte der optimierten Route)



Abb. 4: Wertschöpfungskette der Datenverarbeitung

(Motorantrieb) durch einen Windzusatzantrieb (WZA) teilweise ersetzt wird, um Treibstoff einzusparen. Allerdings sind in diesem Fall logistische Randbedingungen (Ankunft der Transportgüter in einem vorgegebenen/geplanten Zeitfenster) gegeben, die in dem entwickelten Simulationsmodell berücksichtigt wurden.

Basis für die gewählte Routenoptimierung ist die Branch-and-Bound Methode (BnB, bzw. die A\* Methode mit einschränkenden Bedingungen). Die Wurzel eines Baumes stellt dabei den Anfangszustand und die „Blätter“ die möglichen Wegpunkte auf der Route dar. Das Ziel des BnB / A\*-Algorithmus ist es, einen möglichst optimalen Pfad (hier mit minimaler Energie) von der „Wurzel“, dem Ausgangshafen, zum Ziel zu finden. Der Energiebedarf für einen Pfad setzt sich aus den Energieverbräuchen zwischen den Wegpunkten zusammen [6]. Die Energie von einem aktuell betrachteten Wegpunkt zum Ziel wird nach einer Heuristik abgeschätzt.

Die Berechnung des Energieverbrauches erfolgt über die modellierte Leistung. Das Ergebnis der Routenoptimierung ist eine Liste mit Wegpunkten (gelb in Abb. 3), die eine alternative Route zum Großkreis (rot) darstellen. Die Abweichung der optimierten Route vom Großkreis GK hängt von dem Einsparpotenzial des WZA, von dem Freiheitsgrad (akzeptiertes Zeitfenster der Fahrtzeit, bzw. Ankunftszeit) und vom Wetter ab.

Die Unsicherheit in der Routenoptimierung durch die Unsicherheit in der Wettervorhersage wurde ebenfalls im Rahmen von Robust betrachtet und kann in der Simulation mitberechnet werden [14].

## Ergebnisse

### Analyse des Schiffsbetriebs

Eine Analyse des Schiffsbetriebes über die installierte Messtechnik erfolgte durch den Projektpartner Hoppe. Eine umfassende Bewertung des Schiffsbetriebes mit Aufnahme der erforderlichen Schiffsdaten an Bord sowie die entsprechende

Bereitstellung der Daten an Land bildet die Basis für die auf Echtzeiten gestützten Optimierungsalgorithmen. Die in Abb. 4 dargestellte Wertschöpfungskette der Datenverarbeitung verdeutlicht, dass für eine erfolgreiche Optimierung die verlässliche Messtechnik mit sauberer Datenverarbeitung entscheidende Erfolgsfaktoren sind. Im Forschungsprojekt wurden die Daten von einer Maihak PMO-Anlage erfasst, integriert und in einer on Board-Datenbank für die Auswertung zur Verfügung gestellt.

Die Validierung der Betriebsdaten, insbesondere die der wesentlichen Einflussgrößen wie der Maschinenleistung, der Geschwindigkeit durchs Wasser sowie des Kraftstoffverbrauchs, spielt eine entscheidende Rolle. Diese Arbeiten wurden im Projekt durch Verfahren von Hoppe Marine unterstützt. Abb. 5 zeigt beispielsweise eine geschwindigkeitsbedingte Messwertverfälschung des Speedlogs an Bord der „BBC Hudson“.

Nur die Kenntnis und Berücksichtigung der Sachverhalte lassen, wie exemplarisch in Abb. 6 dargestellt, Empfeh-

lungen zum optimalen Betriebsbereich zu. Das Diagramm zeigt eine Betriebskostenfunktion in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit. Bei niedrigerer STW (speed through water) werden die Kosten vornehmlich durch die steigende Reisezeit und die damit verbundenen Charterkosten sowie den steigenden SFOC TW-Wert (Triebstoffmenge pro sm through water) im Niederlastbereich der Hauptmaschine stark erhöht. Bei hoher STW bestimmt vor allem das Propellergesetz die steigenden Kraftstoffkosten mit exponentiell anwachsendem Leistungsbedarf. Zusätzlich lässt sich durch die Histogramme feststellen, in welchem Bereich das Schiff betrieben wurde. So lassen sich langfristig Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Reisesgeschwindigkeit in Abhängigkeit zu den Bunker- und Charterkosten ableiten.

