

# Energy Efficiency Design Index und sicheres Manövrieren in schwerem Wetter

Energy Efficiency Design Index vs. safe manoeuvring in adverse conditions

**Dr.-Ing. Pierre C. Sames, Kapt. Stefan Bülow, Dr.-Ing. Vladimir Shigunov**

Germanischer Lloyd SE, Hamburg, JS Maritime Partners, Hamburg, Germanischer Lloyd SE, Hamburg

**Summary.** The International Maritime Organization (IMO) developed new regulations on energy efficiency for new ships, called Energy Efficiency Design Index (EEDI), which entered in force on 1 January 2013 for main ship types. During the development of this new IMO regulation, some flag state administrations as well as ship owners' associations underlined the need to provide sufficient power to ensure safe manoeuvring in adverse conditions. The concerns of the maritime community regarding possibly underpowered vessels have prompted the International Association of Classification Societies (IACS) to develop a guideline to evaluate whether a ship has sufficient power to safely manoeuvre in adverse conditions. Due to the complexity of the task, IMO implemented – as interim measure – only requirements for oil tankers and bulk carriers. The paper documents that this interim measure is in conflict with the EEDI regulations for smaller ships. Noting the current discussion on the definition of adverse conditions, the paper presents an application of the simplified assessment following IMO Interim Guidelines and taking into account the ship and propulsion systems particulars to predict forward speed in head waves. The paper also presents the application of a tool to perform the comprehensive assessment and compares the results with the other assessment levels.

**Zusammenfassung.** Die International Maritime Organization (IMO) hat neue Regeln für die Energieeffizienz von neuen Schiffen genannt, entwickelt und am 1. Januar 2013 für wichtige Schiffstypen in Kraft gesetzt. Der neue Energy Efficiency Design Index (EEDI) wird für jeden Neubau berechnet und muss kleiner dem geforderten Index sein, der durch eine sog. Referenzlinie gegeben ist. Während der Entwicklung wurde von Flaggenstaaten und Reedereiverbänden darauf hingewiesen, dass bei einer immer weitergehenden Reduktion der Antriebsleistung ein sicheres Manövrieren in schwerem Wetter trotzdem weiter gewährleistet sein muss. Die International Association of Classification Societies (IACS) entwickelte als Reaktion eine Richtlinie mit der ermittelt werden kann, ob ein Schiff genügend Antriebsleistung besitzt, um sicheres Manövrieren in schwerem Wetter zu gewährleisten. Wegen der Komplexität der Aufgabe wurde die IACS Richtlinie nur für Massengutschiffe und Tanker und auch nur als Interimslösung eingeführt. Dieser Beitrag zeigt den Konflikt der EEDI Regelung mit der Anforderung zu sicherem Manövrieren in schwerem Wetter. Auf der Basis der zuletzt bei der IMO diskutierten Definitionen zu schwerem Wetter wird eine beispielhafte Anwendung der IMO Richtlinie in allen drei Stufen gezeigt. Die Anwendung stützt sich auf Schiffsform und Propulsions- sowie Manövrierorgane und zeigt den Stand der Technik zur Berechnung von manövrierenden Schiffen in Wellen, insbesondere der Mindestgeschwindigkeit und Kurshalten in natürlichen Wellen.

## 1 Einleitung

Im Jahr 2003 wurde die International Maritime Organization (IMO) von der United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) beauftragt Maßnahmen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen von Schiffen zu entwickeln. Dieser Auftrag wurde mit der Resolution A.963(23) des IMO Maritime Environmental Protection Committee (MEPC) angenommen. Mögliche Maßnahmen wurden in drei Kategorien unterteilt: technische, operative und marktbasierende Maßnahmen bzw. Instrumente. Im April 2008 wurde dann der erste Vorschlag für einen CO<sub>2</sub>-Index für neu zu bauende Schiffe von Dänemark [1] eingereicht. Dieser Index setzte dabei die Kosten für Seetransport, ausgedrückt durch die CO<sub>2</sub>-Emissionen, ins Verhältnis mit dem Nutzen des Seetransports, ausgedrückt durch das Produkt von Zuladung und Geschwindigkeit des Schiffes. Trotz jahrelanger Diskussion bei der IMO um Details, Anwendung und Verifizierung wurde dieses Konzept beibehalten. Die Regeln für die Energieeffizienz von neuen Schiffen, der sogenannte Energy Efficiency Design Index (EEDI), wurden schließlich am 1. Januar 2013 für ausgewählte Schiffstypen (Containerschiffe, Gastanker, Kühlschiffe, Mas-

sengutschiffe, Tanker, Trockenfrachtschiffe) in Kraft gesetzt. Damit wurde weltweit zum ersten Mal ein global gültiger Energieeffizienzstandard umgesetzt. Die Formulierungen und Anforderungen für LNG-Tanker, RoRo-Schiffe, RoRo-Passagierschiffe und für Kreuzfahrtschiffe mit unkonventioneller Antriebsanlage (bezeichnet hier eine elektrische Propulsionsanlage) wurden erst bei MEPC 65 im May 2013 vereinbart und treten am 1. Januar 2015 in Kraft.

Die dem EEDI zugrunde liegende Idee ist die Verbesserung der Energieeffizienz von neuen Schiffen und dies kann im Wesentlichen durch Reduktion der notwendigen Antriebsleistung erreicht werden. Der EEDI wird für jeden Neubau berechnet und muss kleiner oder gleich dem geforderten Index sein, der durch eine sog. Referenzlinie vorgegeben ist. Die Anforderung wird in Schritten von jeweils fünf Jahren um je 10% verschärft. Die erste Verschärfung soll am 1. Januar 2015 in Kraft treten. Die Referenzlinien wurden pro Schiffstyp nach dem Prinzip der Harmonisierung gebildet. Dabei wurde der EEDI, nach einer vereinfachten Formel, für die in der letzten Dekade neu gebauten Schiffe berechnet, über der Zuladung (DWT) aufgetragen und die Referenzlinie dann als Trendkurve so bestimmt, dass je 50% der ermittelten EEDI-Werte ober- bzw. unterhalb der Kurve lagen. Die Referenzlinie wurde als Funktion von DWT formuliert:

$$EEDI_{required} = f(a \cdot DWT^{-c}) \quad (1)$$

Die Konstanten  $a$  und  $c$  wurden pro Schiffstyp festgelegt. Für Massengutschiffe gelten z.B.  $a = 961,79$  ( $\text{gCO}_2/(\text{t nm})/\text{t}^{-c}$ ) und  $c=0,477$ . Sämtliche Werte für die Referenzlinien sind von der IMO veröffentlicht [2]. Der Faktor  $f$  gibt die geplante Reduzierung der Referenzlinie wieder. So gilt  $f=0,9$  ab 2015,  $f=0,8$  ab 2020 und  $f=0,7$  ab 2025 für die meisten Schiffstypen.

