

Hydrodynamische Aspekte sehr großer Containerschiffe

Dipl.-Ing. Friedrich Mewis, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH
Dipl.-Ing. Manfred Urban, Mecklenburger Metallguß Waren

1. Einleitung

Der Siegeszug des Containertransportes hält seit ca. 30 Jahren an und wird durch das infolge der fortschreitenden Globalisierung der Weltwirtschaft stetig steigende Ladungsaufkommen auch noch in absehbarer Zeit anhalten. Die Ökonomie führt zu immer größeren Schiffen, die immer wirtschaftlicher transportieren können.

Der Reduktion der Transportkosten stehen steigende Kosten in Häfen gegenüber. Die längeren Hafenziegezeiten größerer Schiffe führen mit zunehmender Schiffsgröße zum Anwachsen der erforderlichen Dienstgeschwindigkeiten, um mit kleineren Schiffen im Fahrplan konkurrieren zu können. Hier stoßen die sehr großen Schiffe immer wieder an die Grenzen der technischen Entwicklung. So ermöglicht der zur Zeit größte verfügbare Motor mit ca. 68 MW Motorleistung bei einem Einschraubens-Schiff von 9.000 TEU eine Dienstgeschwindigkeit von etwa 25 kn, die nicht ausreicht, um mit kleineren Einheiten im Fahrplan mitzuhalten.

Die bei der Lösung dieser Aufgabe auftretenden hydrodynamischen Probleme sind, gegenüber den Problemen der Festigkeit oder Hafenlogistik, eigentlich sekundärer Natur und scheinen aus heutiger Sicht alle lösbar bei ausreichender Sorgfalt der Ingenieure.


Besondere Aufmerksamkeit muss dabei dem Propellerentwurf im Zusammenspiel mit den Wechselwirkungen zwischen Schiffskörper, Schiffsstruktur und Antriebsanlage gewidmet werden.

Für sehr große Einschraubenschiffe gibt es nur zwei wesentliche neue Probleme, das sind Ruder kavitation und parametrische Rollbewegungen im Schiffsbetrieb. Beide Probleme lassen sich aber lösen.

Wenn der Trend zu immer größeren Einheiten weiter anhält, wird das Containerschiff als Zweischrauber unumgänglich. Wegen des erheblich höheren Herstellungspreises rechnet sich der Zweischrauber aus heutiger Sicht erst für Einheiten, die mehr als 12.000 TEU befördern können. Diese Schiffe werden, schon wegen der notwendigen Tiefgangsbeschränkung, sehr breit ($B > 50$ m) sein und ermöglichen deshalb hydrodynamisch günstige Lösungen, z. B. Twinskegs oder auch Pod-Antriebe, so dass die Propulsionsgüte durchaus die eines Einschraubers erreichen oder sogar übertreffen kann. Für den Schiffs- und Propellerdesigner entsteht hier eine neue sehr interessante Aufgabe.

2. Hauptabmessungen

Die Entwicklung der Hauptabmessungen der Containerschiffe ist mit wenigen Ausnahmen kontinuierlich voran gegangen, wie die Abbildungen 2.1 bis 2.3 für die Länge, Breite und Tiefgang zeigen. Die Entwicklung der Schiffsbreite ist im Bereich bis 4.600 TEU durch die Abmessungen der Panamakanal-Schleusen auf 32.25 m fixiert, alle breiteren Schiffe werden als Post-Panmax-Schiffe bezeichnet. Die übrigen wichtigen Formparameter C_B , C_M , C_W , LCB sind mehr oder weniger konstant geblieben für den gesamten Bereich von 20.000 m³ (etwa 1.200 TEU) bis 120.000 m³ Verdrängung (etwa 8.000 bis 9.000 TEU), wie aus den Abbildungen 2.4 bis 2.7 zu erkennen ist. Ausreißer sind jeweils durch sehr spezielle Aufgabenstellungen begründet.

	Hydrodynamische Aspekte sehr großer Containerschiffe Schiffbauforschung 40 (2001) Nr. 4, S. 39-57	2
---	--	---

In der Abbildung 2.8 ist ein Zusammenhang zwischen der Schiffs-Verdrängung und der Containerzahl gegeben. Die Abhängigkeit ist im betrachteten Bereich nahezu linear, d.h. mit zunehmender Schiffsgröße wird die Verhältniszahl m^3/TEU nicht günstiger.

In der Tabelle 2.1 sind die Hauptabmessungen einiger sehr großer Containerschiffe und einiger ausgewählter Projekte und Studien zusammengestellt.

TEU	Name/Typ	Werft	Länge [m]	Breite [m]	Tiefg. [m]
Schiffe					
6000	K-Klasse	Odense	302.00	42.80	14.60
7000	S-Klasse	Odense	331.00	42.80	14.60
Projekte					
8000	JVC	HDW	325.00	46.00	13.00
9000	China Shipping	Samsung	330.00	45.60	13.00
Mögliche Hauptabmessungen:					
10000	Einschrauber	Studie HSVA	360.00	50.00	14.00
12000	Einschrauber	Studie HSVA	380.00	52.50	14.60
12500	Zweischrauber	Studie Bureau Veritas	ca. 360.00	54.20	14.50

Tabelle 2.1: Hauptabmessungen einiger sehr großer Containerschiffe

Bis etwa 8.000 TEU reichen die z. Zt. vorhandenen größten Hauptmotoren mit 68.640 kW aus, um die erforderliche Service-Geschwindigkeit von mindestens 25 kn zu erreichen. Für alle größeren Einschrauber sind höhere Antriebsleistungen erforderlich oder die Schiffe müssen langsamer fahren. Der Übergang zum Zweischrauber kann die Geschwindigkeitsprobleme lösen. Die Hauptabmessungen verändern sich dadurch nicht wesentlich, wohl aber die Hinterschiffsform.

Um zu zeigen, dass in Europa auch sehr große Schiffe gebaut werden können, sind in der Tabelle 2.2 die Hauptabmessungen einiger vorhandener europäischer Trockendocks zusammengestellt.

Deutschland		Trockendock-Größe
HDW	Kiel	426 m x 88 m
Aker MTW	Wismar	340 m x 67 m Halle
Kvaerner Warnow	Warnemünde	320 m x 54 m tw. Halle
Ausland		
Odense-Lindø	Dänemark	415 m x 90 m
Kvaerner MASA Turku NSY	Finnland	365 m x 80 m
Aker Finny.	Finnland	260 m x 85 m
Mitrena Yard	Portugal	420 m x 75 m
Marquerita Yard	Portugal	360 m x 54 m
Fratelli Orlando	Italien	350 m x 56 m
Chantiers de L'Atlantique	Frankreich	470 m x 60 m

Tabelle 2.2: Hauptabmessungen europäischer Trockendocks

Grosse Containerschiffe sind z. Zt. ausschließlich Einschraubenschiffe. Die wichtigsten Daten der realisierten Propeller an Containerschiffen, im Bereich von 10.000 kW bis 60.000 kW, zeigen die Abbildungen 2.9 bis 2.12 für die Propellerdurchmesser, Flügelzahl, Flächenverhältnis und Propellerfreischlag. Der Propellerdurchmesser hat bei sehr großen Leistungen den Wert von 9 m erreicht und wird ihn auch nicht wesentlich überschreiten. Die Flügelzahl nimmt mit zunehmender Leistung zu und beträgt bei sehr großen Containerschiffen im allgemeinen $z = 6$, auch $z = 7$ erscheint denkbar. Das Flächenverhältnis steigt mit zunehmender Leistung. Werte über 1.0 können für Leistungen über 60 MW erforderlich werden. Der realisierte relative Propellerfreischlag steigt mit zunehmender Leistung. Das ist möglich, weil der Tiefgang schneller wächst als der Propellerdurchmesser. Ein sehr großer Freischlag führt nicht automatisch zu niedrigeren Druckimpulsen. Grosse Containerschiffe sollten jedoch einen Freischlag von mehr als 30% haben und sehr große (9.000 TEU) wenigstens 35%.