### Einsparung durch Routenoptimierung

Als ein Ergebnis des Forschungsprojekts ROBUST ist der zusätzliche Energiebedarf zur Überwindung von Wind und Wellen (sea-margin) auf den betrachteten Rou- >

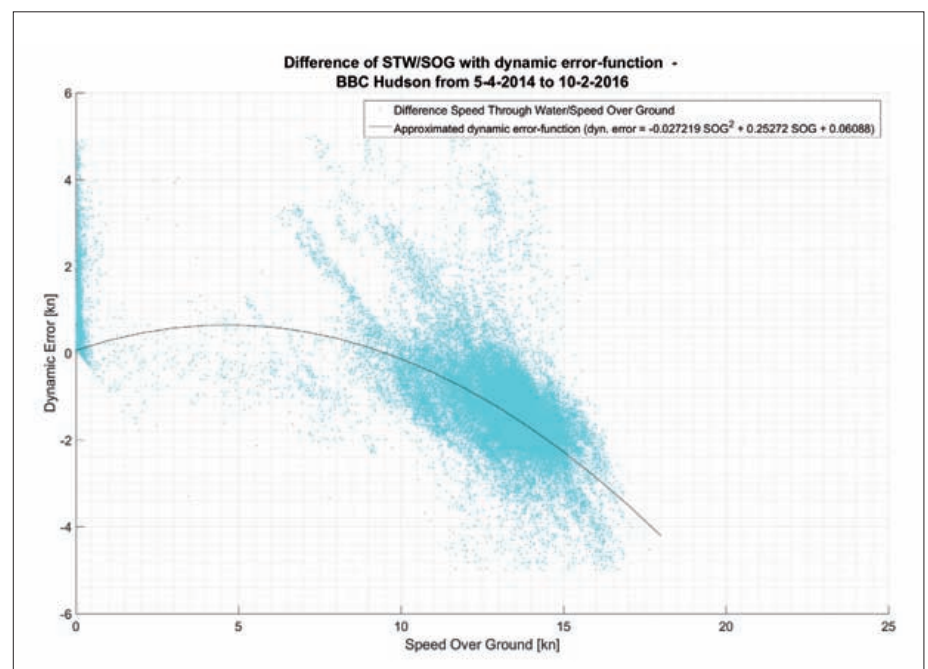


Abb. 5: Geschwindigkeitsbedingte Messwertverfälschung des Speedlogs der „BBC Hudson“

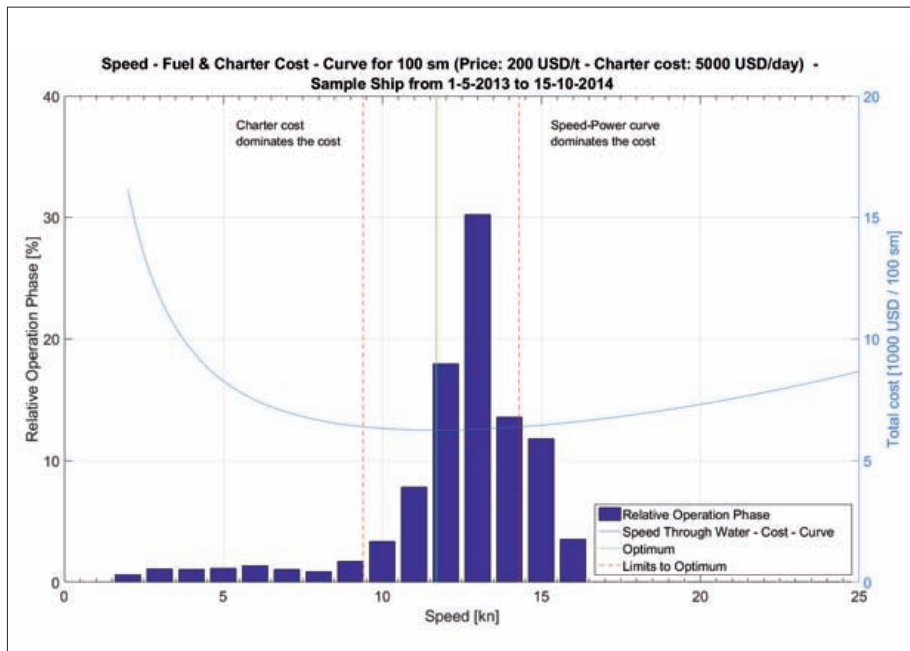


Abb. 6: Exemplarische Kostenfunktion der optimalen Reisegeschwindigkeit mit Histogramm