Von der Regelung der Reduzierung von Treibhausgasemissionen von Schiffen durch die Einführung des EEDI sind lt. IMO-Beschluss nur neue Schiffe betroffen. Daher hat die IMO ein zweites Instrument, den Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), parallel zum EEDI in Kraft gesetzt. Der SEEMP gilt für alle Schiffe und fordert die Einrichtung eines schiffsspezifischen Managementsystems zur Reduzierung von Treibhausgasen. Zielwerte sowie eine neutrale Überprüfung wurden aber nicht vereinbart. Zusammengenommen bilden EEDI und SEEMP aber ein System von mächtigen Instrumenten. Die dadurch zu erwartende Reduktion von  $\text{CO}_2$  wurde in einer Studie im Auftrag der IMO [3] ermittelt. Wie in Abbildung 1 gezeigt, können die durch EEDI und SEEMP erwarteten absoluten  $\text{CO}_2$ -Emissionsreduktionen bei ca. -30% in 2050 im Vergleich zum Business As Usual (BAU) liegen. Die  $\text{CO}_2$ -Emissionen werden gegenüber 2010 aufgrund des erwarteten Handels- und Flottenwachstums jedoch absolut weiter ansteigen.

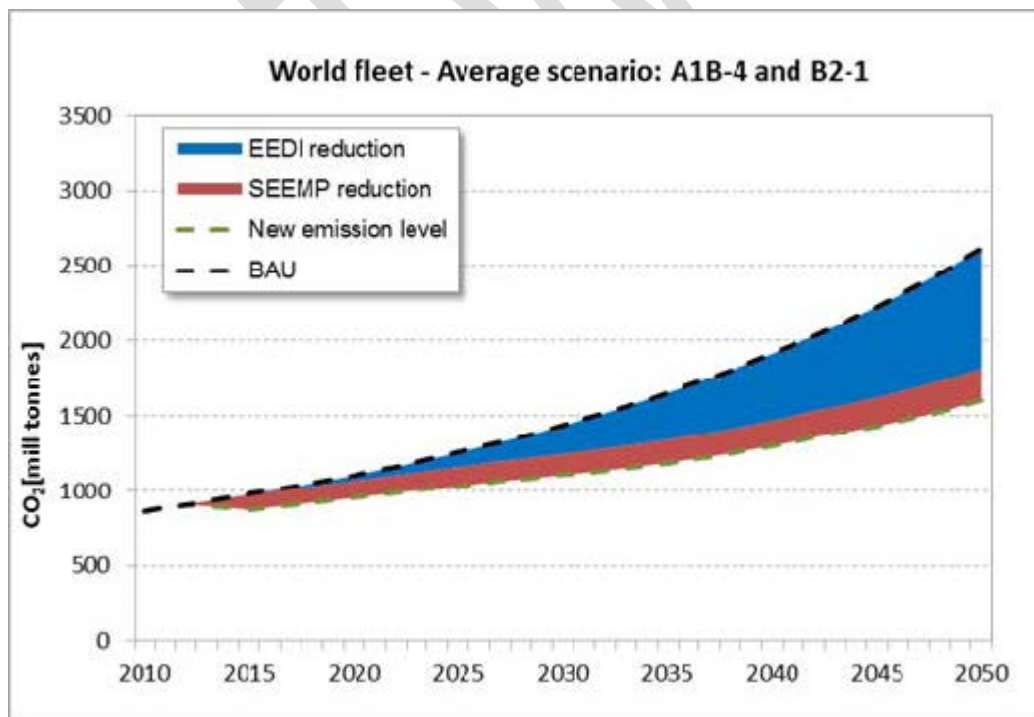


Abb. 1.  $\text{CO}_2$ -Projektion für die Weltflotte, gemitteltetes Szenario A1B-4 und B2-1 (Quelle: IMO [3])

Während der Entwicklung des EEDI wurde von Flaggenstaaten und Reedereiverbänden erst relativ spät darauf hingewiesen, dass bei einer immer weitergehenden Reduktion der Antriebsleistung ein sicheres Manövrieren in

schwerem Wetter trotzdem weiter gewährleistet sein muss. Die International Association of Classification Societies (IACS) entwickelte daraufhin zusammen mit Reedereivereinigungen eine Richtlinie [4], mit der ermittelt werden kann, ob ein Schiff genügend Antriebsleistung besitzt, um sicheres Manövrieren in schwerem Wetter zu gewährleisten. Dabei wurde auch eine Definition von schwerem Wetter vorgeschlagen, siehe Kapitel 2. Damit wurde ein Konflikt im EEDI-Regelwerk geschaffen: einerseits fordert die IMO eine immer weiter sinkende Antriebsleistung und andererseits fordert sie dass eine minimale Antriebsleistung nicht unterschritten werden darf, siehe Kapitel 3.

Die Prognose der Manövrierfähigkeit von Schiffen in schwerem Wetter ist heute nicht als Standard etabliert und vorhandene numerische Verfahren nicht genügend validiert. Modellversuche können nur in wenigen Modellversuchseinrichtungen weltweit durchgeführt werden [19]. Wegen der Komplexität der Aufgabenstellung wurden nur die zwei einfachsten Stufen des nun von IACS und Reedereivereinigungen gemachten Vorschlages [5] (Level 1 - Minimale Antriebsleistung, "Minimum Power Lines" und Level 2 - Einfache Methode zur Ermittlung der Antriebsleistung, "Simplified Assessment") für Massengutschiffe und Tanker und auch nur als Interimslösung bis Ende 2014 eingeführt [6]. Die vorgeschlagene numerische Ermittlung des Zusatzwiderstandes in Wellen nach Level 2 wurde von der IMO aber nicht als Alternative zu Modellversuchen zugelassen. Das ebenfalls ursprünglich vorgeschlagene Vorgehen nach Level 3 (Fortschrittliches Verfahren zur Ermittlung der Antriebsleistung, "Comprehensive Assessment") wurde von der IMO nicht anerkannt. Dieses Verfahren ermittelt die minimale Antriebsleistung unter Beachtung von Mindestgeschwindigkeit und Kurshalten in natürlichen Wellen, siehe Kapitel 5.

## 2 Schweres Wetter

Für wahrscheinlich jedes Schiff kann man Wetterbedingungen definieren, die die Manövrierfähigkeit stark beeinträchtigen würden. Damit bereits steht die IMO vor der Herausforderung bei der Einführung einer neuen Regel im oben genannten Kontext nicht fast alle existierenden Schiffe implizit für unsicher zu erklären. Welche Wetterbedingungen sind also auszuwählen, um die Manövrierfähigkeit von Schiffen zu prüfen?