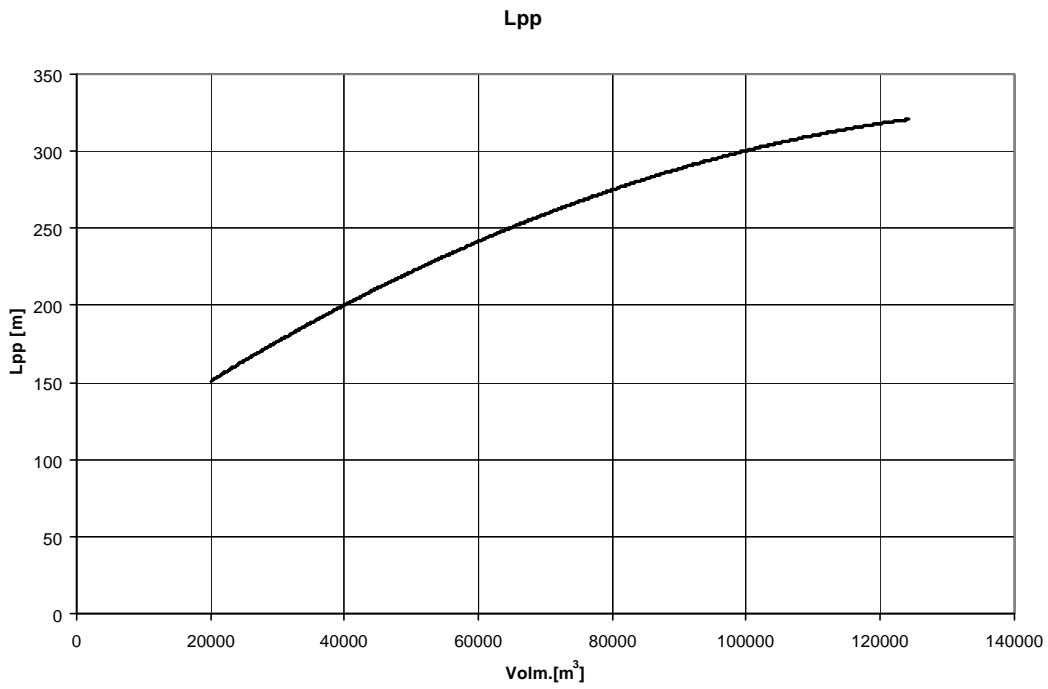


Abb. 2.1 Schiffslänge $L_{pp} = f(L)$

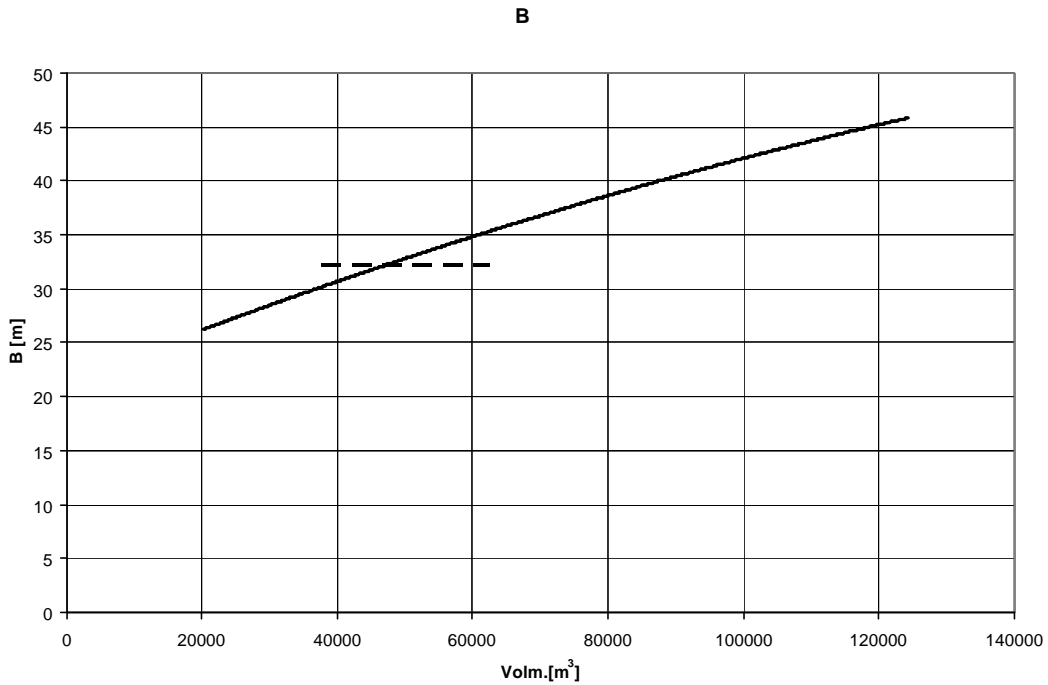


Abb. 2.2 Schiffsbreite $B = f(L)$

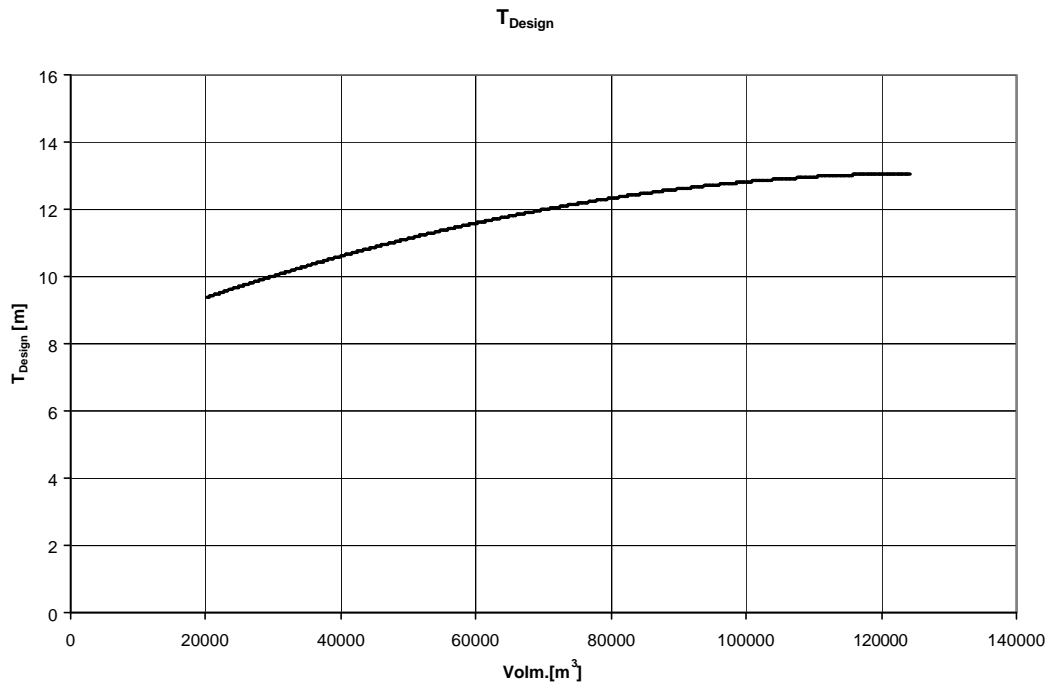


Abb. 2.3 Designtiefgang $T = f(L)$

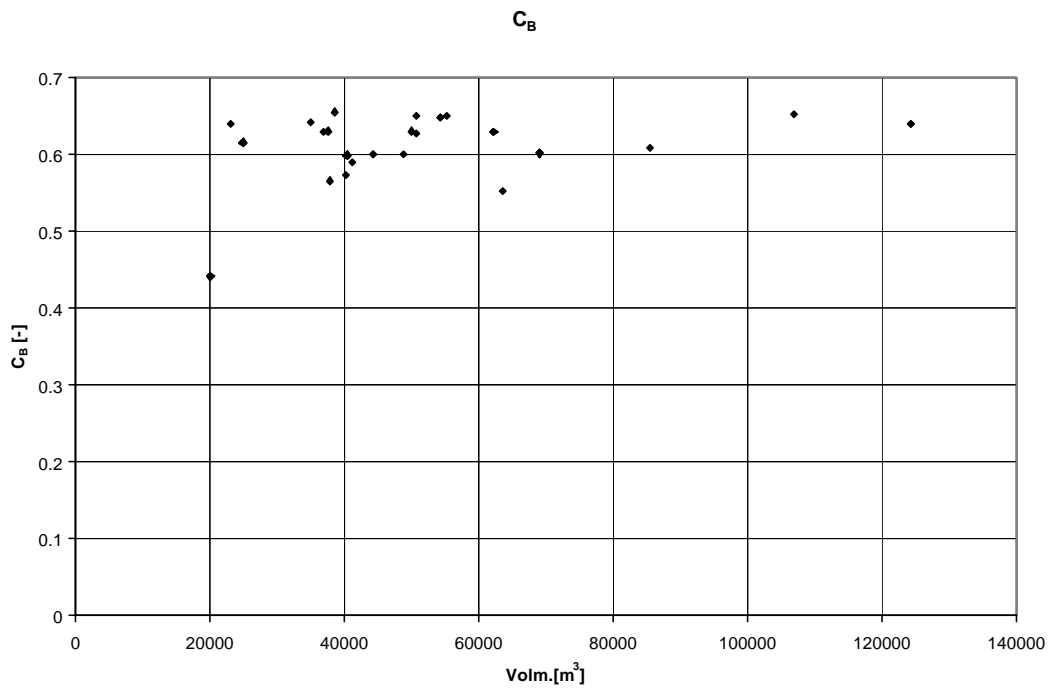


Abb. 2.4 $C_B = f(L)$

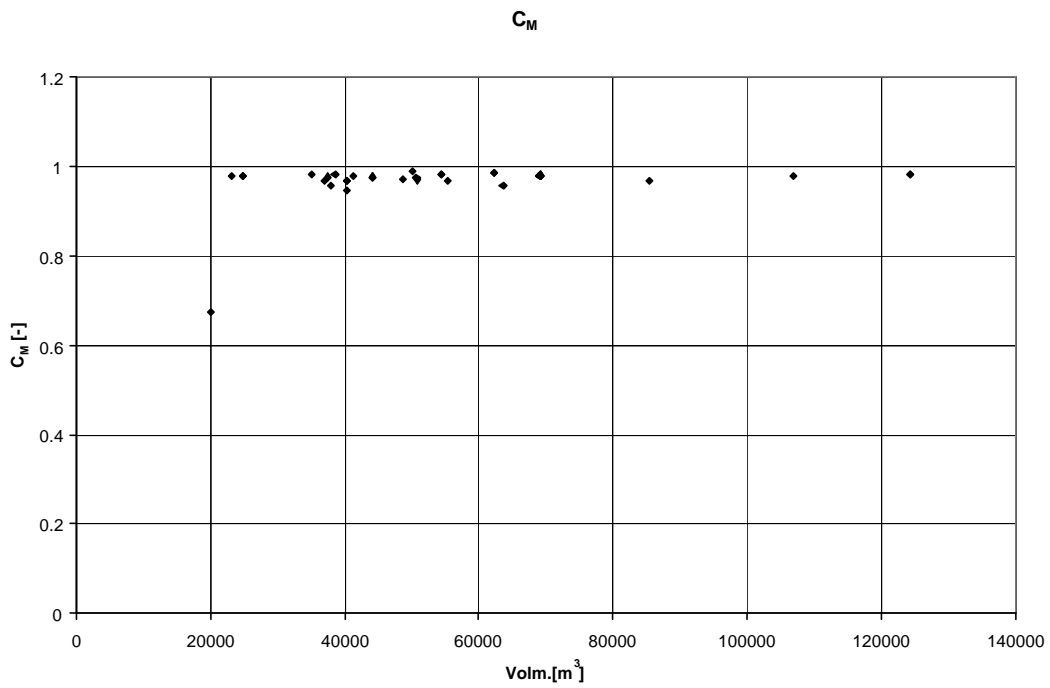


