

# Hydrodynamische Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches im Schiffsbetrieb

## Hydrodynamic Measures for Reducing Energy Consumption during Ship Operation

Dipl.-Ing. **Friedrich Mewis**

HSVA Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt

Dr.-Ing. **Uwe Hollenbach**

HSVA Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt

**Zusammenfassung:** Unter dem Druck steigender Treibstoffkosten steigt das Interesse an Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauches an Bord von Schiffen stark an. Der größte Energieverbraucher an Bord von Schiffen ist die Antriebsanlage. Durch eine Reduzierung hydrodynamischer Verluste kann der Energieverbrauch der Antriebsanlage reduziert werden. In diesem Artikel werden die unterschiedlichen hydrodynamischen Verlustarten beschrieben und mögliche Maßnahmen zur Verringerung dieser Verluste werden diskutiert.

In der Entwurfsphase können die wirkungsvollsten Maßnahmen getroffen werden, um Energie einzusparen. Dazu zählen die Festlegung der Hauptabmessungen und des Generalplans, die Definition des Propulsionsorgans und die Festlegung einer vernünftigen Geschwindigkeit. In der Konstruktionsphase kann ein ausgefeilter und optimierter Linienentwurf zu weiteren Einsparungen beitragen. Während sich CFD Methoden zur Optimierung der Schiffsform bewährt haben, ist zur Optimierung der Propulsionsorgane immer noch der Modellversuch erste Wahl. Und auch in der Betriebsphase eines Schiffes sind durch geeignete Maßnahmen noch nennenswerte Einsparungen zu realisieren.

Die verschiedenen möglichen hydrodynamischen Maßnahmen werden diskutiert und typische zu erwartenden Gewinne werden angegeben.

**Summary:** Under the pressure of rising fuel oil costs the interest in measures reducing energy consumption on board ships is rapidly increasing. The largest energy consumer on board ships is the main propulsion plant. By reducing hydrodynamic losses, the energy requirement of the propulsion plant can be decreased. In this article the different hydrodynamic losses are described and possible measures for reducing these losses are discussed.

The most effective measures for reducing the energy consumption can be taken in the concept phase of the vessel. These are primarily the choice of the main dimensions and the adoption of the general arrangement, the definition of the propulsor and the selection of a suitable design speed. Further savings can be achieved during the design phase of the ship by implementing an effective and optimised lines design. While CFD methods today are a proven tool for optimisation of the hull form, for optimising the arrangement of the propulsor model testing methods are still the first choice. Even later in the operational phase of a ship there are suitable measures for reducing energy consumption to a certain degree.

The different possible hydrodynamic measures are discussed and typical savings which can be expected by each measure are presented.

## 1 Einleitung

Unter dem Druck steigender Treibstoffkosten steigt das Interesse von Reedern und Charterern an Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauches an Bord von Schiffen stark an. Die Kosten für Treibstoff haben zwischenzeitlich ein Level erreicht, dass die Brennstoffkosten die Personalkosten als den bis dato teuersten Posten bei den Betriebskosten abgelöst haben.

Der bei weitem größte Verbraucher von Treibstoff an Bord von Handelsschiffen ist die Antriebsanlage. Daher konzentrieren wir uns in diesem Artikel auf hydrodynamische Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches im Schiffsbetrieb.

## 2 Verlustanalyse

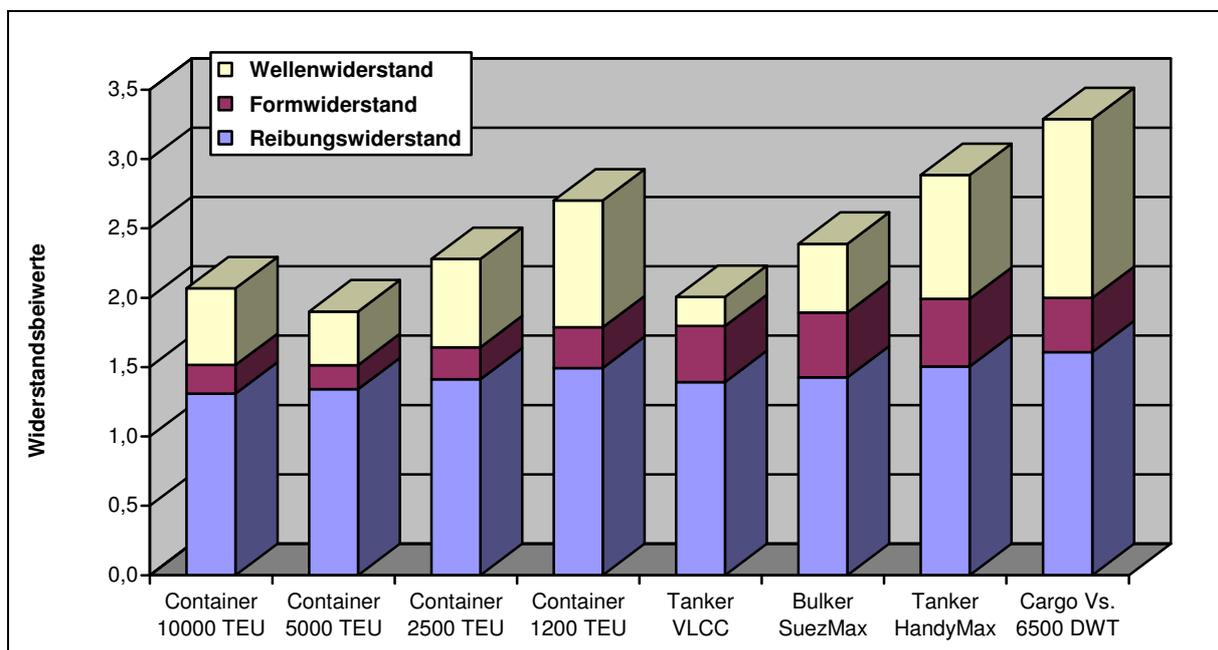
Bevor wir uns mit möglichen Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches befassen können, müssen wir uns erst einmal darüber klar werden, wo wir die Antriebsleistung überhaupt verbrauchen.

### 2.1 Widerstand des Schiffes

Der Schiffswiderstand im glatten Wasser teilt sich im Wesentlichen in drei Anteile auf: den Reibungswiderstand, den Formwiderstand und den Wellenwiderstand. Hinzu kommen unter Servicebedingungen ein Zusatzwiderstand im Seegang und der Windwiderstand.

#### Widerstand im Glattwasser

In der folgenden Abbildung 1 sind, wegen der besseren Vergleichbarkeit, die dimensionslosen Widerstandsbeiwerte der Glattwasserwiderstandsanteile verschiedener Containerschiffsklassen sowie die entsprechenden Werte von volligeren Schiffen wie Tankern, Bulkern und Mehrzweckfrachtern unterschiedlicher Größe gegenübergestellt.



**Abb. 1** – Vergleich der Glattwasserwiderstandsanteile

Generell hat der Reibungswiderstand bei allen gezeigten Schiffstypen und Schiffsgößen den größten Anteil am Glattwasserwiderstand. Bei sehr großen, langsamen Schiffen wie dem VLCC ist der Formwiderstand der zweitgrößte Widerstandsanteil, bei allen übrigen Schiffstypen ist dies der Wellenwiderstand.