Ein besonders gut dokumentierter Fall einer Strandung im schweren Wetter ist der des Massengutschiffes Pasha Bulker in Australien im Jahre 2007 [7]. Das Schiff lag auf Reede vor Nobbys Beach, New South Wales, als das Wetter anfang sich zu verschlechtern. Der Wind erreichte Beaufort 9 mit acht Meter hohen Wellen. Nachdem der Anker eingeholt worden war, nahm das Schiff Fahrt auf. Obwohl der Kapitän versuchte das Schiff von der Küste wegzusteuern konnte das Schiff sich nur etwa parallel zur Küste bewegen. Nach einem letzten Drehversuch wurde das Schiff schließlich Richtung Küste getrieben und lief dann auf Grund. Kein anderes der 49 Schiffe, die auch vor Anker lagen, lief auf Grund. Der Bericht macht aber keine Aussage zur Manövrierfähigkeit des Schiffes.

Auf der Basis von wenigen Interviews mit einem Kapitän und des oben beschriebenen Unglücksfalls [7] wurde von der Industrie ein erster Vorschlag zur Definition von schwerem Wetter - als Bedingung für die Prüfung der Manövrierfähigkeit - in die Diskussion bei der IMO eingebracht [4]. Demnach entsprechen die in [7] genannten Wetterbedingungen einer Wiederholperiode von 7 Tagen, wenn man das Wellenklima der IACS [8] für den Nordatlantik als Referenz zugrunde legen würde. Etwa ein Jahr später wurde von der Industrie ein neuer Vorschlag eingereicht, in dem ein Seegang mit geringerer Wellenhöhe definiert wurde [5]. Hintergrund für die Reduzierung der Wellenhöhe waren Untersuchungen der IACS [9], die nahelegten, dass bei der Anwendung der fortschrittlichen Methode, siehe Kapitel 5, und einer signifikanten Wellenhöhe von 6 m, die Ergebnisse im Mittel am besten mit den statistischen Ergebnissen übereinstimmten. In der dann folgenden Korrespondenzgruppe wurden mehrere Vorschläge vorgestellt, die sämtlich die Wellenhöhe weiter reduzierten [10]. Der Vorschlag für eine signifikante Wellenhöhe von 4.0 m für Massengutschiffe und Tanker einer Größe um 20.000 tdw bzw. 200 m Länge basiert auf zwei unabhängigen Untersuchungen. IACS hat die fortschrittliche Methode für ausgewählte Schiffe an der Grenze der minimalen Antriebsleistung nach (2) angewendet, und die Wellenhöhe solange variiert, bis von allen Testschiffen die Anforderungen entsprechend der fortschrittlichen Methode gerade erfüllt waren. Die Delegation von Japan hat das einfache Verfahren zur Ermittlung der Antriebsleistung (Level 2) für kleine Massengutschiffe angewendet, und die Wellenhöhe solange variiert, bis alle Schiffe die Anforderungen dieser Methode erfüllten. Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurde die Wellenhöhe in der Diskussion bei MEPC 65 von der Schiffslänge funktional abhängig gemacht [11]. So gilt der kleinere Wert für Schiffe unter 200 m Länge und der größere Wert für Schiffe über 250 m Länge. Sämtliche Vorschläge sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Seegangsdaten zur Bewertung der Manövrierfähigkeit in schlechtem Wetter

	Auftretens- wahrscheinlichkeit	Wiederhol- periode (Tage)	Seegangs- stärke	Signifikante Wellenhöhe (m)	Wellenperiode (s)	Windstärke (Beaufort)
[4]	0,5%	30	8	9,8	8,5 bis 13,5	10
[4]	2%	7	7	7,5	7,5 bis 14,5	9
[5]	-	2	6	6,0	8,0 bis 15,0	8

[11]	-	-	-	4,0 bis 5,5	7,0 bis 15,0	7-8
------	---	---	---	-------------	--------------	-----

Wenige Informationen liegen vor, die Unfälle wie Kollision und Grundberührung mit Wellendaten verknüpfen. Im EU-geförderten Projekt HARDER wurden die Schadensmeldungen zu Kollision entsprechend ausgewertet [14]. Demnach ereignen sich 99% aller Kollisionen bei signifikanten Wellenhöhen von weniger als 4,5 m. Unter der Annahme, dass relevante Situationen für Manövrieren im schlechten Wetter in Küstennähe auftreten und das Kollisionen auch eher in Küstennähe passieren, kann diese Angabe zur Einordnung von signifikanten Wellenhöhen auch für Manövrieren in schlechtem Wetter genutzt werden.

Abbildung 2 zeigt die Abhängigkeit der vor Anker verbleibenden Schiffe als Funktion der signifikanten Wellenhöhe während eines heraufziehenden Sturms, erstellt basierend auf Angaben in [7]. So waren in diesem Fall bei einer signifikanten Wellenhöhe von 4,5 m noch ca. 80% der Schiffe vor Anker, bei einer signifikanten Wellenhöhe von 6 m dagegen nur noch ca. 20%. Bei der Interpretation dieser Zahlen ist zu berücksichtigen, dass die hier gezählten Schiffe auf Ladung und damit wahrscheinlich ohne Sturmballast warteten. Nach der Entscheidung den Ankerplatz zu verlassen und Richtung offene See zu fahren hat das Füllen der Ballasttanks sicher Zeit gebraucht. Daher wird angenommen, dass die hier aufgeführten signifikanten Wellenhöhen eher größer sind als üblich wenn eine küstennahe Region aus Sicherheitsgründen beim aufziehendem Sturm verlassen wird.

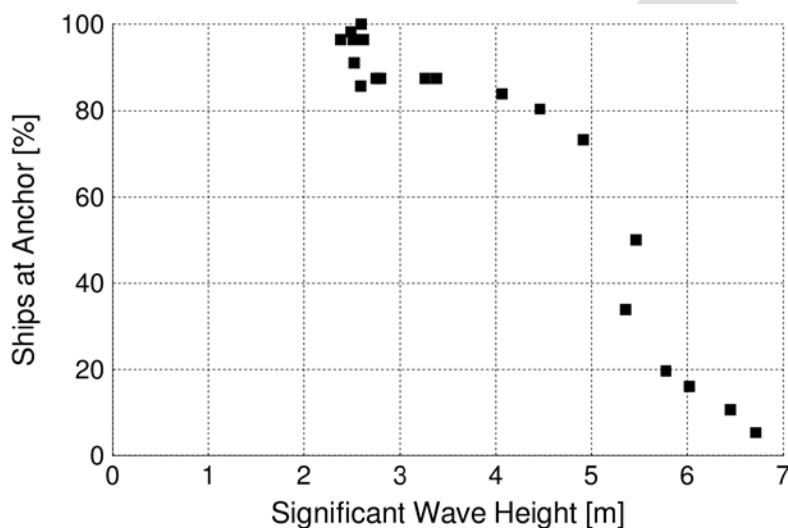


Abb. 2. Abhängigkeit der vor Anker verbleibenden Schiffe von der signifikanten Wellenhöhe während eines aufziehenden Sturms, basierend auf Angaben in [7]

Abschließend kann hier aber keine Empfehlung ausgesprochen werden, welche signifikante Wellenhöhe als Referenz definiert und genutzt werden sollte, um die Manövrierfähigkeit von Schiffen im Seegang zu überprüfen. Sicher sollte zusätzlich zu statistischen Informationen über Wellenhöhen in küstennahen Gebieten auch die Erfahrungen und Beobachtungen von Bord herangezogen werden. Im Rahmen des F&E-Projekts PerSee [17] wird eine solche Befragung des nautischen Personals bis Ende 2013 durchgeführt.