ten in Tab. 1 dargestellt. Durch die Routenoptimierung kann diese Energie insbesondere auf den windstarken Routen auch ohne den Einsatz eines WZA deutlich verringert werden, z.B. auf der Nordatlantikroute vier bis acht Prozent (je nach Richtung). Die Simulation erfolgte mit den Analysendaten des DWD (Deutscher Wetterdienst) für 2008 auf der „BBC Hudson“ bei 13 kn.

**Einsparpotenzial durch einen WZA mit und ohne Routenoptimierung**

Als ein weiteres Ergebnis werden in Tab. 2 die Einsparpotenziale (in Prozent der Ener-

gie ohne WZA) durch die drei betrachteten WZA auf der windstarken Route Baltimore–Wilhelmshaven dargestellt. Für die Richtung von West nach Ost bringen die drei WZA ähnliche Einsparungen. Für die Richtung von Ost nach West (entgegen der 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.

In Tab. 3 ist das Einsparpotenzial eines Schiffes mit einem Flettner-Rotor auf drei betrachteten Routen (verschieden lang, verschiedene Wetterzonen) dargestellt. Die

Nordatlantikroute hat auf Grund der Wetterverhältnisse das größte Einsparpotenzial. Die Routenoptimierung bringt gegenüber der direkten Route auf dem GK noch einmal ca. zehn Prozent, sodass sich insgesamt ein Einsparpotenzial auf dieser Route von ca. 25–35 Prozent ergibt. Auf der Route Europa–Südamerika herrschen stabilere Wetterverhältnisse (im Vergleich zum Nordatlantik), auch mit im Mittel geringeren Windstärken, sodass hier das Einsparpotenzial durch einen WZA nur etwa 13–15 Prozent beträgt, kaum richtungsabhängig. Auf der Nordseeroute WHV-Bergen beträgt das Einsparpotenzial ca. 20 Prozent, nahezu richtungsunabhängig, da die Route senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung verläuft.

Durch eine Routenoptimierung bei konstanter Geschwindigkeit wird es zu einer Verlängerung der Fahrtzeit kommen. Die Simulationsrechnungen über ein Jahr für den Einsatz eines Flettner WZA auf einem MZF auf der Route BAL-WHV mit Routenoptimierung zeigen, dass die Fahrtzeitverlängerung um ca. fünf Stunden streut mit einer maximalen Verlängerung von 17 Stunden. In umgekehrter Richtung sind die Werte geringfügig höher und liegen bei sechs bzw. 22 Stunden. Veränderungen der Ankunftszeit in dieser Größenordnung sind auch im „normalen“ Schiffsbetrieb durchaus üblich, sodass eine Berücksichtigung bei der Energieoptimierung in der RO nicht wesentlich erscheint

**Wirtschaftlichkeit**

Im Endeffekt entscheidet die Wirtschaftlichkeit über die zukünftigen Entwicklungen zur Energieeinsparung in der Seeschifffahrt. Es werden folgende Szenarien diskutiert:

	SEA MARGIN AUF GK [%]	SEA MARGIN MIT RO [%]	EINSPARUNG DURCH RO [%]
Baltimore> Wilhelmshaven	21	17	4
Wilhelmshaven> Baltimore	39	31	8
Nuevo Palmira> Emden	20	18	2
Emden> Nuevo Palmira	13	12	1
Bergen> Wilhelmshaven	15	13	2
Wilhelmshaven> Bergen	16	14	2

Tab. 1: Das errechnete „sea margin“ auf der Nordatlantikroute, als Mittelwert für eine Fahrt pro Woche während eines Jahres (2008) eines Schiffes (Typ „BBC Hudson“) bei 13 kn, GK = Fahrt auf dem Großkreis; RO = energetisch optimierte Route

	FLETTNER ROTOR	DYNARIGG	KITE
Baltimore> Wilhelmshaven GK; (Ärmelkanal)	21	25	23
Baltimore> Wilhelmshaven RO; (Ärmelkanal)	31	35	29
Wilhelmshaven> Baltimore RO; (Ärmelkanal)	14	21	10
Wilhelmshaven> Baltimore RO; (Ärmelkanal)	24	33	19