Vergleicht man zunächst die Containerschiffe untereinander stellt man fest, dass sowohl der Form- als auch der Wellenwiderstand ein Minimum beim 5000 TEU Containerschiff hat, alle

anderen Containerschiffsklassen haben höhere Form- und Wellenwiderstandsanteile. Dies ist darin begründet, dass das 5000 TEU Containerschiff als sogenanntes PanMax Containerschiff maximal eine Breite von 32.2 m aufweisen kann und damit auf ein Längen/Breiten-Verhältnis von etwa  $L/B = 8.8$  kommt. Alle übrigen Containerschiffsklassen haben kleinere Längen/Breiten-Verhältnisse und müssen daher ungünstigere Form- und Wellenwiderstandsbeiwerte haben. Bei den kleineren Containerschiffen kommt hinzu, dass diese für ihre Länge verhältnismäßig schneller fahren als die großen Containerschiffe. Daher steigt bei den kleineren Containerschiffen der Wellenwiderstandsanteil vergleichsweise stark an.

Bei den völligen Schiffen ist auffällig, dass der VLCC als einziger Schiffstyp einen größeren Formwiderstandsbeiwert hat als der Wellenwiderstandsbeiwert. Das liegt daran, dass der VLCC im Vergleich zu seiner Länge sehr langsam fährt und, außer der Bugwelle, praktisch keine eigenen Wellen erzeugt. Beim VLCC ist der Wellenwiderstandsanteil daher fast vernachlässigbar klein. Alle hier untersuchten völligen Schiffe haben einen Blockkoeffizienten von etwa  $CB=0.8$ . Der Bulker liegt mit  $CB=0.85$  darüber, ebenso wie der HandyMax mit  $CB=0.82$ . Man sieht, dass der Formwiderstandsanteil mit zunehmender Völligkeit ansteigt. Wie bei den Containerschiffen steigt der Wellenwiderstandsanteil bei kleiner werdender Schiffsgröße stark an. Ursache ist wiederum die, bezogen auf ihre Länge, deutlich größere Geschwindigkeit der kleineren Schiffe, verglichen mit den großen Schiffen.

Bei dem kleinen Cargo-Vessel ist der Wellenwiderstand fast so groß wie der Reibungswiderstand. Dieses Schiff operiert bereits in einem Bereich der Widerstandskurve, die steil ansteigt und der Betrieb des Schiffes bei dieser Geschwindigkeit ist aller Wahrscheinlichkeit nach unwirtschaftlich. Bei diesem Schiff sind durch eine Verringerung der Dienstgeschwindigkeit größere Leistungseinsparungen zu erwarten, als bei den anderen Schiffen.

Mit Änderungen der Hauptabmessungen oder mit einer Optimierung der Schiffsförm können wir die Formwiderstandsbeiwerte und die Wellenwiderstandsbeiwerte beeinflussen. Darüber hinaus sind die Wellenwiderstandsbeiwerte stark geschwindigkeitsabhängig. Formänderungen auf Basis von CFD Berechnungen oder Modellversuchen gehören zur täglichen Arbeit von Versuchsanstalten. Obwohl durch Änderungen der Hauptabmessungen oder der Geschwindigkeit größere Einsparungen realisiert werden können als durch die reine Formoptimierung wird diese Möglichkeit ausgesprochen selten diskutiert. Ursache ist, dass die Versuchsanstalten meist erst zu einem Zeitpunkt in die Projektentwicklung einbezogen werden, wenn Änderungen der Hauptabmessungen zu kostenintensiv oder gar nicht mehr möglich sind.

Der Reibungswiderstand ist von der benetzten Oberfläche des fahrenden Schiffes abhängig, sowie von der Oberflächenrauigkeit. Vergleicht man die benetzte Fläche von Ausgangsformen und optimierten Formen stellt man fest, dass die optimierte Form in der Regel eine etwas größere benetzte Fläche aufweist. Versuche die benetzte Fläche zu minimieren sind also aller Wahrscheinlichkeit nach kontraproduktiv, da sie den Widerstand insgesamt nicht verringern werden.

Die Rauigkeit des Schiffskörpers kann durch glatte Anstrichsysteme in Verbindung mit optimalen Fertigungsbedingungen reduziert werden. Über die Größe möglicher Einsparpotentiale gibt es in der Literatur allerdings abweichende Angaben. So liefern Formeln für die Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit von Collatz (HSVA) nur etwa halb so große Einsparpotentiale wie entsprechende Formeln der ITTC.

Weiterhin dürften Außenhautbeulen und Schweißnähte einen Einfluss auf den Widerstand haben. Allerdings gibt es hierzu derzeit keine systematischen Untersuchungen, die eine Bewertung solcher Fertigungstoleranzen ermöglichen würde.

## Widerstand durch Wind und Seegang

Unter Service Bedingungen können die Widerstandsanteile durch Wind und Seegang einen nennenswerten Anteil am Gesamtwiderstand haben. Für die Leistungsprognosen von Service Bedingungen wird von den Werften üblicherweise ein pauschaler Zuschlag in Höhe von 15% auf die Glattwasserwerte der Antriebsleistung vorgeschlagen. Dieser Zuschlag wird „Sea-Margin“ genannt und soll den erhöhten Leistungsbedarf unter Servicebedingungen abdecken.

In der folgenden Abbildung 2 ist für die bereits zuvor untersuchten Schiffstypen und Größen der Zusatzwiderstand für Seegang 4 (entsprechend einer signifikanten Wellenhöhe von 2 m) und für Wind Beaufort 5 (entsprechend einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s) bezogen auf den jeweiligen Glattwasserwiderstand und für Fahrt direkt gegen Wind und Seegang angegeben.