### 3 Minimale Antriebsleistung (Level 1)

Während der Debatte bei der IMO wurde schnell erkannt, dass die aufwendige Berechnung eines jeden neuen Schiffes im Hinblick auf Manövrieren in schwerem Wetter die Fähigkeit der Industrie übersteigen würde, und daher bei der IMO auch keine Akzeptanz finden würde. Daraufhin entwickelte die Industrie sogenannte Linien minimaler Antriebsleistung [5, 9], die als einfache Funktion der Schiffsgröße und des Schiffstyps dargestellt sind. Danach wäre ein neues Schiff mit genügend Antriebsleistung (zum Manövrieren in schwerem Wetter) ausgestattet, wenn es die durch die Linien minimaler Antriebsleistung gestellte Anforderung erfüllt. Die Linien minimaler Antriebsleistung wurden aus den Daten von existierenden Schiffen (gleicher Datensatz wie für die Erstellung der EEDI Referenzlinien) zuerst so abgeleitet, dass 90% dieser Schiffe die neue Anforderung erfüllen würden, siehe Abb. 3 beispielhaft für Massengutschiffe. Diese Methode nimmt also implizit an, dass die zuletzt gebauten Schiffe sicher in schwerem Wetter manövrieren können (ohne dies explizit nachzuweisen).

## Bulk Carriers above 20k DWT

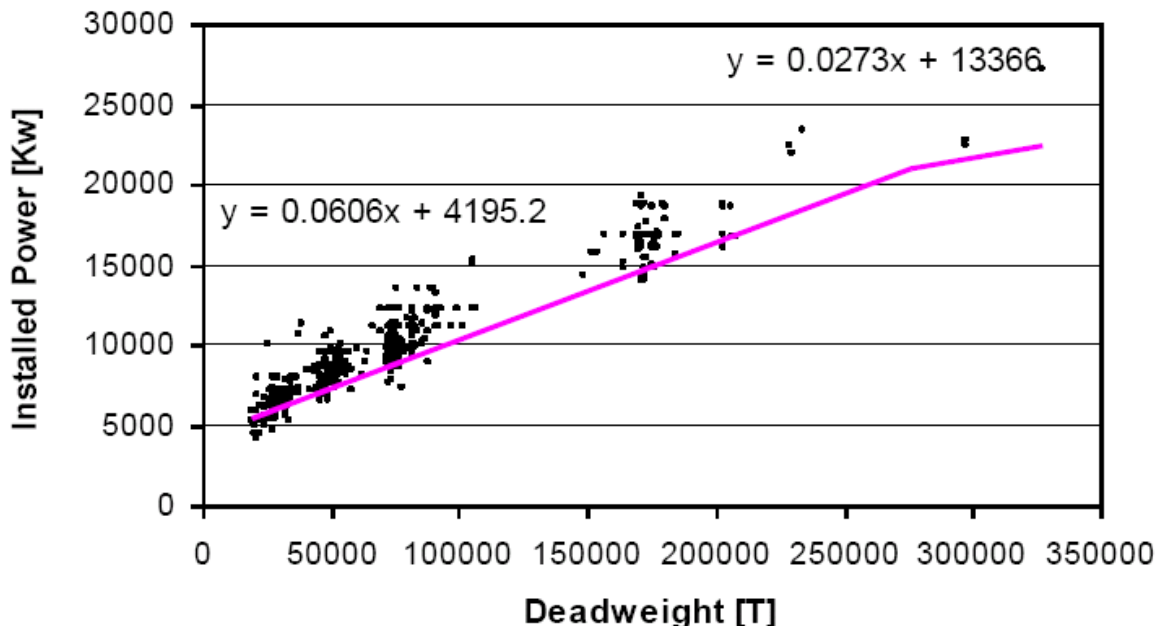


Abb. 3. Ableitung der Linie minimaler Antriebsleistung für Massengutschiffe (Quelle: IACS [9])

Nach Diskussion wurde später der Anteil der Schiffe, die diese neue Anforderung erfüllen, noch erhöht und die Anwendung der Methode zunächst auf Tanker und Massengutschiffe in der Einführungsphase des EEDI beschränkt [12]. Die Anwendung auf andere Schiffstypen in der Einführungsphase wurde mit Hinweis auf deren relativ hohe installierte Antriebsleistung, z.B. bei Containerschiffen, nicht festgelegt. Die minimale installierte Antriebsleistung  $P_{\min}$  berechnet sich als Funktion der Schiffsgröße, DWT, wie in Gleichung (2) dargestellt. Die ursprünglich vorgeschlagene Abschwächung der Forderung für größere Schiffe wurde in der finalen Formulierung nicht übernommen.

$$P_{\min} \geq aa \cdot DWT + b \quad (2)$$

Die Konstanten  $aa$  und  $b$  wurden pro Schiffstyp festgelegt. Für Massengutschiffe gelten z.B.  $aa = 0,0687 \text{ kW/t}$  und  $b = 2924,4 \text{ kW}$ . Die Werte der Konstanten für Tanker und für kombinierte Tanker/Massengutschiffe sind in [12] festgelegt. Der größte Vorteil der Formulierung (2) ist deren leichte Anwendbarkeit. Der größte Nachteil ist dass diese Formulierung die Manövrierfähigkeit der Schiffe nicht berücksichtigt. Testanwendungen der Formel (2) haben gezeigt, dass moderne Schiffe mit leicht gegenüber früheren Schiffen reduzierter Dienstgeschwindigkeit bereits Schwierigkeiten haben die Forderung zu erfüllen. Dieser Effekt trat besonders stark bei mittelgroßen Containerschiffen auf, deren mittlere Dienstgeschwindigkeit sich zuletzt von ca. 24 Knoten auf 21 Knoten reduziert hat. Diese Schiffe unterbieten die EEDI-Anforderung bei weitem, würden aber die Forderung nach minimaler Antriebsleistung nach (2) nicht erfüllen, und damit zu einem aufwendigeren Nachweis entsprechend der in Kapitel 4 beschriebenen Methode verpflichtet sein. Deswegen wurden Containerschiffe aus der Anforderung der minimalen Antriebsleistung für Phase 0 der EEDI-Implementierung nach Diskussion auch ausgeschlossen.