Abb. 2.5 $C_M = f(L)$

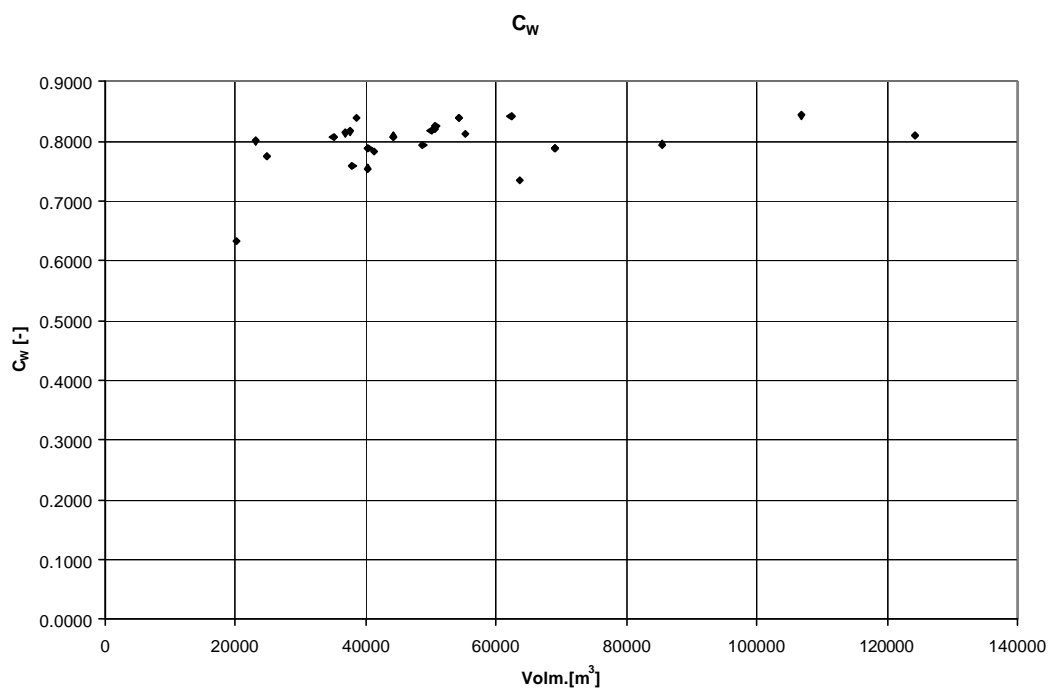


Abb. 2.6 $C_W = f(L)$

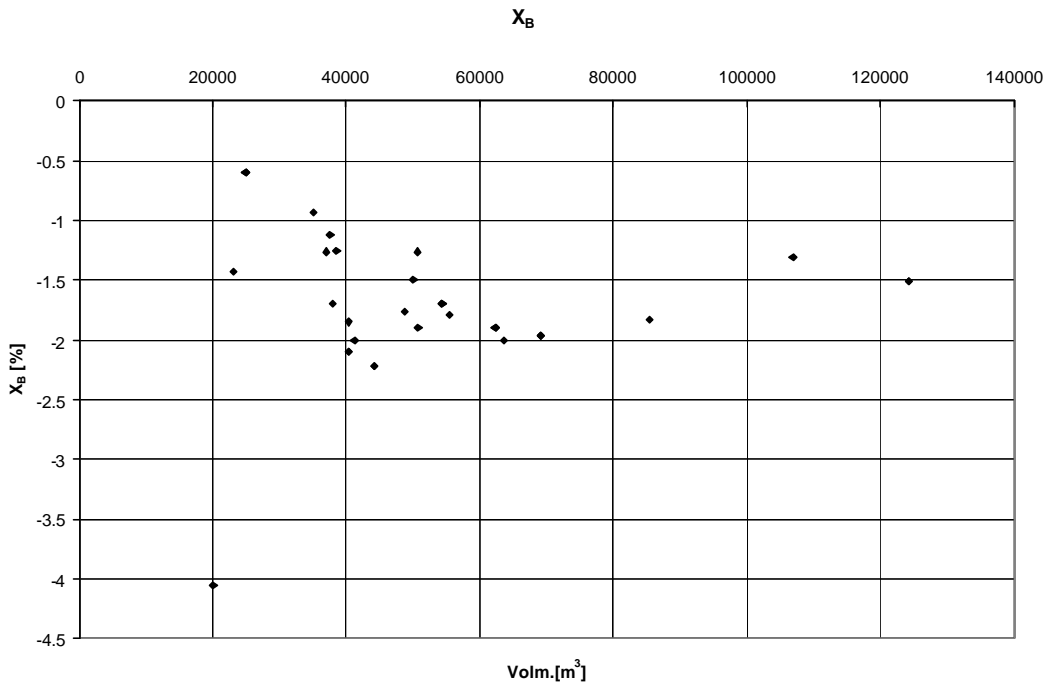


Abb. 2.7 Schwerpunktlage $X_B = f(L)$

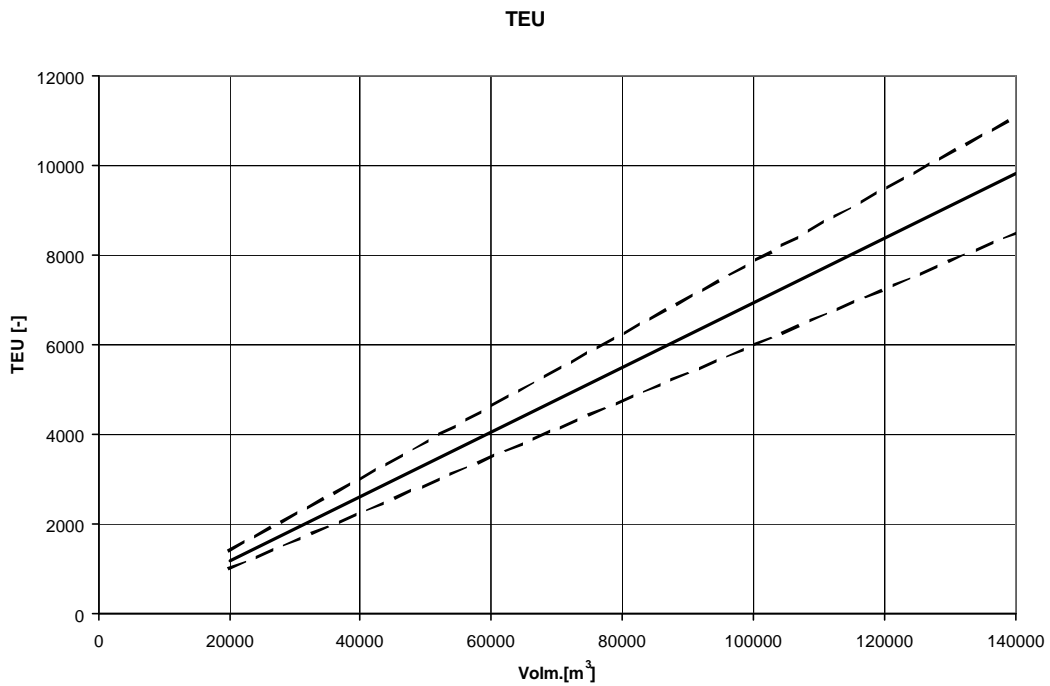


Abb. 2.8 Containeranzahl TEU = f(L)

Im HYKAT nahe den Entwurfsbedingungen untersuchte Containerschiffe von über 10 MW Leistung