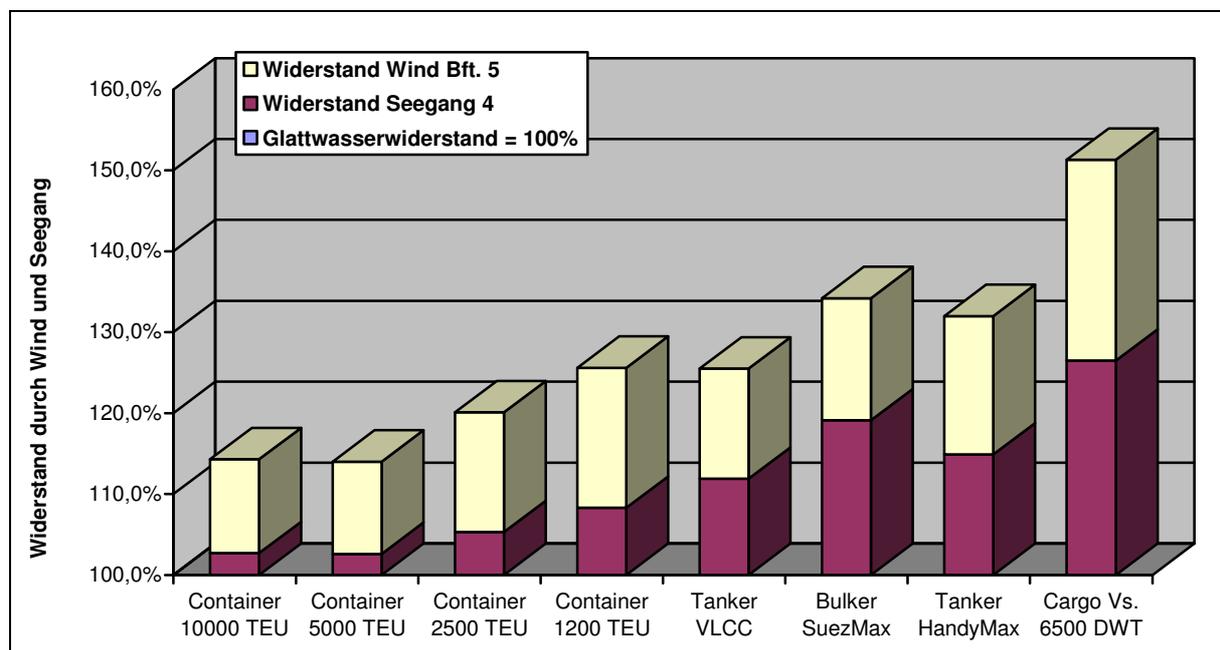


Abb. 2 – Zusatzwiderstand durch Wind und Seegang

Für die verschiedenen Schiffstypen und Größen liegt der Zusatzwiderstand für die untersuchten Service Bedingungen zwischen 15% und 50%. Für die großen Containerschiffe (PanMax und Post-PanMax) wäre also für diese Service Bedingungen eine „Sea-Margin“ von 15% ausreichend, während für alle anderen untersuchten Schiffstypen und Größen eine „Sea-Margin“ von 15% für die hier untersuchten Service Bedingungen nicht ausreichend ist.

Der Widerstandszuwachs durch den Seegang 4 ist bei den großen Containerschiffen mit etwa 3% sehr gering. Bei den kleineren Containerschiffen beträgt er auf etwa 8%. Beim VLCC beträgt der Widerstandszuwachs in diesem Seegang etwa 12% und bei dem kleinen Cargo-Vessel steigt er auf etwa 26% an (jeweils bezogen auf den Glattwasserwiderstand).

Ein dominanter Einflussfaktor für den Widerstandszuwachs im Seegang ist offensichtlich das Verhältnis Schiffsgröße zu Wellenhöhe. Während die großen Containerschiffe durch den Seegang 4 kaum beeinflusst werden, hat er bei den kleineren Containerschiffen bereits einen merklichen Einfluss. Sehr viel deutlicher ist der Zusatzwiderstand im Seegang bei den hier untersuchten Tanker und Bulkern. Trotz der viel kleineren Geschwindigkeit weisen diese Schiffe durch den größeren Blockkoeffizienten und die größere Schiffsbreite sogar in dem moderaten Seegang 4 einen wesentlich stärkeren Widerstandszuwachs auf.

Der Widerstandszuwachs durch den Wind von Beaufort 5 liegt bei den Containerschiffen zwischen 11% und 17%, und bei den volligeren Schiffen zwischen 14% und 25%. Wie beim Seegang gehören die größeren Zuschläge zu den kleineren Schiffen und umgekehrt.

## 2.2 Verluste hinter dem Schiff und am Propeller

Um den Schiffswiderstand zu überwinden hat jedes Schiff einen Propulsor. Bei den üblichen Handelsschiffen ist dies ein Propeller, der am Heck des Schiffes angeordnet ist.

Jeder Propulsor, und damit auch jeder Propeller, hat Verluste bei der Umwandlung der Leistung der Antriebsmaschine in Schub. Die Verluste des Propellers setzen sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

1. Axiale Austrittsverluste im Propellerstrahl (idealer Wirkungsgrad)
2. Reibungsverluste an den Propellerflügeln
3. Verluste aus der Propellerstrahlrotation
4. Verluste durch Naben- und Spitzenwirbel

Nach der einfachen Strahltheorie, die eine reibungsfreie Flüssigkeit und eine unendliche Flügelzahl voraussetzt, ergeben sich aus dem Impulssatz der ideale Wirkungsgrad  $\eta(i)$ , der nur die axialen Austrittsverluste berücksichtigt. Diese axialen Austrittsverluste im Propellerstrahl sind umso größer, je höher der Propeller belastet ist, d.h. je größer der Schubbelastungsgrad ist:

$$C_{Th} = T / (\rho/2 * V_A^2 * \pi * D^2/4)$$

$$\eta(i) = 2 / (1 + \sqrt{1+C_{Th}})$$

Alle übrigen Verluste auf Grund von Reibung und Wirbelbildung sind für optimale Propeller in der Größe fast unabhängig vom Schubbelastungsgrad  $C_{Th}$ . Den Zusammenhang zwischen Verlusten und Schubbelastungsgrad  $C_{Th}$  und typische Arbeitsbereiche bei verschiedenen Schiffstypen zeigt die folgende Abbildung 3:

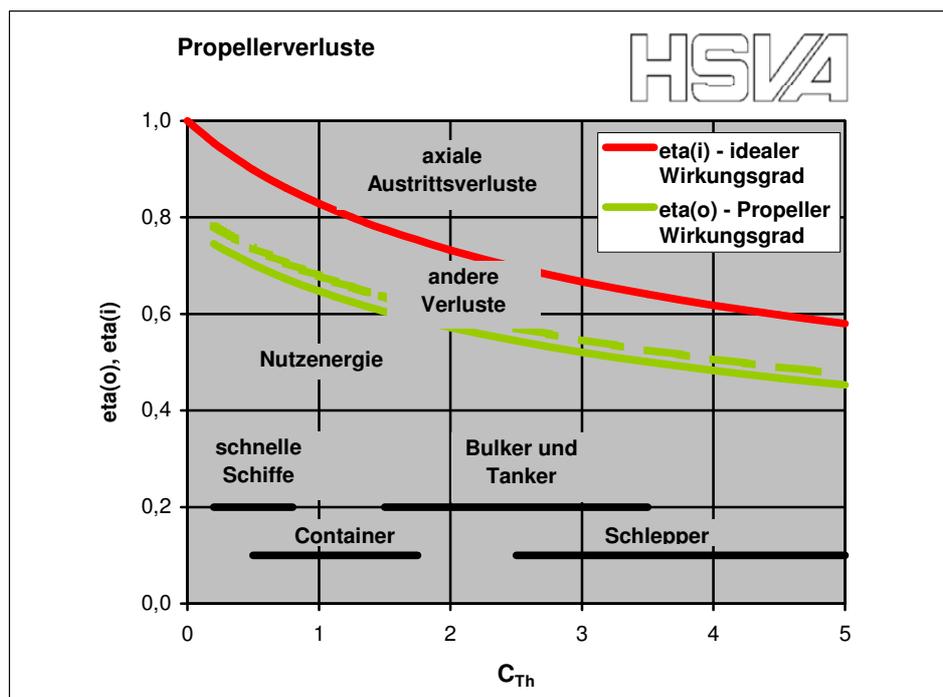
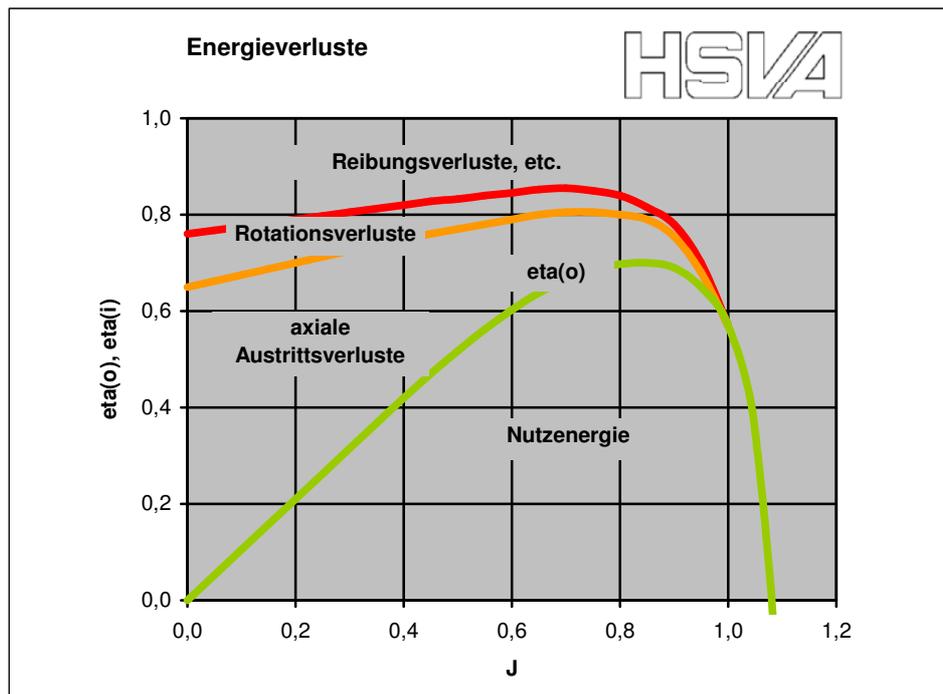