Tab. 2: Einsparung an Vortriebsleistung durch die verschiedenen WZA in Prozent (Flettner, Dynarigg, Kite) auf der Route Baltimore–Wilhelmshaven (BA-WHV) durch den Ärmelkanal, für einen Mehrzweckfrachter, Vs=13kn, jeweils für einen Kurs auf dem GK oder mit RO

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

Tab. 3: Einsparpotenzial durch den Flettner Rotor auf den drei Routen (in Prozent zur Route mit Wind und Wellen ohne WZA) für einen Mehrzweckfrachter, Vs=13kn, jeweils bei einer Route auf dem GK oder mit RO

A) Betrieb mit RO ohne zusätzliche Investitionen

Es ergibt sich ein Einsparpotenzial (im Vergleich zur Fahrt über den Großkreis) je nach Route/Wetterverhältnissen von bis zu acht Prozent (siehe Tab.1). Dieses Einsparpotenzial wird derzeit von den Reedern durch eine Routenberatung weitgehend schon genutzt, allerdings für verschiedene Randbedingungen (Zielfunktionen).

B) Transparente Darstellung des Schiffsbetriebes

Mit meist geringen Investitionen zur Ergänzung der Schiffsmesstechnik lässt sich der aktuelle Schiffsbetrieb online darstellen und Einsparpotenziale aufzeigen.

C) Einsatz von 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 (Abb. 7):

› Es wird für die WZA jeweils eine Investitionssumme von 4 Mio. Euro + fünf Prozent Kapitalverzinsung angesetzt (ohne Entwicklungskosten).

› Der WZA hat eine geschätzte Nutzungsdauer von zehn Jahren, d.h. nach fünf Jahren muss der WZA Gewinn bringen.

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 MDO (Diesel) ersetzt werden muss.

Im Rahmen des Forschungsprojekts ROBUST wurde für die Diskussion der Wirtschaftlichkeit ein Berechnungstool entwickelt, das es erlaubt, die Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung aller we-

sentlichen Einflussgrößen zu diskutieren und verschiedene Szenarien darzustellen.

## Zusammenfassung

Für die nahe Zukunft wird eine intensivere Nutzung der Informationstechnik (online-Informationen vom Schiff, genauere Informationen über das Wetter) zur Optimierung des Schiffsbetriebes genutzt werden. Längerfristig werden die zu erwartenden steigenden Treibstoffpreise und die Umweltauflagen dazu führen, auch Windenergiezusatzantriebe erneut in Betracht zu ziehen. Dies erfordert aber eine weitsichtige Planung, die im F&E-Bereich derzeit durch Arbeiten mit dem Flettner Rotor („E-ship 1“ und Forschungen an der HSEL) und dem Dynarigg [15] unterstützt wird.

## Quellen und Verweise

- [1] International Maritime Organization: Revision of the IMO Comprehensive Manual on Port Reception Facilities, 2014. [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), abgerufen am: 29.06.2016
- [2] Umweltbundesamt: Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr, 2012. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp\\_umweltkosten.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp_umweltkosten.pdf), abgerufen am: 08.12.2015
- [3] Herausforderungen und Perspektiven in der Seeschifffahrt. Beitrag auf der Abschlusskonferenz zum FSP ROBUST, Briese, W., Mariko, Leer 2016
- [4] Blendermann, W.: Parameter identification of wind loads on ships. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 51 (1993), pp 339
- [5] Blume, P.: Berechnung des Seeverhaltens für eine systematisch variierte Formfamilie. Bericht / Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt, Bd. 1505. Hamburg 1977
- [6] Bentin, M., Zastrau, D., Schlaak, M., Freye, D., Elsner, R. u. Kotzur, S.: 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 (2016) 14, S. 153–162
- [7] Warum Windschiffe oder Windzusatzantriebe. Beitrag auf der Abschlusskonferenz zum FSP ROBUST, Wind of Change in Ocean Shipping, Schenzle, P., Mariko, Leer 2016
- [8] Aschenbeck, S., Elsner, R., Lenger, T., Szesny, W., Kreutzer, R. u. Schlaak, M.: Testergebnisse des Sklysaills-Systems. Schiff&Hafen (2009) 1, S. 36
- [9] Enercon: Segelrotorschiff „E-Ship 1“ spart im Betrieb bis zu 25 Prozent Treibstoff. 2013. [http://www.enercon.de/p/downloads/PM\\_E-Ship1\\_Ergebnisse\\_DBU.pdf](http://www.enercon.de/p/downloads/PM_E-Ship1_Ergebnisse_DBU.pdf), abgerufen am: 07.06.2015
- [10] Wagner, C., Andersson, G., Raulien, A., Sauer, I. u. Bellon, M.: Weiterentwicklung des Flettner-Rotors zum modernen Windzusatzantrieb. Phase I, Band 1 + 2, Hamburg 1985. <http://edokotib.uni-hannover.de/edoks/eoifbdigo6/516891545.pdf>
- [11] Aktuelle Entwicklungen beim Flettner-Rotor. Beitrag auf der Abschlusskonferenz zum FSP ROBUST, Vahs, M., Mariko, Leer 2016
- [12] Windkanalversuche für einen sechsmastigen Segler nach Pröls, Wagner, B., 1967
- [13] Effizienzsteigerung durch Wetterrouting. Beitrag auf der Abschlusskonferenz zum FSP Robust, Fritz, F., Mariko, Leer 2016
- [14] Zastrau, D.: Estimation of Uncertainty of Weather-dependent Energy Predictions with Application to Weather Routing and Wind Power Generation, Universität Bremen Dissertation. Bremen 2016
- [15] Dykstra Naval Architects: The Ecoliner Concept. Future Design in Progress, 2013, abgerufen am: 08.12.2015