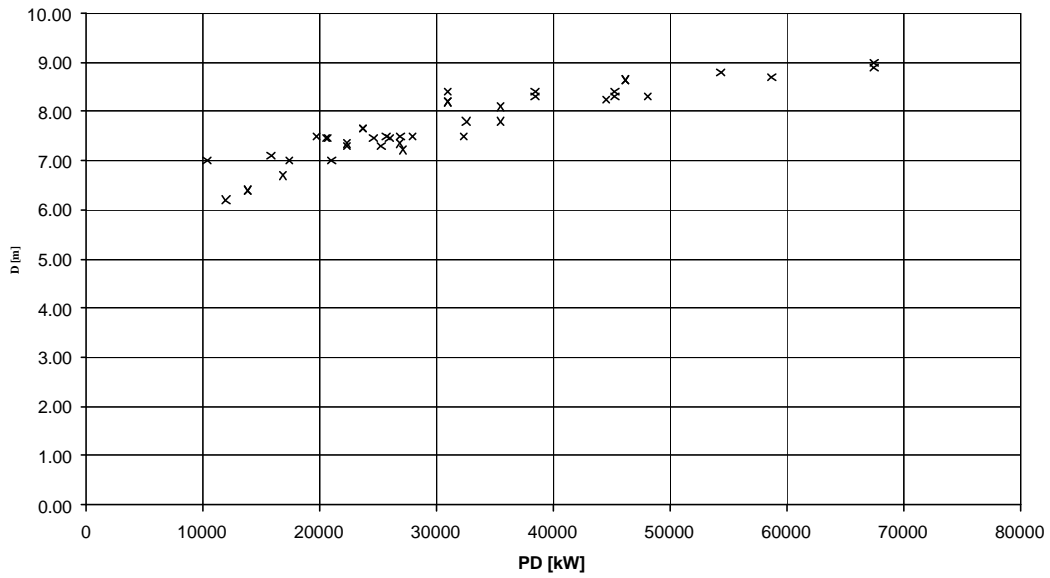


Abb. 2.9 Propellerdurchmesser $D_p = f(P_D)$

Im HYKAT nahe den Entwurfsbedingungen untersuchte Containerschiffe von über 10 MW Leistung

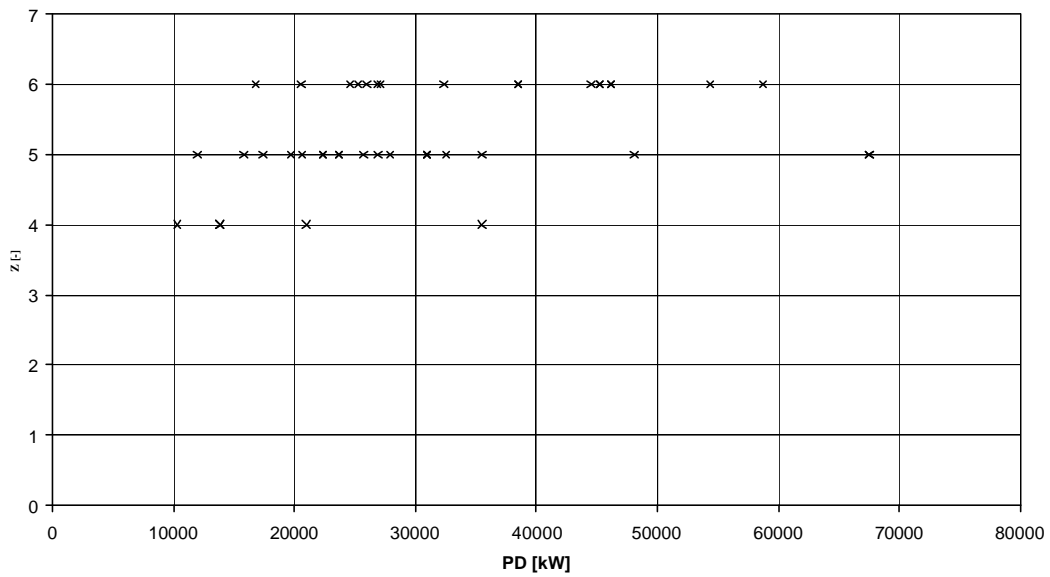


Abb. 2.10 Propellerflügelzahl $z = f(P_D)$

Im HYKAT nahe den Entwurfsbedingungen untersuchte Containerschiffe von über 10 MW Leistung

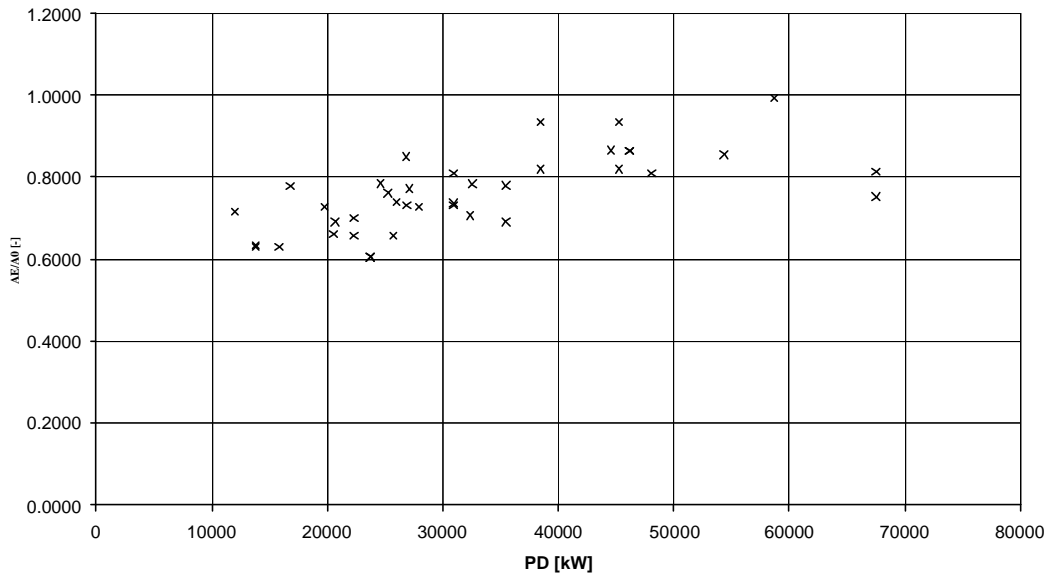


Abb. 2.11 Flächenverhältnis $A_E/A_D = f(P_D)$

Im HYKAT nahe den Entwurfsbedingungen untersuchte Containerschiffe von über 10 MW Leistung

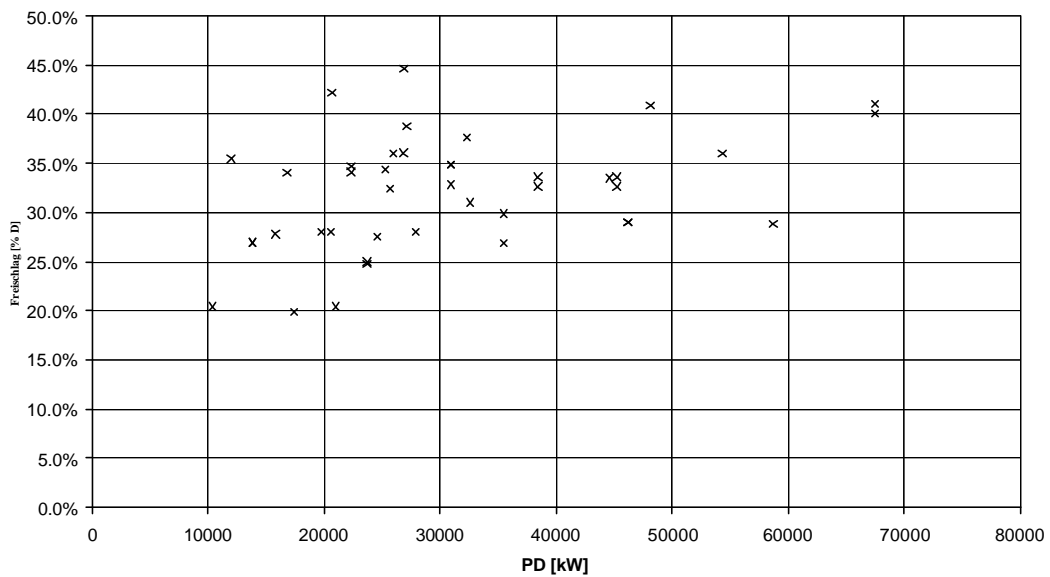



Abb. 2.12 Vertikaler Propellerfreischlag in Abhängigkeit von P_D

3. Antriebsleistung und Geschwindigkeit

Der Erfolg des weltweiten Liniendienstes im Containerverkehr basiert unter anderem auf der Garantie von Abfahrts-, Beförderungs- und Ankunftszeiten. Deshalb spielt die Geschwindigkeit unter allen Bedingungen des Seebetriebs eine so herausragende Rolle.

	Hydrodynamische Aspekte sehr großer Containerschiffe Schiffbauforschung 40 (2001) Nr. 4, S. 39-57	9
---	--	---

Wie bereits erwähnt, hat der größte z. Zt. verfügbare Motor eine Motorleistung $P_B = 68.640$ kW. Dieser Motor wurde von MAN B&W entwickelt und wird bei Hyundai in Lizenz gebaut. Er hat 12 Zylinder, die Typen-Bezeichnung ist MAN B&W 12K98MC. Eine Weiterentwicklung dieser Motoren für eine größere Zylinderzahl ist denkbar und in Vorbereitung, mit 18 Zylindern ließen sich 102.960 kW realisieren.