Somit gelten für Tanker und Massengutschiffe seit 1. Januar 2013 zwei Anforderungen im Kontext des EEDI: die nach einem EEDI-Wert kleiner als der Wert der Referenzlinie (1) und die nach minimaler Antriebsleistung (2). Da der EEDI im Wesentlichen eine Funktion der Antriebsleistung  $P$  und der Zuladung DWT ist, ergibt sich hier bei der geplanten weitergehenden Verschärfung der EEDI-Anforderung ein Konflikt. Dieser lässt sich am einfachsten darstellen, wenn die EEDI-Formulierung der Referenzlinie [13] herangezogen wird und die Formulierung für ein Schiff mit weniger als 10.000 kW Antriebsleistung und einer Hauptmaschine ausgewertet wird:

$$EEDI_{\text{estimated attained}} = C_f \cdot \frac{SFC_C \cdot P_{ME}}{DWT \cdot V_{ref}} \quad (3)$$

Hier bezeichnen  $P_{ME}$  die installierte Hauptmaschinenleistung und  $V_{ref}$  die Referenzgeschwindigkeit. Weiter ist der Kohlendioxidfaktor  $C_f = 3,1144 \text{ (gCO}_2/\text{g Brennstoff)}$  und der kombinierte spezifische Brennstoffverbrauch  $SFC_C = 153 \text{ (g Brennstoff /kWh)}$ . Zusammen mit (1) ergibt sich

$$P_{ME} \leq \frac{a DWT^{(1-c)} V_{ref}}{C_f SFC^C} \quad (4)$$

Für ein mittleres Schiff eines Typs und in einer Größenklasse kann  $V_{ref}$  in dieser Betrachtung als konstant angenommen werden. Dann ergibt sich zusammen mit (2) ein Konflikt für die Bestimmung von  $P_{ME}$ . Beide Gleichungen geben Grenzen für  $P_{ME}$  als Funktion von DWT vor. Abbildung 4 zeigt den beschriebenen Konflikt für kleine Massengutschiffe bei einer angenommenen Referenzgeschwindigkeit von 14,34 Knoten (Mittelwert der in IHS Fairplay aufgeführten Daten für Massengutschiffe zwischen 20.000 und 60.000 DWT, abgeliefert ab Januar 2000). Demnach ist die Forderung nach minimaler Antriebsleistung (für kleine Massengutschiffe) zum sicheren Manövrieren spätestens mit der ab 2025 erwarteten Antriebsleistung nicht mehr vereinbar. Das heißt, dass die Vorgaben der IMO im Sinne des Umweltschutzes mit denen zur Sicherheit im Konflikt stehen. Eine Änderung diesbezüglich scheint notwendig.

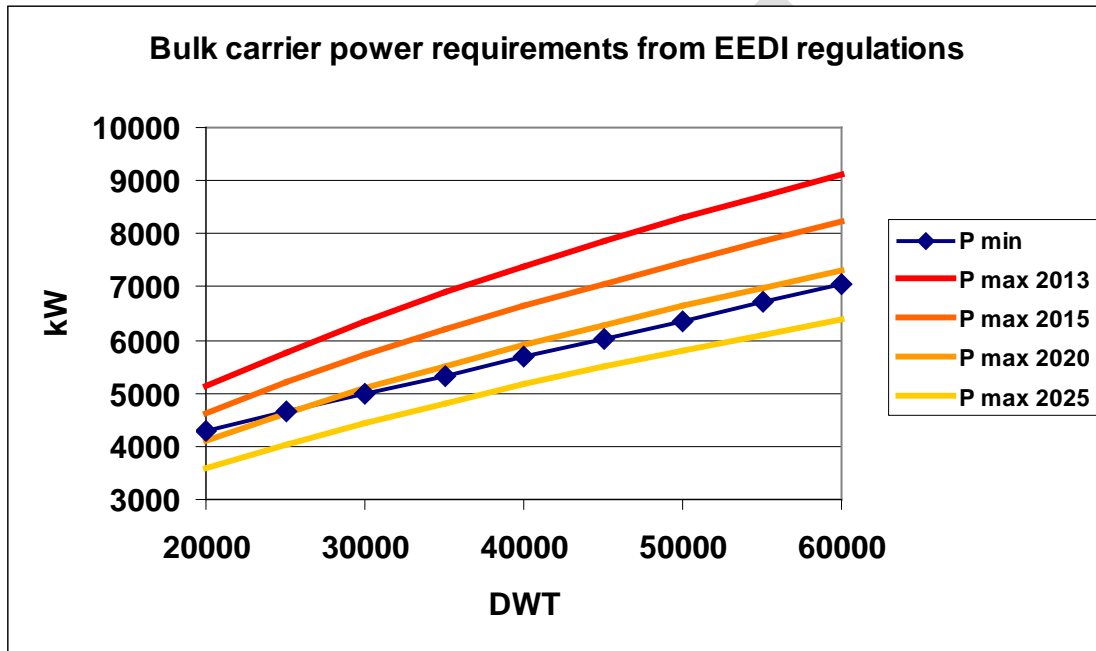


Abb. 4. Geforderte Antriebsleistung PME nach Referenzlinie ( $P_{max}$ ) und Richtlinie für sicheres Manövrieren ( $P_{min}$ ). Beispielhaft für kleine Massengutschiffe bei einer mittleren Referenzgeschwindigkeit von 14,34 Knoten.

Beispielhaft wird für ein kleines Massengutschiff im Folgenden die Methode der minimalen Antriebsleistung angewendet. Die Daten des Schiffes wurden vom Entwurfsbüro SDARI in China zur Verfügung gestellt und sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Hier wird deutlich, dass die installierte Antriebsleistung heute und die nach EEDI-Forderung 2015 maximal erlaubte Antriebsleistung noch über der geforderten Antriebsleistung für sicheres Manövrieren liegen. Die EEDI-Forderungen 2020 und 2025 sind aber, wie bereits in Abb. 3 angedeutet, nicht mehr mit den geforderten minimalen Antriebsleistungen für sicheres Manövrieren vereinbar.