Der Autor:

Prof. Dr. Michael Schlaak, HILOG, Hochschule Emden-Leer (HSEL), Emden

Der Beitrag basiert auf den Forschungsergebnissen der Projektbeteiligten und den Beiträgen der Referenten auf der Abschlusskonferenz: M. Bentin (Seefahrt, HSEL), W. Briese (Reederei Briese, Leer), D. Freye (HS Osnabrück), F. Fritz (SkySails, Hamburg), J. Froese (TUHH), M. Vahs (Seefahrt, HSEL), St. Kotzur (HILOG, HSEL), K. Reimer (Hoppe Marine, Hamburg), P. Schenzle (Hamburg), M. Schlaak (HILOG, HSEL), M. Vahs (Seefahrt, HSEL), D. Zastrau (HILOG, HSEL)

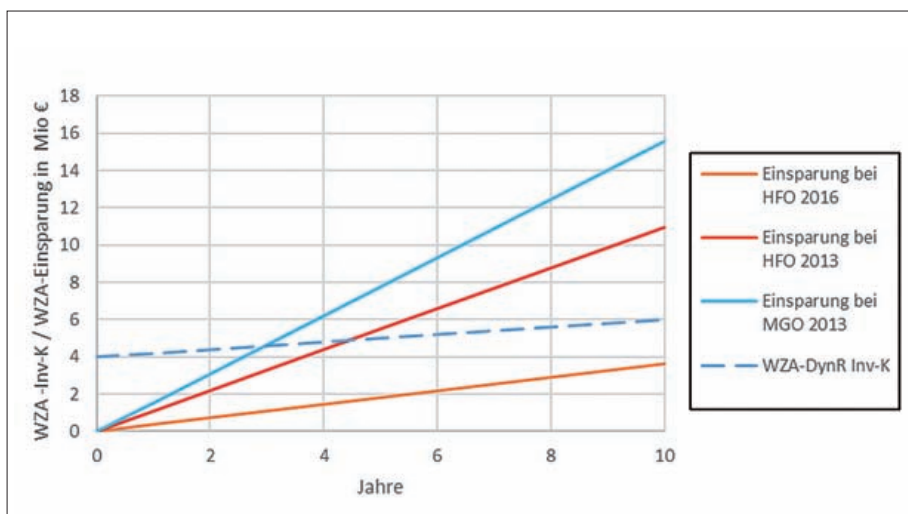


Abb. 7: Gegenüberstellung der erwarteten Einsparungen bei verschiedenen Treibstoffen und Treibstoffpreisen gegen die Investitionskosten eines WZA (gestrichelte Linie), errechnet am Beispiel eines Mehrzweckfrachtschiffs mit Dynarigg auf der Route Baltimore Wilhelmshaven bei Vs=13 kn; Mittelwerte über ein Jahr, für zwölf Fahrten je Richtung in 2008