Da in den Diagrammen des vorliegenden Beitrages als Leistungsangaben P_D (delivered power) verwendet werden, das ist die Leistung die dem Propeller zur Verfügung steht, sind hier die Zusammenhänge beispielhaft für den größten Motor wiedergegeben:

MCR (100%)		68.640 kW	= P_B
NCR (90% von MCR)	0.9 x MCR	61.780 kW	
Sea Margin (z. B. 20% von NCR)	0.2 x NCR	12.360 kW	
Leistung für Probefahrt	0.9 x 0.8 x MCR	49.420 kW	= P_S
Lager-Verluste (1%)	0.01 x 0.9 x 0.8 x MCR	490 kW	
Leistung am Propeller	0.9 x 0.8 x 0.99 x MCR	48.930 kW	= P_D

Tabelle 3.1 Berechnung der am Propeller verfügbaren Leistung

Die Abbildung 3.1 gibt eine Übersicht über die erforderliche Leistung P_D für sehr große Containerschiffe (5.000 bis 10.000 TEU) für verschiedene Schiffsgeschwindigkeiten. Die Kurven basieren auf Versuchsergebnissen von ca. 20 Schiffen und stellen mittlere Werte dar. Der Leistungsbedarf eines konkreten Projektes kann durchaus von diesen Linien abweichen.

In Abbildung 3.2 ist der spezifische Leistungsbedarf P_D/Δ [kW/m³] auf der Basis von Abbildung 3.1 dargestellt. Diese Auftragung zeigt, dass mit zunehmender Schiffsgröße der spezifische Leistungsbedarf immer kleiner, d.h. transportökonomisch immer günstiger wird.

In den Abbildungen 3.3 und 3.4 ist die Abhängigkeit der Dienstgeschwindigkeit und der Propeller-Drehzahl von der Leistung P_D dargestellt.

Die Abbildungen 3.5 und 3.6 zeigen, dass mit zunehmender Schiffsgröße die Froudezahl unter $F_n = 0.25$ fällt. Alle Werte $F_n > 0.25$ sind eigentlich vom ökonomischen Standpunkt zu hoch.

In den Abbildungen 3.7 bis 3.11 sind die Propulsionskennziffern Sogziffer, Nachstromziffer, Propellerwirkungsgrad, Gütegrad der Anordnung und Gütegrad der Propulsion für eine Auswahl von Containerschiffen, die mit Entwurfspropellern in der HSVA untersucht wurden, für die Grossausführung zusammengestellt.

Die Propellerentwürfe stammen von verschiedenen Propellerdesignern und wurden für verschiedenste Aufgabenstellungen gemacht, ebenso die Schiffsentwürfe. Das erklärt sicher einen Teil der Streuungen.

Bei der Verwendung der Kennziffern für Propellerüberschlagsrechnungen oder Leistungsabschätzungen ist zu berücksichtigen, dass diese Ziffern dem Gesamtsystem der HSVA entsprechen, das von der Versuchsdurchführung über Messwertanalyse, Umrechnungsverfahren und Korrekturen für Probefahrtsbedingungen ein in sich geschlossenes und vielfach validiertes System ist. Einzelne Ziffern von anderen Versuchsanstalten oder Verfassern können durchaus systematisch davon abweichen.

In der Abbildung 3.12 sind die maximalen Druckimpulse der 1. Harmonischen für die genannte Auswahl von Containerschiffen in Abhängigkeit von der Leistung am Propeller wiedergegeben, wie sie im großen Kavitationstunnel (HYKAT) der HSVA gemessen wurden. Mit zunehmender Leistung nehmen die auftretenden Druckimpulse zu. Häufig sind bei niedrigen Werten für die 1. Harmonische die Messwerte für die 2. und 3. Harmonische höher als diese, was den Propellerentwerfer allerdings nicht überrascht.

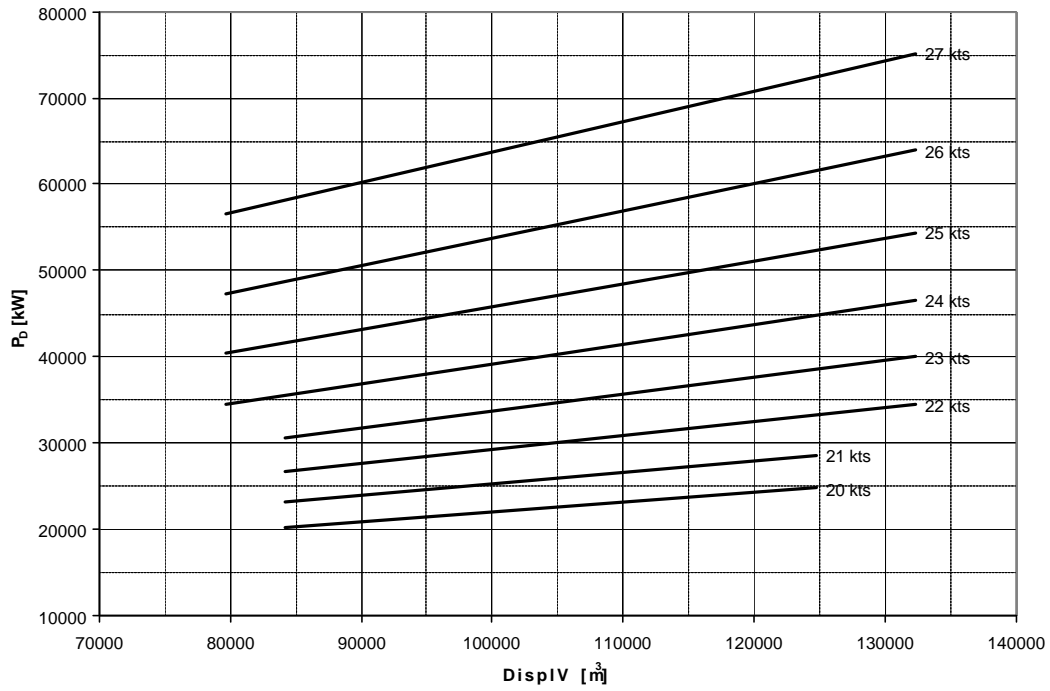


Abb. 3.1 Leistungsbedarf sehr großer Containerschiffe

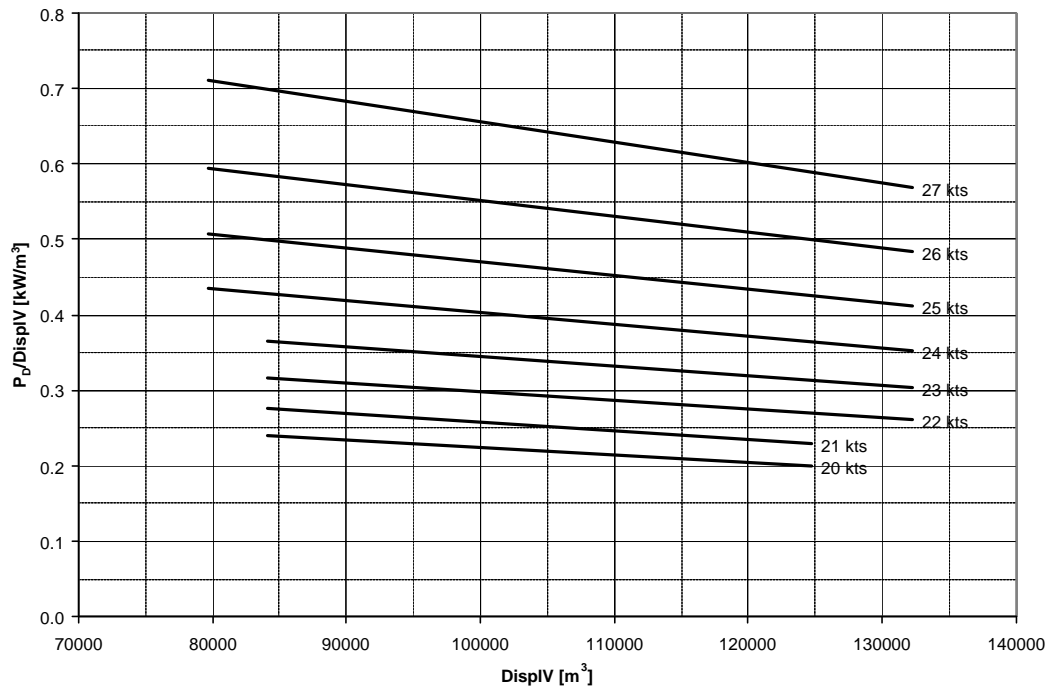


Abb. 3.2 Spezifischer Leistungsbedarf sehr großer Containerschiffe

Im HYKAT nahe den Entwurfsbedingungen untersuchte Containerschiffe von über 10 MW Leistung

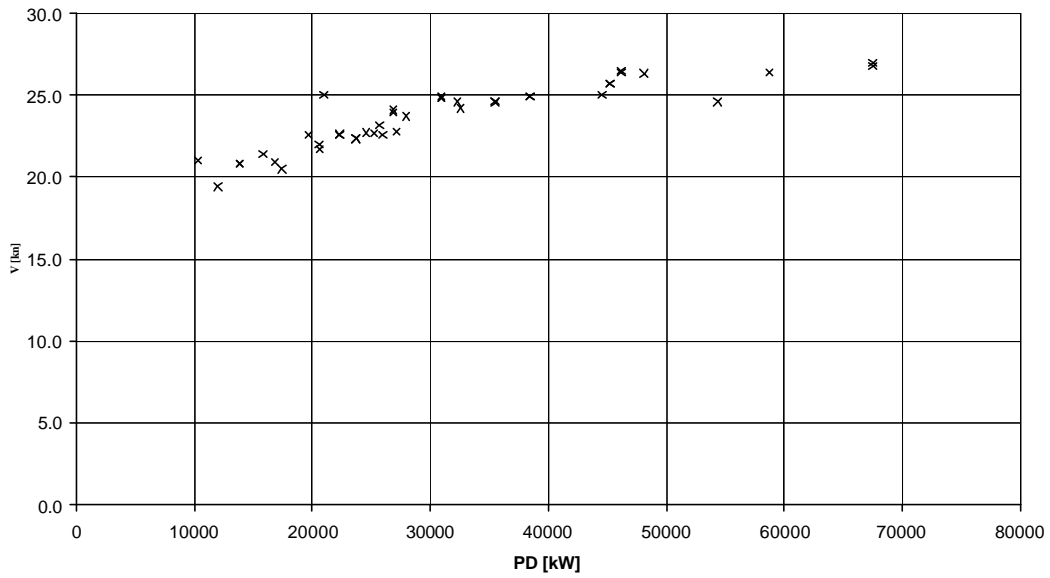


Abb. 3.3 Dienstgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Leistung P_D