Tabelle 2: Hauptdaten eines kleinen Massengutschiffes

Länge zwischen den Loten	168,0 m	Maximale Motorenleistung MCR	6.300 kW
Breite in der Wasserlinie	28,2 m	Drehrate	2,667 1/s
Konstruktionstiefgang	10,0 m	Propellerdurchmesser	4,75 m
Blockkoeffizient	0,845	Ruderfläche	31,7 m <sup>2</sup>
DWT bei Konstruktionstiefgang	32.000 t	Benetzte Oberfläche	7132 m <sup>2</sup>
Dienstgeschwindigkeit	13,7 Knoten	Seitliche Windangriffsfläche	2118 m <sup>2</sup>
		Frontale Windangriffsfläche	485 m <sup>2</sup>

Tabelle 3: Minimale Antriebsleistung und nach EEDI Forderungen

Installiert	Minimal nach (2)	2015: max. nach (4)	2020: max. nach (4)	2025: max. nach (4)
6.300 kW	5.123 kW	5652 kW	5024 kW	4396 kW

#### 4 Einfache Methode zur Ermittlung der minimalen Antriebsleistung (Level 2)

Die von IMO akzeptierte Methode ist in [5] beschrieben. Grundlegende Annahme ist, dass ein Schiff genügend installierte Antriebsleistung besitzt, wenn es eine geforderte minimale Vorwärtsgeschwindigkeit in definierten Wellen und Wind von vorn erreicht. Dabei wird angenommen, dass diese Fähigkeit auch zum Kurshalten ausreichen würde. Die geforderte minimale Vorwärtsgeschwindigkeit im Wind und Wellen von vorn wird abhängig von der Ruderfläche sowie von der lateralen und frontalen Windangriffsflächen so bestimmt, dass Schiffe mit kleinen Ruderflächen bzw. mit großen lateralen Windangriffsflächen größere Vorwärtsgeschwindigkeit erreichen müssen. Die Methode bestimmt die relevante minimale Vorwärtsgeschwindigkeit, die als Maximum von zwei Geschwindigkeiten (minimale Navigationsgeschwindigkeit und minimale Kurshaltegeschwindigkeit) genommen wird. Die minimale Navigationsgeschwindigkeit liegt bei 4 Knoten und ist so gewählt, dass bei aufkommendem schlechtem Wetter das Schiff sich noch genügend weit von der Küste entfernen können soll. Die minimale Kurshaltegeschwindigkeit wird als Funktion der effektiven Ruderfläche und einer Referenzgeschwindigkeit bestimmt. Die Referenzgeschwindigkeit ist eine Funktion des Blockkoeffizienten und der Windangriffsflächen.

Die Ermittlung der notwendigen Antriebsleistung erfolgt dann bei maximalem Tiefgang des Schiffes aus dem notwendigen Schub  $T$ ,

$$T = (R_{cw} + R_{air} + R_{aw} + R_{app}) / (1 - t) \quad (5)$$

Hier bezeichnen  $T$  den Schub, den der Propeller unter Berücksichtigung des Antriebssystems erbringen muss,  $t$  die Sogziffer,  $R_{cw}$  den Glattwasserwiderstand, berechnet nach ITTC,  $R_{air}$  den Luftwiderstand,  $R_{app}$  den Widerstand der Anhänge und  $R_{aw}$  den Zusatzwiderstand in Wellen. Nach Diskussion bei der IMO wurde der Anhängewiderstand als vernachlässigbar angesehen und soll zunächst nicht berücksichtigt werden. Die notwendige Antriebsleistung  $P_D$  wird dann mit Hilfe der Fortschrittszahl  $J$  ermittelt und mit der vorhandenen Antriebsleistung verglichen, die abhängig von der tatsächlichen Drehrate unter Berücksichtigung der Motordrehmoment-Drehrate-Begrenzung bestimmt wird.

Entscheidend bei dieser Methode ist die korrekte Ermittlung des zusätzlichen Widerstands in Wellen. Hierfür müssen Modellversuche durchgeführt werden, da bislang keine von der IMO akzeptiertes numerisches Verfahren vorhanden ist. Die IMO Entscheidung wurde u.a. durch ein von IACS durchgeführtes Benchmarking der vorhandenen numerischen Tools gestützt, nach dem eine generelle Anwendung von numerischen Methoden im Rahmen von regulatorischen Fragestellungen wie dem EEDI zur Zeit nicht empfohlen werden kann. Tatsächlich stehen numerische Verfahren aber zur Verfügung und deren prognostizierte Driftkräfte wurden zuletzt mehrfach mit Messdaten verglichen. Beispielhaft sind im Folgenden ausgewählte Ergebnisse aus dem Projekt ULYSSES [15] wiedergeben. Für einen mittelgroßen Tanker (Handymax, 180 m Länge) wurden für drei Geschwindigkeiten mit GL Rankine [16] berechnete Driftkräfte mit Messungen von SSPA verglichen, siehe Abb. 5. In allen drei Fällen liefern die Prognosen konservative Maximalwerte.

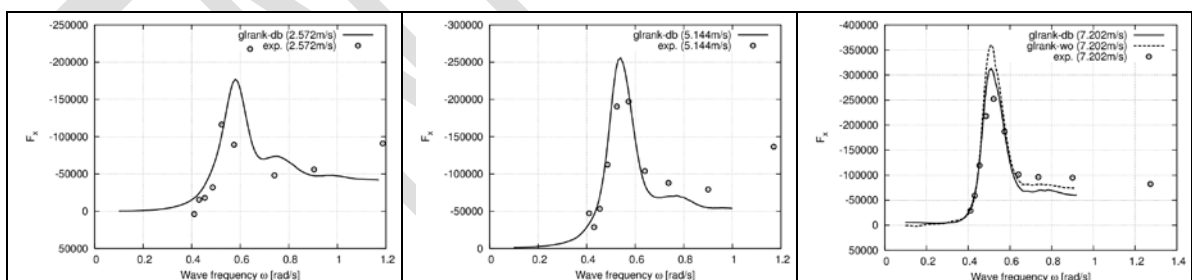


Abb. 5. Zusatzwiderstand für Handymax Tanker [15].

Für das oben eingeführte kleine Massengutschiff sind die Ergebnisse der Anwendung der einfachen Methode in Tabelle 4 für zwei signifikante Wellenhöhen zusammengefasst. Bei der Berechnung des Gesamtwiderstandes wurde der Widerstand der Anhänge vernachlässigt. Die Propellerkoeffizienten  $K_T$  und  $K_Q$  wurden anhand von Standardpropellerdiagrammen ermittelt. Die für eine signifikante Wellenhöhe von 4 m ermittelte notwendige Maschinenausgangsleistung  $P_B$  ist 2.552 kW. Die der tatsächlichen Drehrate in schlechten Wetterbedingungen entsprechende verfügbare Maschinenbremsleistung wurde unter Annahme ihrer quadratischen Abhängigkeit von der Drehrate zu 3.147 kW bestimmt. Wird die nominale Drehrate von 2,667 1/s herangezogen, ergibt sich eine notwendige installierte Leistung von 5.108 kW. Diese liegt unter der erforderlichen Antriebsleistung nach (2) und damit ist der Nachweis einer ausreichenden Antriebsleistung nach Level 2 erfolgt. Hier wird auch deutlich, dass die Level 1 Methode, zumindest für dieses Schiff, nur ein marginal konservatives Ergebnis gegenüber der Level 2 Methode liefert.