Abb. 3 – Propellerverluste in Abhängigkeit des Schubbelastungsgrades  $C_{Th}$

Für einen typischen Containerschiffspropeller ergeben sich im Arbeitspunkt von  $J = 0.7$ , einem  $C_{Th} = 0.8$  bei einem Wirkungsgrad von  $\eta(o) = 0.68$  etwa die folgenden Verluste:

1. Axiale Austrittsverluste im Propellerstrahl von etwa 17%,
2. Reibungsverluste an den Propellerflügeln von etwa 6%,
3. Verluste aus der Propellerstrahlrotation von etwa 4%,
4. Verluste im Nabenwirbel von etwa 2% und im Spitzenwirbel von etwa 3%.

Den Zusammenhang zwischen Verlusten und Fortschrittsziffer in dem o.g. Arbeitspunkt eines typischen Containerschiffspropellers zeigt die folgende Abbildung 4:



**Abb. 4** – Energieverluste des arbeitenden Propellers, nach Peters und Mewis (1986)

Aus den axialen Austrittsverlusten und den Rotationsverlusten des Propellerstrahls und den Verlusten des Nabenwirbels lassen sich mit Hilfe von propulsionsverbessernden Maßnahmen Energie zurückgewinnen. Als Richtwert kann man davon ausgehen, dass etwa die Hälfte der oben genannten Wirbelverluste zurück gewonnen werden kann. Die Reibungsverluste am Propeller lassen sich entweder durch eine besonders gute Oberflächengüte der Propeller oder durch eine kleine Propellerblattfläche minimieren. Die Blattfläche kann jedoch nur verkleinert werden, wenn das Nachstromfeld eine besonders gute Qualität hat und keine besonderen Anforderungen aus der Kavitation zur Vermeidung von Erosion oder zur Reduzierung von Druckimpulsen existieren. Eine dauerhafte Einsparung durch eine besonders gute Oberfläche setzt voraus, dass der Propeller auch im Service regelmäßig überwacht und gepflegt wird.

Obwohl es für den Laien widersinnig scheinen mag, den Propeller im gestörten „Nachstrom“ des Schiffes anzuordnen, hat dies durchaus Vorteile in Bezug auf die Antriebsleistung. Einerseits übt der Propeller einen „Sog“ auf den Schiffskörper vor ihm aus, der als eine Vergrößerung des Widerstandes angesehen werden kann, andererseits profitiert der Propeller von der verlangsamten Strömung im „Nachstrom“ des Schiffes. Um den gleichen Schub zu erzeugen wie in ungestörter Zuströmung, muss das Wasser nämlich weniger stark beschleunigt werden. Bei Einschraubenschiffen führen die Wechselwirkungen zwischen Schiff, Propeller und Ruder zu einer Verbesserung des Propulsionsgütes.

In der folgenden Tabelle 1 sind für die bereits zuvor untersuchten Schiffstypen und Größen der Propellerwirkungsgrad und der Gewinn im Wirkungsgrad, der sich aus der Anordnung hinter dem Schiff ergibt (Schiffseinflussgrad), gezeigt.

	Container 10000TEU	Container 5000TEU	Container 2500TEU	Container 1200TEU	Tanker VLCC	Bulker SuezMax	Tanker HandyMax	Cargo 6500 tdw
Leistung am Motor	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Mechanische Verluste	-1 %	-1 %	-1 %	-1 %	-1 %	-1 %	-1 %	-3 %
Propeller Verluste	-33 %	-32 %	-30 %	-36 %	-42 %	-40 %	-45 %	-40 %
Schiffseinflussgrad	+6 %	+7 %	+8 %	+15 %	+13 %	+15 %	+12 %	+9 %
Gesamt Verluste	-28 %	-26 %	-23 %	-22 %	-30 %	-26 %	-34 %	-34 %
Leistung effektiv	72 %	74 %	77 %	78 %	70 %	74 %	66 %	66 %

**Tabelle 1** – Verluste hinter dem Schiff und effektive Leistung

Für die verschiedenen Schiffstypen und Größen liegen die Propellerverluste zwischen 30% und 45%, d.h. der Propeller kann effektiv, je nach Schiffstyp und Größe, zwischen 55% und knapp 70% der Antriebsleistung als Schub ins Wasser bringen. Gewinne aus dem Schiffseinfluss führen zu einem Propulsionsgütegrad zwischen etwa 65% und knapp 80%.

### 3 Maßnahmen während der Entwurfsphase

In der Entwurfsphase eines Schiffsneubauprojektes definiert der Reeder seine Anforderungen an das Neubauprojekt bezüglich Geschwindigkeit und Tragfähigkeit und ggf. weiterer Leistungsdaten in einer Anfragespezifikation.

Daraufhin unterbreitet die Bauwerft dem Reeder ein technisches und kommerzielles Angebot für das Neubauprojekt mit einem Vorschlag für Hauptabmessungen, Generalplan und technischer Spezifikation.

Der Reeder seinerseits überprüft nun, ob der angebotene Neubau für die fragliche Transportaufgabe bei den erwarteten Einnahmen und Kosten wirtschaftlich betrieben werden kann bzw. welches der angebotenen Neubaukonzepte voraussichtlich den größten Gewinn erwirtschaften wird.

Interessanterweise sind viele Reeder heutzutage bereits in dieser frühen Phase nicht mehr daran interessiert, den Schiffsentwurf zu optimieren und die Brennstoffkosten zu minimieren. Nach Aussage der Reeder liegen in diesen Fällen die zu erwartenden Chartereinnahmen bereits fest, die anfallenden Brennstoffkosten übernimmt der Charterer, und der Reeder kann seinen Gewinn nur noch maximieren, indem er die Bauskosten des Schiffes minimiert – eine Minimierung des Brennstoffverbrauches bringt diesen Reedern keinerlei wirtschaftlichen Vorteil mehr.

Diese fatale Entwicklung führt bei vielen Neubauprojekten zu Schiffsentwürfen, bei denen ausschließlich die Neubaukosten minimiert werden, deren Gesamtentwurf und Gesamtwirtschaftlichkeit von einem möglichen Optimum jedoch weit entfernt ist.