Im HYKAT nahe den Entwurfsbedingungen untersuchte Containerschiffe von über 10 MW Leistung

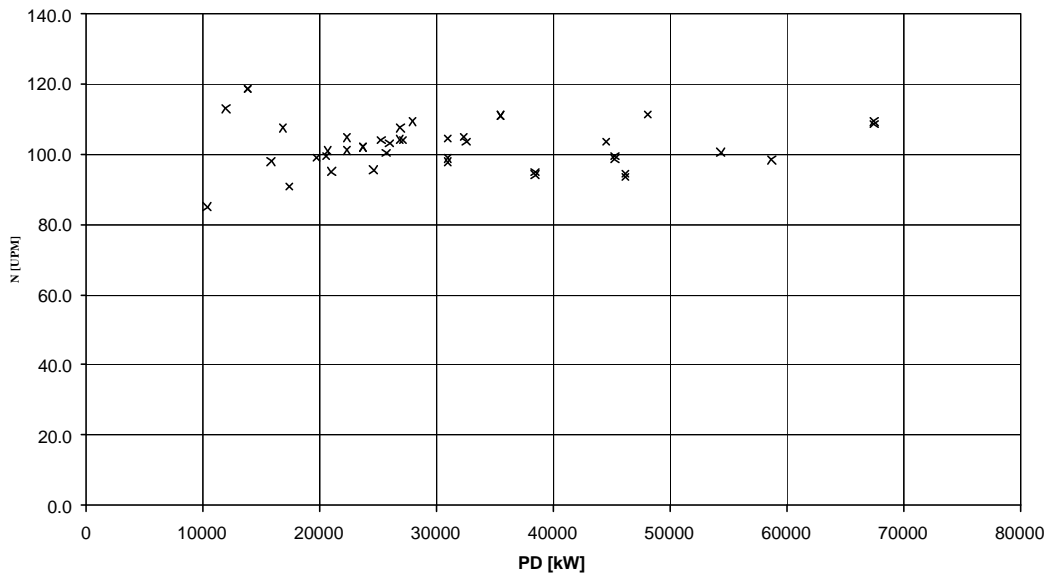


Abb. 3.4 Designdrehzahl in Abhängigkeit von der Leistung P_D

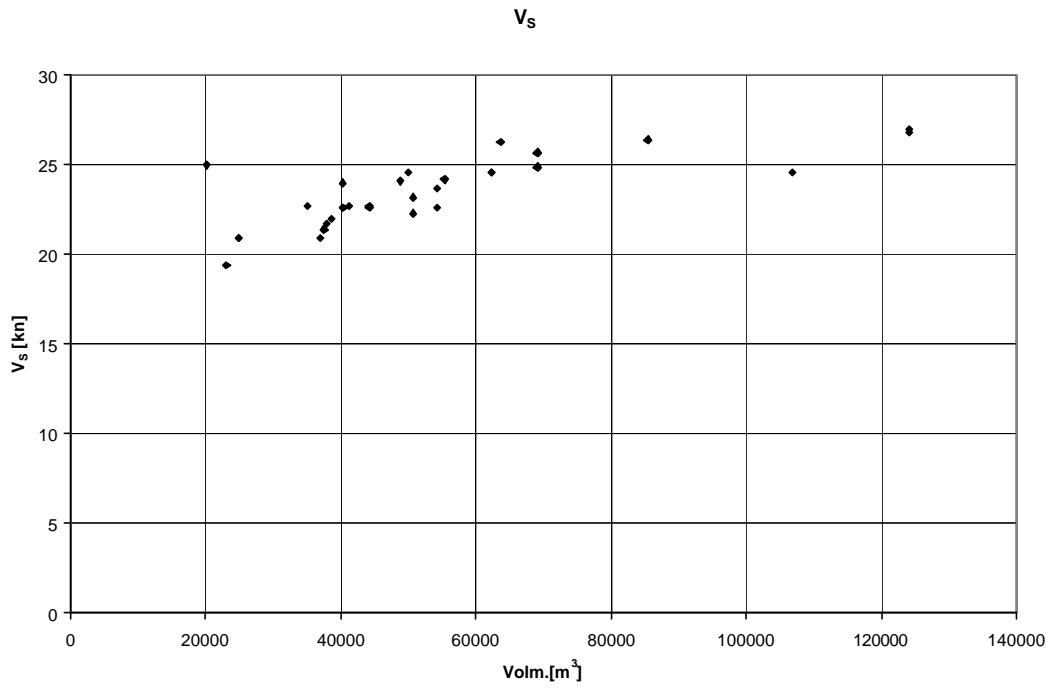


Abb. 3.5 Dienstgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verdrängung

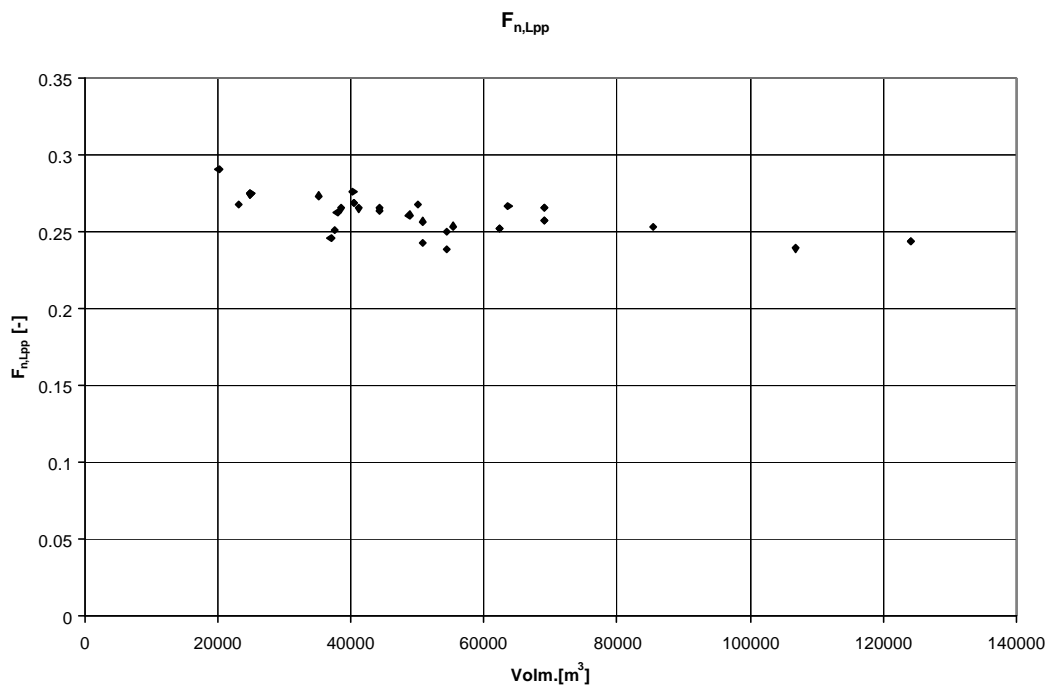


Abb. 3.6 Froudezahl bei Dienstgeschwindigkeit $F_n = f(L)$

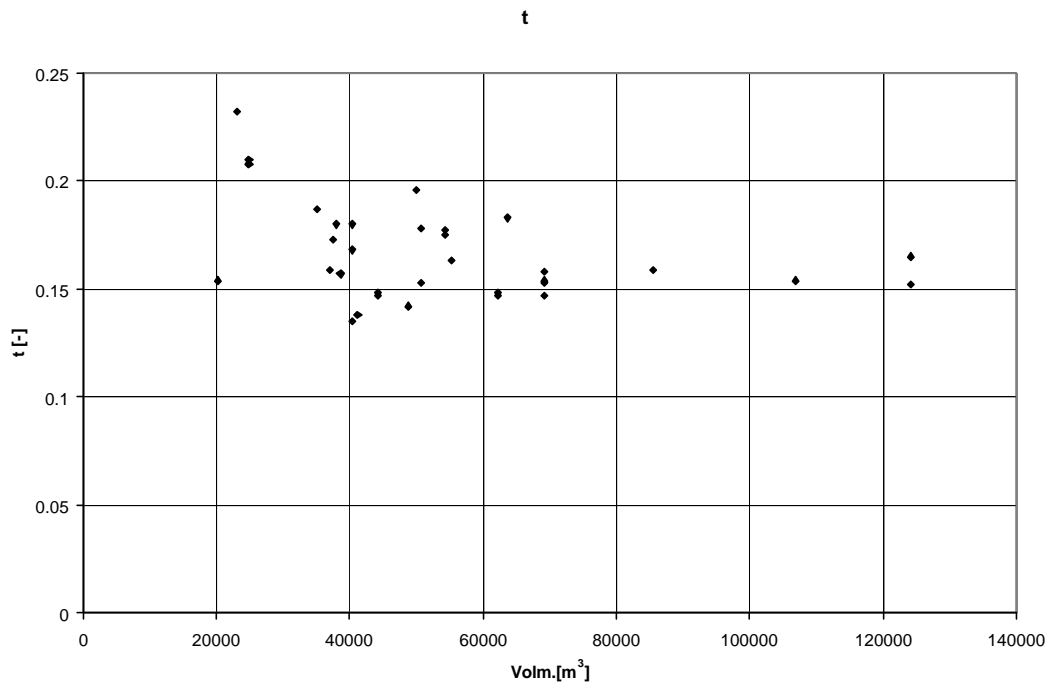


Abb. 3.7 Sogziffer t bei Dienstgeschwindigkeit

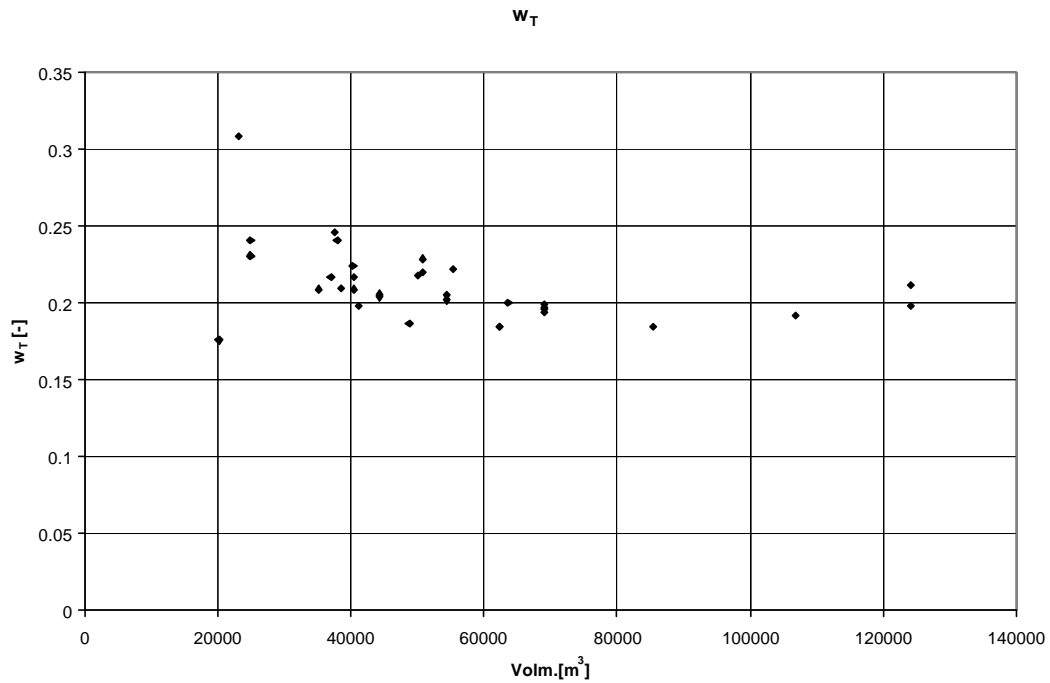


Abb. 3.8 Nachstromziffer w_T bei Dienstgeschwindigkeit

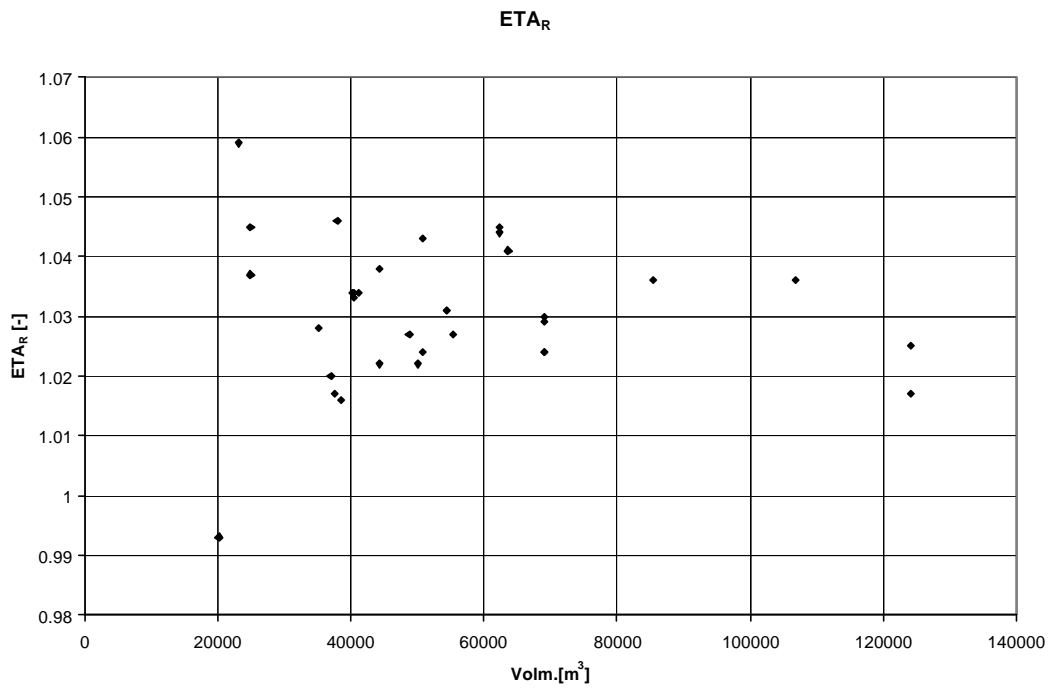


Abb. 3.9 Gütegrad der Anordnung bei Dienstgeschwindigkeit

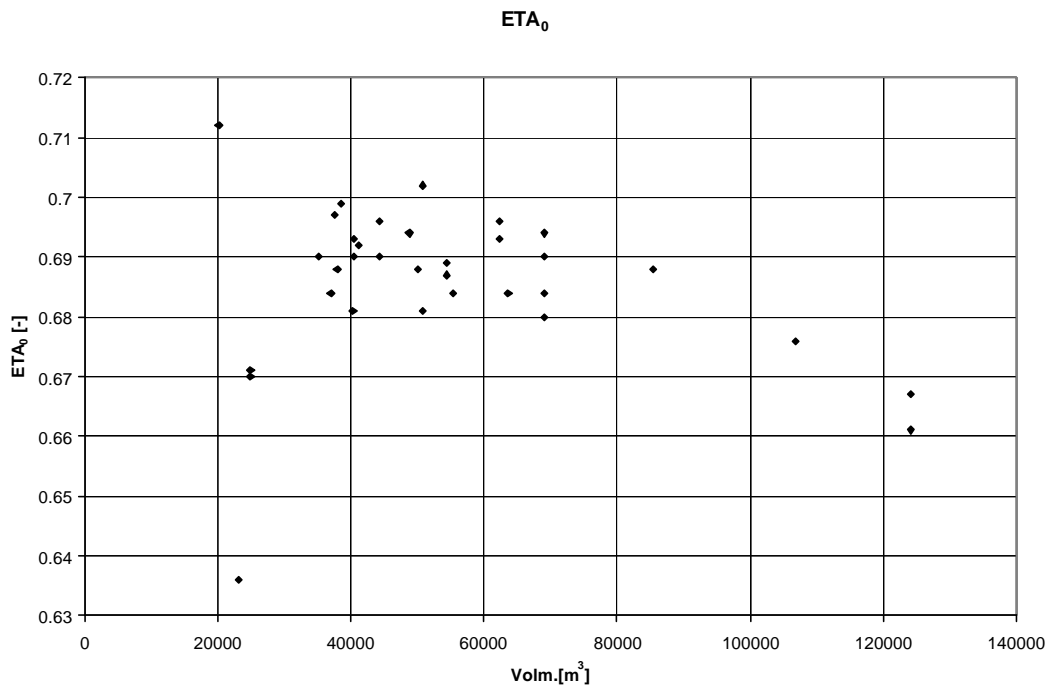


Abb. 3.10 Realisierte Propellerwirkungsgrade bei Dienstgeschwindigkeit

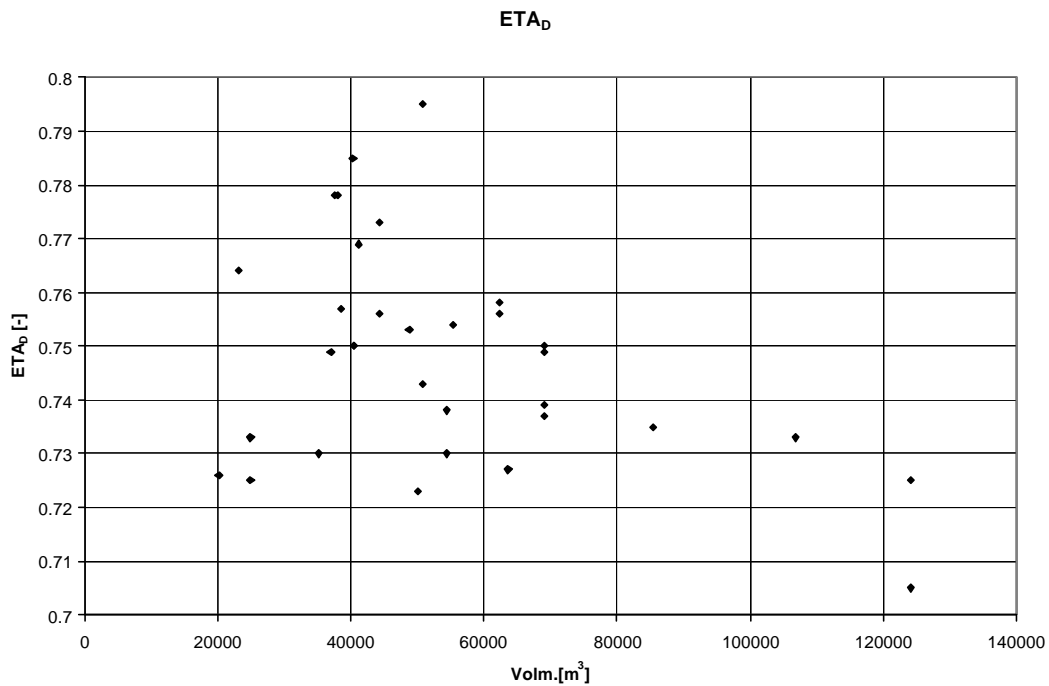


Abb. 3.11 Gesamtwirkungsgrad der Propulsion bei Dienstgeschwindigkeit

Im HYKAT nahe den Entwurfsbedingungen untersuchte Containerschiffe von über 10 MW Leistung

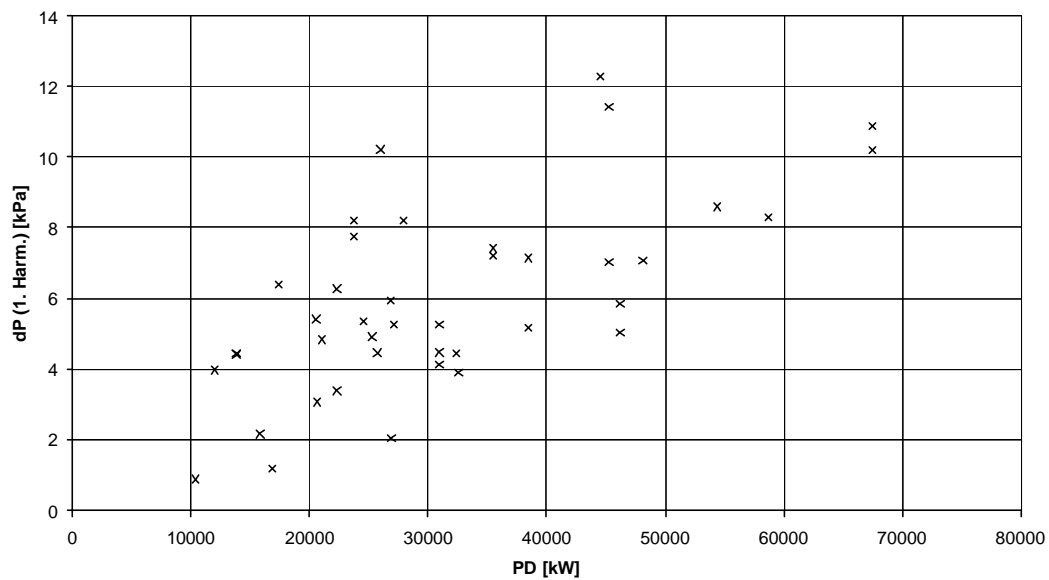


Abb. 3.12 Gemessene Druckimpulse der 1. Harmonischen bei Dienstgeschwindigkeit

4. Besondere hydrodynamische Probleme sehr großer Containerschiffe

Da die Entwicklung zu den sehr großen Containerschiffen (> 7.000 TEU) nicht sprunghaft erfolgt ist, sind die auftretenden hydrodynamischen Probleme für den Schiffsentwurf Stufe für Stufe jeweils aufgetreten und gelöst worden. Aus heutiger Sicht gibt es neben dem