Tabelle 4: Ergebnisse der Anwendung der einfachen Methode zur Ermittlung der minimalen Antriebsleistung

	HS=4m	HS=6m
Glattwasserwiderstand [kN]	47,1	47,1
Windwiderstand [kN]	95,9	133,2
Wellenzusatzwiderstand [kN]	172,0	387,0
Gesamtwiderstand [kN]	315,0	567,3
Schub [kN]	417,2	751,4
Notwendige Maschinenausgangsleistung [kW]	2.552	5.526
Verfügbare Maschinenausgangsleistung bei tatsächlicher Drehrate [kW]	3.147	5.042
Verfügbare Maschinenausgangsleistung bei nominaler Drehrate [kW]	5.108	6.904
Minimale Antriebsleistung nach (2)	5.123	5.123
Tatsächliche Installierte Antriebsleistung	6.300 kW	6.300 kW

Bei einer signifikanten Wellenhöhe von 6 m würde das hier untersuchte kleine Massengutschiff die Anforderungen nach der einfachen Methode zur Ermittlung der Antriebsleistung aber nicht erfüllen. Abbildung 6 zeigt die Abhängigkeit des mit dem Quadrat der signifikanten Wellenhöhe normierten Wellenzusatzwiderstandes als Funktion der modalen Wellenperiode für das hier betrachtete kleine Massengutschiff. Der Wellenzusatzwiderstand würde sich demnach von 172 kN auf 387 kN erhöhen, siehe Tabelle 4 Die notwendige Maschinenausgangsleistung würde somit bei 5.526 kW liegen, und damit über der verfügbaren Maschinenausgangsleistung von 5.042 kW, berechnet bei der tatsächlichen Drehrate. Hochgerechnet auf die nominale Drehrate von 2,667 1/s ergibt sich eine notwendige Maschinenausgangsleistung von 6.904 kW, deutlich mehr als installierte Leistung von 6.300 kW bei MCR. Dies zeigt, dass die im Kapitel 2 beschriebenen Wetterbedingungen nach [4] und [5] für das hier untersuchte Beispielschiff als zu schwer anzusehen sind.

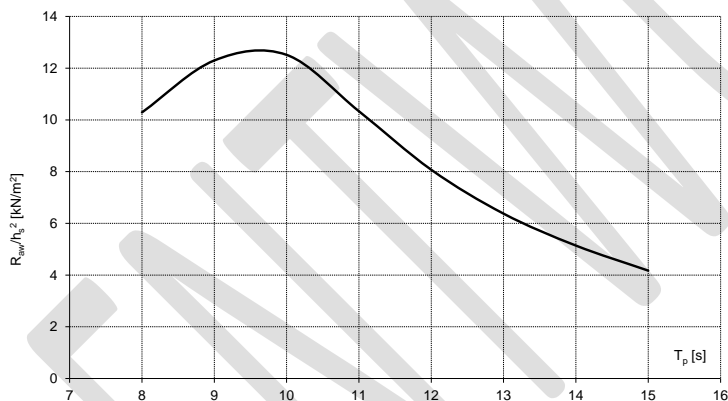


Abb. 6. Zusatzwiderstand pro signifikante Wellenhöhe im Quadrat als Funktion der Modalperiode des Seeganges in kurzkämmigen unregelmäßigen Wellen von vorn (für das in Tabelle 2 beschriebene kleine Massengutschiff)

## 5 Fortschrittliche Methode zur Ermittlung der minimalen Antriebsleistung (Level 3)

Die von IMO nicht akzeptierte fortschrittliche Methode (Level 3 - Comprehensive Assessment) ist in [9] beschrieben. Grundlegende Annahme ist, dass ein Schiff genügend installierte Antriebsleistung besitzt, wenn es eine geforderte minimale Vorwärtsgeschwindigkeit sowie Kurshalten bei Wellen und Wind aus sämtlichen Richtungen erreicht. Die Prozedur erfordert die Lösung von drei gekoppelten stationären Gleichungen für Längs- und Querkräfte sowie das Gierrmoment. Die Gleichungen berücksichtigen Kräfte und Momente für Glattwasser, Wellen, Wind, Ruder und Propeller [15].

Für das oben eingeführte kleine Massengutschiff sind die Ergebnisse der Anwendung der fortschrittlichen Methode in Abb. 7 zusammengefasst. Dabei ist die erforderliche installierte Antriebsleistung ("installed MCR") als Funktion der signifikanten Wellenhöhe dargestellt, aber getrennt für die Anforderungen der Mindestgeschwindigkeit von 4.0 Knoten und des Kurshalten. Zum Vergleich ist die Mindestleistung nach der Methode der minimalen Antriebsleistung (unabhängig von der Wellenhöhe) sowie nach der einfachen Methode berechneten An-



triebsleistungen (für die zurzeit geforderte signifikante Wellenhöhe von 4.0 m sowie - zum Vergleich - für eine signifikante Wellenhöhe von 6.0 m) als horizontale Linien gezeigt.

Die erforderliche Antriebsleistung zum Kurshalten ist für dieses Schiff geringer als die zum Einhalten der Vorwärtsgeschwindigkeit; dies ist typisch für Schiffe mit ausreichender Ruderfläche. Weiterhin wird deutlich, dass die verschiedenen Methoden für das ausgewählte kleine Massengutschiff konsistente Ergebnisse zeigen. So ist die notwendige Antriebsleistung nach der L1-Methode höher als die nach der L2-Methode und diese wiederum höher als die nach der L3-Methode. In Bezug auf die Diskussion on Kapitel 2 zur Definition der Wetterbedingungen zur Ermittlung der notwendigen Antriebsleistung für sicheres Manövrieren kann für das hier untersuchte kleine Massengutschiffe festgestellt werden, dass bei einer signifikanten Wellenhöhe von 4 bis 5 m die Anforderungen der IMO erfüllt werden, dagegen für signifikante Wellenhöhen über 5,3 m nicht (Schnittpunkt der nach Level 3 berechneten notwendigen Antriebsleistung bei einer Vorwärtsgeschwindigkeit von 4 Knoten mit der installierten Antriebsleistung).

Abbildung 7 zeigt auch deutlich wie die von der IMO nun festgelegte signifikante Wellenhöhe von 4 m abgeleitet werden kann. Die anwendbare Wellenhöhe für die Richtlinie der IMO [11] wurde also genau so gewählt, dass die Anforderungen von Level 2 und Level 3 Methoden für die Schiffe gerade an der Grenze der minimalen Antriebsleistung erfüllt werden können (Schnittpunkt der nach Level 3 berechneten notwendigen Antriebsleistung bei einer Vorwärtsgeschwindigkeit von 4 Knoten mit der minimalen Antriebsleistung nach (2)).