#### Festlegung optimaler Hauptabmessungen

Bereits zur Festlegung optimaler Hauptabmessungen sollten die in den Versuchsanstalten gesammelten Erfahrungen genutzt werden, d.h. schon in einer frühen Phase des Schiffsentwurfes sollte die Versuchsanstalt einen gründlichen Check der Hauptabmessungen, der Schiffslinien und der Ruder/Propeller Anordnung des Projektschiffes durchführen.

## Hydrodynamische Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches im Schiffsbetrieb

STG Sprechtag „Möglichkeiten der Energieeinsparung im Schiffsbetrieb“ am 22. März 2007 in Hamburg

Die HSVA bietet ihren Kunden zu diesem Zweck den „Quick-Check“ an, mit dessen Hilfe die Hauptabmessungen eines Projektschiffes mit Vergleichsschiffen der HSVA Datenbank verglichen werden. Weiterhin werden im Rahmen des „Quick-Check“ der erforderliche Leistungsbedarf im glatten Wasser und im Seegang ermittelt, sowie die zu erwartenden hydrodynamischen Eigenschaften in Bezug auf Seegang, Manövrieren und Kavitation abgeschätzt und mögliche Problemfelder identifiziert.

Insbesondere durch enge Zusammenarbeit zwischen Reederei, Bauwerft und Versuchsanstalt könnten durch eine Variation der Hauptabmessungen bei vielen Projekten zweistellige Leistungseinsparungen realisiert werden, wenn der Reeder im Gegenzug bereit ist, für das längere, schlankere Schiff einen entsprechend höheren Baupreis zu akzeptieren.

Als Beispiel für mögliche Leistungseinsparungen durch Variation der Hauptabmessungen haben wir dies an einem typischen HandyMax Tanker untersucht. Dieser Schiffstyp wird weltweit z. Zt. in großer Stückzahl gebaut und befördert Ölprodukte auf Mittel- oder Langstrecken (z.B. von russischen Ostseehäfen in die USA). Als Randbedingungen bei der Variation der Hauptabmessungen wurden die Geschwindigkeit  $V$ , der Tiefgang  $T$ , die Tragfähigkeit  $DW$  und das Ladetankvolumen  $TK$  konstant gehalten. Der Blockkoeffizient  $CB$  und die Schiffsbreite  $B$  wurden variiert. Die abgeschätzte Leistung, erforderlich für die gewünschte Dienstgeschwindigkeit von 15 kn, gilt für Seegang 4 und Wind Beaufort 5.

In der folgenden Tabelle 2 sind die Hauptabmessungen des untersuchten HandyMax Tankers als Ausgangsvariante (Baseline), die Hauptabmessungen der untersuchten Varianten sowie die errechneten Antriebsleistungen angegeben:

	Baseline	Vers. 1.1	Vers. 1.2	Vers. 1.3	Vers. 1.4	Vers. 2.1	Vers. 2.2	Vers. 2.3	Vers. 2.4
LPP [m]	175.00	180.50	185.00	190.00	195.20	194.20	199.20	204.60	210.20
B [m]	32.20	32.20	32.20	32.20	32.20	30.00	30.00	30.00	30.00
H [m]	18.20	17.70	17.30	17.00	16.70	17.50	17.10	16.80	16.55
T [m]	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00
CB [-]	0.825	0.800	0.780	0.760	0.740	0.800	0.780	0.760	0.740
DW [t]	49,000	49,000	49,000	49,000	49,000	49,000	49,000	49,000	49,000
TK [m <sup>3</sup> ]	53,000	53,000	53,000	53,000	53,000	53,000	53,000	53,000	53,000
V [kn]	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
PD [kW]	9,700	8,900	8,250	7,800	7,650	8,000	7,550	7,300	7,150
	100%	92%	85%	80%	79%	82%	78%	75%	74%

**Tabelle 2** – Variation der Hauptabmessungen zur Optimierung der Antriebsleistung

Man sieht, dass man bereits bei einer kleinen Änderung der Hauptabmessungen (5 m größere Länge) etwa 8% der erforderlichen Antriebsleistung sparen kann. Radikalere Änderungen der Hauptabmessungen, in dem das Schiff deutlich länger und schlanker gemacht wurde, lassen in diesem Beispiel Einsparungen von bis zu 25% erwarten.

### Festlegung der Geschwindigkeit

An den in der Verlustanalyse untersuchten Schiffstypen und Größen haben wir gesehen, dass der Wellenwiderstand stark von den Hauptabmessungen und der Schiffsgeschwindigkeit beeinflusst wird. Während die großen, schlanken Containerschiffe nur einen geringen Wellenwiderstandsanteil aufwiesen, wird dieser mit größerer Breite, größerer Völligkeit und kleiner werdender Schiffsgröße immer größer. Je größer der Wellenwiderstandsanteil ist, desto größer sind mögliche Einsparungen durch eine Reduktion der Dienstgeschwindigkeit.

In der folgenden Tabelle 3 sind die Einsparungen angegeben, die man durch eine Reduktion der Dienstgeschwindigkeit um 5% für die verschiedenen Schiffstypen erwarten kann:

	Container 10000TEU	Container 5000TEU	Container 2500TEU	Container 1200TEU	Tanker VLCC	Bulker SuezMax	Tanker HandyMax	Cargo 6500 tdw
Dienstgeschwindigkeit	25.5 kn	24.5 kn	22.0 kn	19.0 kn	15.5 kn	14.5 kn	15.0 kn	14.5 kn
Geschwindigkeit -5%	24.2 kn	23.3 kn	20.9 kn	18.1 kn	14.7 kn	13.8 kn	14.3 kn	13.8 kn
<b>Einsparung</b>	<b>17 %</b>	<b>16 %</b>	<b>18 %</b>	<b>19 %</b>	<b>13 %</b>	<b>13 %</b>	<b>16 %</b>	<b>19 %</b>

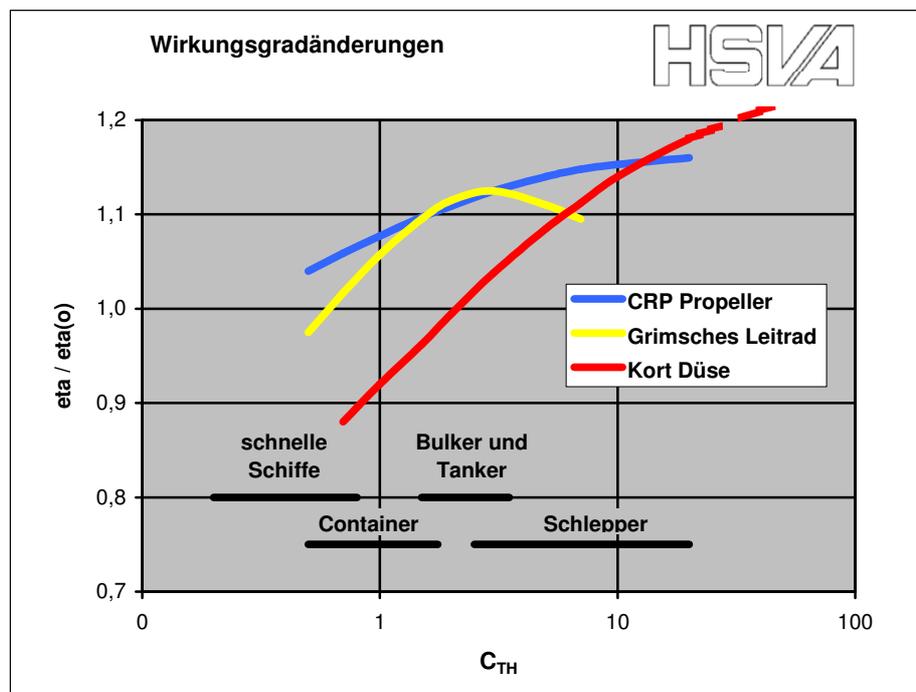
**Tabelle 3** – Einsparungen durch Reduktion der Geschwindigkeit

## Festlegung der Propulsionsorgans

Auch durch die Auswahl des richtigen Propulsionsorgans lassen sich Einsparungen in der Entwurfsphase erzielen. Je nach Schiffstyp und Hauptabmessungen kann die Entscheidung für den 1-Schrauber oder den 2-Schrauber vorteilhaft sein. Bei den 2-Schraubern hat sich bei bestimmten Schiffstypen und Hauptabmessungen die „Twin Skeg / Twin Screw“ Variante als ausgesprochen erfolgreich herausgestellt.