Propellerentwurf, der weiter unten behandelt wird, nur zwei wesentliche Probleme die besondere Sorgfalt erfordern: Ruder kavitation und parametrische Rollbewegungen. Beide Erscheinungen sind bereits für kleinere Einheiten relevant.

4.1 Ruder kavitation

Nicht nur die Schiffe und ihr Antriebsorgan, sondern natürlich auch das Ruder nehmen bei sehr großen Containerschiffen fast unvorstellbare Dimensionen an; die drehbaren Teile der Ruder sind z. B. höher als 12 m und oft länger als 7 m. Durch die hohe Geschwindigkeit und als Folge der außerordentlich hohen Leistung, die der Propeller ins Wasser bringt, ist die Ruderbelastung auch schon bei kleinen Ruderwinkeln, die im Schiffsbetrieb ständig auftreten, sehr hoch. Dadurch sind die Ruder stark kavitationsgefährdet. Erosionserscheinungen am Ruder, bereits nach kurzer Betriebszeit, sind die Folge.

Im HYKAT der HSVA sind in den letzten Jahren verstärkt Untersuchungen zu diesem Problem vorgenommen worden, diese zeigen, dass bei sorgfältiger Rudergestaltung und Anordnung, derartige Erscheinungen minimiert werden können. Die Abbildung 4.1 zeigt die Skizzen der Kavitationserscheinungen auf der Saugseite eines Ruders bei Ruderwinkeln von 4° und 10° für ein sehr großes Containerschiff.

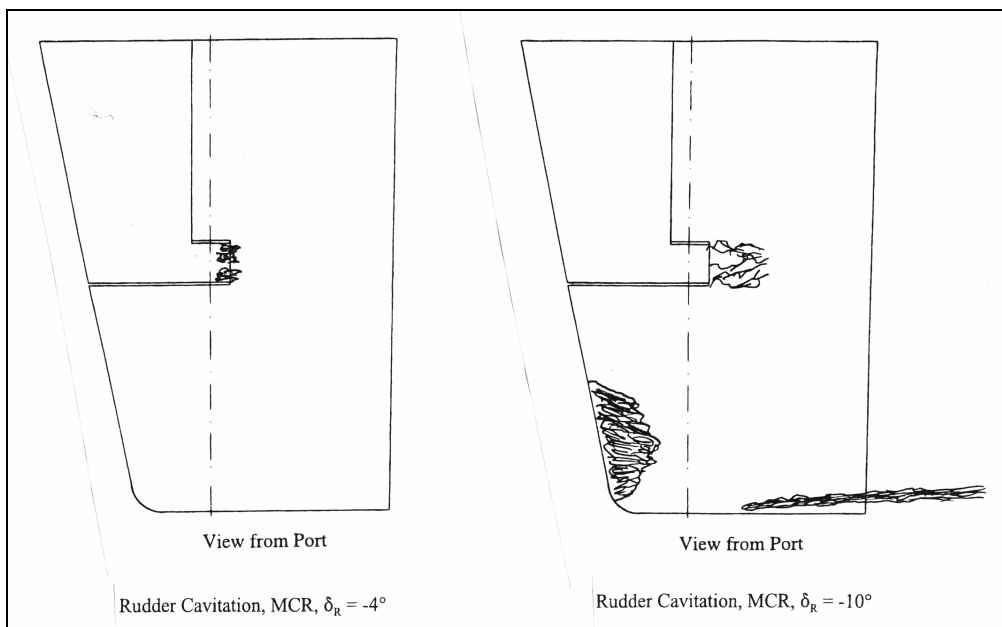



Abb. 4.1 Kavitationserscheinungen am Ruder bei Ruderwinkeln von 4° und 10° für ein sehr großes Containerschiff