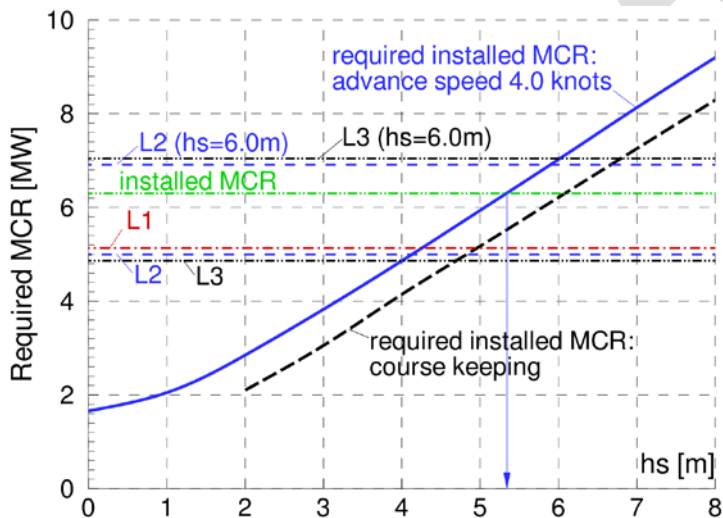


Abb. 7: Anwendung der fortschrittlichen Methode für ein kleines Massengutschiff. L1: notwendige Antriebsleistung nach der Methode der minimalen Antriebsleistung; L2: notwendige Antriebsleistung ermittelt mit der einfachen Methode für zwei signifikante Wellenhöhen; L3: notwendige Antriebsleistung ermittelt mit der fortschrittlichen Methode für zwei signifikante Wellenhöhen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Energy Efficiency Design Index wird einen erheblichen Einfluss auf zukünftige Schiffsentwürfe haben. Die strikten Forderungen nach bis zu 30% geringerem spezifischen  $\text{CO}_2$ -Emissionen für Schiffe, die ab 2025 gebaut werden, können aber auch unerwartete Seiteneffekte mit sich bringen. So ist bei einer immer weiter reduzierten Antriebsleistung sicheres Manövrieren in schlechtem Wetter in Zukunft möglicherweise gefährdet. Hier treffen Forderungen des Umweltschutzes auf Forderungen der Sicherheit. Dieser Konflikt wird in den aktuellen Richtlinien der IMO sichtbar.

Die in diesem Aufsatz gezeigten Beispiele machen deutlich, dass der Definition von "schlechtem Wetter" für die Ermittlung der Manövrierfähigkeit die entscheidende Rolle zukommt. Die anfangs von der Industrie in die Diskussion eingeführten signifikanten Wellenhöhen [4] würden bei der Anwendung sehr wahrscheinlich die meisten existierenden Schiffe als unsicher erscheinen lassen. Auf der anderen Seite sind die nun verankerten Werte [11] nur bei maximal  $H_s=5,5\text{ m}$ , und damit möglicherweise nicht strikt genug um die Manövrierfähigkeit von Schiffen in Zukunft tatsächlich zu gewährleisten.

Damit ergeben sich die folgenden Empfehlungen für weitere Untersuchungen bzw. Entwicklungen:

- Dokumentation von Wellen und Wind in Küstennähe
- Auswertung von Berichten zu kritischen Manövierrisikosituationen

- Weitere Validierung von numerischen Verfahren zur Prognose von Driftkräften inklusive des zusätzlichen Wellenwiderstandes bei kleinen Schiffsgeschwindigkeiten
- Systematische Berechnung von verschiedenen Schiffstypen und -größen

Die oben aufgeführten Entwicklungen werden (teilweise) in zwei neu gestarteten F&E-Projekten mit öffentlicher Förderung durchgeführt: PerSee und SHOPERA. In beiden Fällen sind Konsortien angetreten um die Entwicklung von numerischen Verfahren und deren Validierung für die Prognose der Manövrierfähigkeit von Schiffen in realistischen Seegängen voranzutreiben.

## Danksagung

Die Autoren danken Shanghai Merchant Ship Design & Research Institute (SDARI), die freundlicherweise die Daten eines kleinen Massengutschiffes zur Verfügung gestellt hat. Die hier gemachten Aussagen geben die Meinungen der Autoren wieder und dürfen nicht als die Meinung der Germanischer Lloyd SE verstanden werden.

## Schrifttum

- 1 Dänemark, A mandatory CO2 Design Index for new ships, MEPC 57/4/3, April 2008
- 2 IMO, Calculation of parameters for determination of EEDI reference values, MEPC 62/6/4, January 2011
- 3 IMO, Estimated CO2 emissions reduction from introduction of mandatory technical and operational energy efficiency measures for ships, MEPC 63/INF.2, October 2011
- 4 BIMCO, CESA, IACS, INTERCARGO, INTERTANKO and WSC, Minimum Propulsion Power to Ensure Safe Manoeuvring in Adverse Conditions, MEPC 62/5/19, May 2011
- 5 IACS, BIMCO, INTERCARGO, INTERTANKO and OCIMF, Minimum Propulsion Power to Maintain the Manoeuvrability in Adverse Conditions, MEPC 64/4/13, June 2012.
- 6 IMO, Interim Guidelines for Determining Minimum Propulsion Power to Maintain the Manoeuvrability of Ships in Adverse Conditions, MEPC.232(65), May 2013.
- 7 Australian Transport Safety Bureau, Independent Investigation into the grounding of the Panamanian registered bulk carrier PASHA BULKER on Nobbys Beach, Newcastle, New South Wales, 8 June 2007, ATSB TRANSPORT SAFETY INVESTIGATION REPORT, Marine Occurrence Investigation No. 243, 2008
- 8 Standard Wave Data, IACS Recommendation 34, November 2001.
- 9 IACS, Background information to document MEPC 64/4/13, MEPC 64/INF.7, July 2012.
- 10 Japan, Air Pollution and Energy Efficiency - Report of the Correspondence Group, MEPC 65/4/3, February 2013.
- 11 IMO, 2013 INTERIM GUIDELINES FOR DETERMINING MINIMUM PROPULSION POWER TO MAINTAIN THE MANOEUVRABILITY OF SHIPS IN ADVERSE CONDITIONS, Resolution MEPC.232(65), May 2013.
- 12 IMO, Interim Guidelines for Determining Minimum Power to Maintain Manoeuvrability of Ships in Adverse Conditions, MSC-MEPC.2/Circ.11, December 2012
- 13 IMO, Calculation of parameters for determination of EEDI reference values, MEPC 62/6/4/Corr.1, Februar 2011
- 14 HARDER, Final Publishable Report, August 2003.
- 15 Germanischer Lloyd, Seakeeping and Manoeuvring of the 2020 Hull, ULYSSES report D7.2, Mai 2013, vertraulich.
- 16 Söding, H., Shigunov, V., Schellin, T.E. und el Moctar, Ould, A Rankine Panel Method for Added Resistance of Ships in Waves, Proceedings ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2012, Rio de Janeiro, Brazil, July 2012.
- 17 PerSee - Performance von Schiffen im Seegang; Vorhaben: Erforderliche Leistung und erreichbare Geschwindigkeit in schwerer See (Min Power), Forderkennzeichen: 03SX339H, Sept. 2012.
- 18 SHOPERA - Energy Efficient Safe Ship Operation, GA number 605221, October 2013
- 19 ITTC, The Manoeuvring Committee, Final Report and Recommendations to the 25th ITTC, 2008