Geringe Verbesserungen lassen sich in der Regel durch Optimierung des Propellerdurchmessers, der Flügelzahl und des Flächenverhältnisses erzielen. Darüber hinaus versprechen verschiedene Arten von Hochleistungspropellern Verbesserungen gegenüber den konventionellen Propellern. Technisch aufwendige Lösungen wie das Grimsche Leitrad, Tandempropeller, Gegenlaufpropeller (CRP – Contra Rotating Propeller) oder Düsenpropeller lassen, in Abhängigkeit vom Schubbelastungsgrad, noch größere Einsparungen durch die Verringerung von axialen Strahlverlusten erwarten.

In der Abbildung 6 sind mögliche Wirkungsgradänderungen von technisch aufwendigen Propulsionssystemen gezeigt:



**Abb. 6** – Wirkungsgrade von Propulsionssystemen im Verhältnis zum herkömmlichen Propeller jeweils bei optimaler Drehzahl, nach Schröder (1970)

## Hydrodynamische Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches im Schiffsbetrieb

STG Sprechtag „Möglichkeiten der Energieeinsparung im Schiffsbetrieb“ am 22. März 2007 in Hamburg

Mit CRP-Systemen und mit dem Grimschen Leitrad lassen sich Wirkungsgradgewinne von mehr als 10% bei  $C_{Th} > 1.5$  erzielen. Ein derartiger Gewinn ist bei Kortdüsen erst bei  $C_{Th} > 6$  möglich. Mit Kortdüsen wird der Gewinn jedoch immer größer, je höher der Schubbelastungsgrad ist. Leistungseinsparungen von bis zu 20% sind möglich, bzw. Vergrößerung des Trossenzuges (FD) um 30% bei gleicher Leistung. Für schnelle Schiffe und große Containerschiffe, deren  $C_{Th}$  Werte meist kleiner als 0.8 sind, kann nur der CRP Propeller eine Einsparung bringen, die aber maximal 6% bei  $C_{Th} = 0.8$  beträgt.

In der folgenden Tabellen sind die möglichen Gewinne nach Erfahrung der HSVA angegeben. Die Werte in Klammern sind Angaben, die in der Literatur veröffentlicht sind.

	Maximaler Gewinn	Versuche erforderlich
<b>Auswahl und Optimierung des Propulsionsorgans</b>		
Einschrauber oder Mehrschrauber (abhängig vom Schiffstyp u.a.)	---	Nein
POD Antrieb (abhängig vom Schiffstyp u.a.)	---	Nein
Optimierung des Propellerdurchmessers	2 %	Empfohlen
Optimierung der Flügelzahl und Fläche	3 %	Empfohlen
Auswahl eines Tip-Fin-Propellers, z.B. Kappel Propeller	3 %	Ja
<b>Anordnung von technisch aufwendigen Propulsionssystemen</b>		
Asymmetrisches Hinterschiff	3 % (8%)	Ja
Tandempropeller	??	Ja
Gegenlaufpropeller (GRP)	10 % (15%)	Ja
Grimsches Leitrad	9 % (12%)	Ja
Kort-Düse (nur bei hohen Schubbelastungsgraden, siehe Abb. 6)	20 % (FD 30%)	Ja
<b>(In Klammern: Herstellerangaben)</b>		<b>Die Gewinne sind nicht kumulativ!</b>

**Tabelle 4** – Mögliche Gewinne durch Auswahl und Optimierung des Propulsionsorgans und durch Anordnung aufwendiger Propulsionssysteme

### Festlegung des Linienentwerfers und der Optimierungsstrategie

Auch die Auswahl des Linienentwurfes oder des Linienentwerfers und der Optimierungsstrategie beeinflusst maßgeblich die hydrodynamische Güte des Schiffsentwurfs. Für einen ausgefeilten Linienentwurf ist nach wie vor die Nutzung von gesammelten Erfahrungen des Linienentwerfers von größter Wichtigkeit. Besonders Vorteilhaft ist es, wenn der Linienentwerfer Werfterfahrung hat und die entsprechenden Zusammenhänge aus dem Schiffsentwurf kennt und im Linienentwurf berücksichtigen kann.

CFD Methoden werden heute erfolgreich zur Optimierung von Schiffslinien eingesetzt. Am Ende der Optimierungskette steht aber auch heute noch der Modellversuch um errechnete Gewinne nachzuweisen, Fehler zu vermeiden, Ursachen für Fehler zu erkennen und neue Ideen zu validieren. Auch zur Optimierung der Schiffslinien sollten von vornherein die in den Versuchsanstalten gesammelten Erfahrungen für die Optimierung genutzt werden.

## 4 Maßnahmen während der Konstruktionsphase

Während der Konstruktionsphase können noch zahlreiche Maßnahmen im Rahmen des Linienentwurfes getroffen werden, die den Energieverbrauch dauerhaft reduzieren können. Viele dieser Maßnahmen setzen allerdings voraus, dass der Gesamtentwurf noch genug „Potential“ hat, damit der Generalplan dem optimierten Linienentwurf angepasst werden kann. Beispielsweise ist ein ausgefeilter Linienentwurf mit einem strömungsgünstig geformten Vor-

## Hydrodynamische Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches im Schiffsbetrieb

STG Sprechtag „Möglichkeiten der Energieeinsparung im Schiffsbetrieb“ am 22. März 2007 in Hamburg

und Hinterschiff und weich ausgebildeten Schultern nur dann möglich, wenn keine oder wenige „Hardpoints“ den Linienentwurf einschränken. Ein für die angestrebte Geschwindigkeit optimaler Verdrängungsschwerpunkt kann nur dann realisiert werden, wenn auch der Gesamtentwurf bereits darauf hin konzipiert worden ist.

Eine Optimierung der Schiffsform kann durchaus unterschiedliche Ziele haben. Während ein für die Bauwerft optimaler Linienentwurf (und insbesondere die Detailgestaltung der Schiffsenden mit Bugwulst und Spiegelheck) darauf abzielt, für den Design-Tiefgang und die Design-Geschwindigkeit optimale Eigenschaften zu haben, wird ein für den Reeder optimaler Linienentwurf sich nicht nur auf einen Tiefgang und nicht nur auf eine Geschwindigkeit konzentrieren, sondern vielmehr eine bestimmte Häufigkeit verschiedener Betriebszustände berücksichtigen (Fahrprofil). Dies wird möglicherweise in einer etwas schlechteren Performance auf dem Design-Tiefgang, dafür aber in einer besseren Performance in der Gesamtheit der zu erwartenden verschiedenen Betriebszustände resultieren.