4.2 Parametrische Rollbewegungen

Parametrische Rollbewegungen können entstehen, wenn die Wellenlänge entgegen- oder mitlaufender See etwa der Schiffslänge entspricht. Durch signifikante Wechsel der Stabilität (hohe Stabilität bei Schiff im Wellental, niedrige Stabilität bei Schiff auf dem Wellenberg) kann es zu erheblichen Rollbewegungen kommen, wenn die erregende Periode ein Vielfaches der halben Eigenperiode des Schiffes ist. Bei der halben Eigenperiode ergeben sich die größten Rollbewegungen. Auch ein Kentern ist nicht vollständig auszuschließen.

Dieses Problem gilt eigentlich für alle Schiffe. Grosse Containerschiffe sind aber wegen ihrer zu den Wellen der Ozeane „passenden“ Hauptabmessungen und durch die sehr niedrigen GM-Werte besonders gefährdet.

	Hydrodynamische Aspekte sehr großer Containerschiffe Schiffbauforschung 40 (2001) Nr. 4, S. 39-57	17
---	--	----

Schutz vor parametrischen Rollbewegungen kann erreicht werden durch eine geeignete Wahl der Schiffsform, insbesondere der Schiffsenden, im Zusammenhang mit aktiven Stabilitätsmaßnahmen wie Stabilisierungsflossen oder Schlingerdämpfungs-Tanks.

Weitere Maßnahmen gegen parametrische Rollbewegungen im Schiffsbetrieb sind höhere GM-Werte durch entsprechende Ladungs- und Ballastwasserverteilung oder letztendlich Kurs- oder Geschwindigkeitsänderung des Schiffes aus dem Bereich der parametrischen Erregung heraus. Aktive Maßnahmen sind in jedem Falle besser.