Nach dem Entwurf und der numerischen Optimierung einer Schiffsform ist es unerlässlich, für die Analyse der Strömungsverhältnisse und zur exakten Bestimmung des Leistungsbedarfs Modellversuche durchzuführen. Numerische Methoden sind zwar ausgesprochen gut geeignet eine Schiffsform zu optimieren, jedoch sind die üblicherweise verwendeten Methoden (Potentialmethoden) nicht in der Lage alle Effekte zu erfassen, die im Modellversuch sichtbar werden. Für eine genaue Analyse der Strömungsgüte ist es erforderlich, Widerstandsversuch, Propulsionsversuch, 3D Nachstrommessung und Farbanstrichversuch durchzuführen.

Erreicht das Projektschiff die angestrebte Vertragsgeschwindigkeit nicht, oder möchte man das Schiff weiter optimieren, empfiehlt sich zunächst ein Vergleich der Ergebnisse des Projektschiffes mit der Datenbank der Versuchsanstalt. Erfahrene Mitarbeiter der Versuchsanstalten können beurteilen, ob und in welcher Größenordnung noch Verbesserungen zu erwarten sind und welche Maßnahmen geeignet sein könnten, dies zu erreichen. Wenn die Schiffslinien sehr gründlich voroptimiert wurden, sind meist nur noch kleinere Verbesserungen möglich. Aber auch mehrere kleiner Verbesserungen können zum Ziel führen. Dieser Weg braucht Zeit, Geld, Geduld und Erfahrungsnutzung.

Wenn die Hauptabmessungen und der Propellerdurchmesser nicht mehr verändert werden können und die Schiffslinien schon nahezu optimal sind, ist meist noch folgendes Potential für eine weitere Verringerung des Schiffswiderstandes vorhanden:

	Maximaler Gewinn	Versuche erforderlich
<b>Schiffslinien Vorschiff</b>		
Kleine Änderungen am Bugwulst	2 %	Ja
Kleine Änderungen an der Kimm und an der vorderen Schulter	2 %	Ja
Realisierung ungewöhnlicher Linien durch Anwendung automatischer Optimierungsstrategien (Gewinn abhängig von der Höhe des Wellenwiderstandes)	2-5 %	Ja
<b>Schiffslinien Mittelschiff</b>		
Veränderung der Hauptspantvölligkeit	1 %	Ja
<b>Schiffslinien Hinterschiff</b>		
Kleine Änderungen an der hinteren Schulter und an den Wasserlinienausläufen	2 %	Ja
Kleine Änderungen im Übergang vom Schiffskörper zur Stevennuss	1 %	Ja
Optimierung des Heckwulstes	1 %	Ja
Spiegel Verlängerung (Duck-Tail)	2 %	Ja
<b>Die Gewinne sind nicht kumulativ!</b>		

**Tabelle 5** – Mögliche Gewinne durch Optimierung der Linien

## Hydrodynamische Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches im Schiffsbetrieb

STG Sprechtag „Möglichkeiten der Energieeinsparung im Schiffsbetrieb“ am 22. März 2007 in Hamburg

Durch Optimierung der Anordnung und der Form von Ruder und Propeller lassen sich weitere Einsparungen erzielen:

	Maximaler Gewinn	Versuche erforderlich
<b>Anordnung von Ruder und Propeller</b>		
Propellerwirkungsgrad erhöhen (geht meist nur auf Kosten der Kavitationssicherheit)	3 %	Empfohlen
Anordnung Propeller/Ruder im Hinterschiff	2 %	Ja
Hochauftriebsruder (z.B. HSVA MP 73) mit kleinerer Ruderfläche	1 %	Empfohlen
<b>Die Gewinne sind nicht kumulativ!</b>		

**Tabelle 6** – Mögliche Gewinne durch Optimierung der Anordnung von Ruder und Propeller

Durch Anordnung von Propulsionsverbessernden Maßnahmen (PVM), die Ablösungen vermeiden, Energie aus dem Nachstromfeld zurückgewinnen, die Anströmgeschwindigkeit des Propellers erhöhen oder Energie aus den verschiedenen Verlustarten (Drallverluste, Nabenwirbelverluste) zurückgewinnen, kann man folgende Verbesserungen erwarten:

	Maximaler Gewinn	Versuche erforderlich
<b>Verringerung von Ablösungen / Verbesserung Nachstromfeld</b>		
Grothues Spoiler	3 %	Ja
Schneekluth Düse	4 % (8 %)	Ja
Vordüse SILD (Sumitomo Integrated Lammeren Duct)	6 % (10 %)	Ja
<b>Je Verlustart nur eine Lösung möglich!</b>		
<b>Verringerung der Rotationsverluste</b>		
Twist Ruder ohne Costa Bulb (BMS / HSVA)	2 %	Ja
Single Pre Swirl Fin (Peters / Mewis)	3 %	Ja
Pre Swirl Fin Systems (DSME)	4 %	Ja
Rudder Fins (HHI)	4 %	Ja
<b>Je Verlustart nur eine Lösung möglich!</b>		
<b>Verringerung der Nabenwirbelverluste</b>		
Divergent Propeller Cap	2 %	Ja
Ruder mit Costa Bulb	2 %	Ja
Propeller Boss Cap Fins (PBCF)	3 %	Empfohlen
<b>Je Verlustart nur eine Lösung möglich!</b>		
<b>Verringerung der Rotations- und der Nabenwirbelverluste</b>		
Twist Ruder mit Costa Bulb (BMS / HSVA)	4 %	Ja
High Efficiency Rudders (Wärtsilä, Rolls Royce)	6 %	Ja
<b>Je Verlustart nur eine Lösung möglich!</b>		

**Tabelle 7** – Gewinne durch Anordnung von propulsionsverbessernden Maßnahmen

## 5 Maßnahmen während des Schiffsbetriebes

Auch in der Betriebsphase eines Schiffes sind durch geeignete Maßnahmen nennenswerte Einsparungen zu realisieren.

### Außenhaut und Propeller

Außenhaut und Propeller müssen ständig überwacht und gepflegt werden. Ein Schiff, dessen Antifoulingssystem seine garantierte Wirkungsdauer überschritten hat, wird speziell in

## Hydrodynamische Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauches im Schiffsbetrieb

STG Sprechtag „Möglichkeiten der Energieeinsparung im Schiffsbetrieb“ am 22. März 2007 in Hamburg

tropischen Gewässern in kürzester Zeit mit Algen, Seepocken und Muscheln bewachsen sein, die einen erheblichen Anteil der zur Verfügung stehenden Leistung kosten. Ein Schiff mit schwerem Bewuchs und vergammeltem Propeller kann leicht die doppelte Antriebsleistung erfordern bzw. dreißig Prozent seiner Geschwindigkeit einbüßen.

### Trimmoptimierung im Fahrbetrieb

Zu jedem Tiefgang und zu jeder Geschwindigkeit gehört ein leistungsoptimaler Trimm. Während Schiffe mit moderaten Spiegel oder Bugwulstformen vergleichsweise unempfindlich auf Trimmänderungen reagieren, können Schiffe mit breitem Spiegelheck und/oder ausgeprägtem Bugwulst empfindlich auf Tiefgangs- und Trimmänderungen reagieren. Die Leistungsdifferenz zwischen der günstigsten und der ungünstigsten Trimmlage kann bei empfindlichen Schiffen mehr als 10% betragen.

In der folgenden Tabelle sind exemplarisch die Gewinne für verschiedene Tiefgänge und Geschwindigkeiten dargestellt, die sich aus einer Trimm-Optimierung bei einem RoRo-Vessel und einem Heavy-Lift-Vessel ergeben haben:

	RoRo-Vessel			Heavy-Lift-Vessel		
<b>Full Scantling Draught</b>	<b>18 kn</b>	<b>21 kn</b>	<b>23 kn</b>	<b>15 kn</b>	<b>17 kn</b>	<b>18 kn</b>
Trimming by head	97%	98%	95%	106%	105%	105%
Trimming on even keel	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Trimming to the stern	105%	102%	99%	105%	97%	95%
<b>Design Draught</b>	<b>18 kn</b>	<b>21 kn</b>	<b>23 kn</b>	<b>15 kn</b>	<b>17 kn</b>	<b>18 kn</b>
Trimming by head	89%	95%	98%	105%	104%	104%
Trimming on even keel	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Trimming to the stern	110%	106%	104%	105%	94%	90%
<b>Ballast Draught</b>	<b>18 kn</b>	<b>22 kn</b>	<b>24 kn</b>	<b>15 kn</b>	<b>17 kn</b>	<b>18 kn</b>
Trimming by head	100%	96%	103%	99%	103%	106%
Trimming on even keel	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Trimming to the stern	111%	104%	103%	108%	99%	91%

**Tabelle 8** – Leistungsänderung durch Trimmvariationen

Die richtige Trimmlage lässt sich im Schiffsbetrieb durch Probieren oder im Vorwege durch Modellversuche ermitteln.

### Nachträgliche An- und Umbauten

Verschiedene der zuvor genannten Maßnahmen zur Verringerung des Leistungsbedarfs lassen sich auch an fahrenden Schiffen nachträglich realisieren:

	Maximaler Gewinn	Versuche erforderlich
Neuer Propeller	3 %	Empfohlen
Propeller Boss Cap Fins (PBCF)	3 %	Empfohlen
Costa Bulb an das vorhandene Ruder	2 %	Ja
Neues Ruder, getwisted ohne Costa Bulb	2 %	Ja
Neues Ruder, getwisted mit Costa Bulb	4 %	Ja
Neues Ruder, mit Rudder Fins	4 %	Ja
Spiegel Verlängerung (Duck Tail)	2 %	Ja

**Tabelle 9** – Mögliche Gewinne durch nachträgliche An- und Umbauten

Von diesen Maßnahmen sind aus Kostengründen nur die PBCF's, der Costa Bulb und der Duck Tail für eine nachträgliche Montage sinnvoll in Erwägung zu ziehen. Ein neues Ruder oder ein neuer Propeller könnte dagegen im Schadensfall vorgesehen werden.

### Routenauswahl und Schiffsgeschwindigkeit

Da die Routenauswahl nicht zu den hydrodynamischen Maßnahmen zur Reduzierung des Leistungsbedarfs gezählt werden kann, soll dieses Thema hier nur kurz erwähnt werden.

Routenauswahl-Systeme, die aktuelle und zukünftige Wetterdaten (Wind- und Seegang), Strom und eventuell vorhandene Flachwassereinflüsse berücksichtigen, und unter Berücksichtigung von Fahrplänen und möglichen Hafenslots eine optimale Route und Geschwindigkeit sowohl für die aktuellen Wetterbedingungen, als auch die im Verlaufe einer Reise zu erwartenden Umgebungsbedingungen ermitteln, können ebenfalls zu signifikanten Treibstoffeinsparungen führen.

Um dies realisieren zu können, müssen diese Systeme aber nicht nur Wind- und Seegangswiderstände in einen Mehrbedarf an Leistung umrechnen, sondern sie müssen beispielsweise auch berücksichtigen, dass Drift bei Seitenwind, ein gelegtes Ruder und/oder Rollbewegungen im schräg einkommenden Seegang einen Mehrbedarf an Leistung erfordern können.

## 6 Zusammenfassung

Die wirkungsvollsten Maßnahmen um Energie einzusparen können in der Entwurfs- und in der Konstruktionsphase getroffen werden:

- Wählen Sie sorgfältig Hauptabmessungen, erforderliche Geschwindigkeit und Propulsionsorgan aus. Machen Sie Ihr Schiff so lang und schlank wie möglich.
- Arbeiten Sie beim Schiffsentwurf von Anfang an mit einer unabhängigen Versuchsanstalt Ihres Vertrauens zusammen. Das beste Team ist: Werft + Reeder + Versuchsanstalt.
- Lassen Sie sich Ihr Schiff von einer Versuchsanstalt optimieren.

Auch in der Betriebsphase eines Schiffes sind durch geeignete Maßnahmen noch nennenswerte Einsparungen zu realisieren:

- Halten Sie Außenhaut und Propeller glatt.
- Fahren Sie Ihr Schiff im optimalen Trimmzustand.
- Fahren Sie auf der optimalen Route und so langsam wie möglich.

## 7 Danksagungen

Wir danken allen Kolleginnen und Kollegen in der HSVA, die uns bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben. Insbesondere gilt unser Dank Herrn Eckhard Praefke von der Firma Schaffran Propeller + Service GmbH, der mit Hinweisen zum Verständnis der Wirkmechanismen technisch aufwendiger Propulsionssysteme zu dieser Arbeit beigetragen hat.

### 8 Verwendete Literatur

Für die Herstellung der vorliegenden Arbeit wurde eine große Zahl von HSVA-Berichten durchgesehen und ausgewertet, diese Berichte werden im Einzelnen nicht genannt.

**Detlefs, H.-R.; Mewis, F.; Röpcke, H.-J.** (1983), „Ein Verfahren zur Ermittlung der optimalen Trimmlage eines Schiffes“, Schiffbauforschung 22, 1/1983, Rostock, 1983.

**Dyne, G.** (1983), “Ship Propulsion Improvement – Principles and a Survey of Alternative Propulsion Systems”, Western European Graduate Education in Marine Technology, Eighth School, Aug. 1983, Gothenburg, 1983.

**Harvald, Sv. Aa.** (1983), “Resistance and Propulsion of Ships”, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York, 1983.

**Henschke, W.; Braun, K. Th.** (1957), „Schiffbautechnisches Handbuch“, Band 1, VEB Verlag Technik Berlin, 1957.

**Klug, H.; Mewis, F.** (2006), “Minimising Fuel Consumption”, Shipping World & Shipbuilder, September 2006, p 42 – 46, London, 2006.

**Mewis, F.; Klug, H.** (2004), “The Challenge of Very Large Container Ships - A Hydrodynamic View”, Proceedings PRADS 2004, Lübeck-Travemünde, 2004.

**Peters, H.-E.; Mewis, F.** (1986), “Power Savings through a Novel Fin System”, 15<sup>th</sup> SMSSH, Proceedings Vol. 1, pp 91 - 96, Varna, 1986.

**Rayner, A.** (2007), „Deutliche Vorteile durch Silikonbeschichtung“, Schiff & Hafen / Januar 2007 / Nr. 1, Hamburg, 2007.

**Schneekluth, H.** (1988), „Hydromechanik zum Schiffsentwurf“, Koehler Verlag, 1988.

**Schröder, G.** (1970), „Vergleich der Wirkungsgrade von Schraubenpropeller-Sonderbauarten und herkömmlichen Propellern an modernen Schiffen“, Seewirtschaft Heft 8/1970, S. 610 – 611, Rostock, 1970.