

# Zur Antriebsleistung von sehr großen Containerschiffen

Friedrich Mewis, HSVA

## 1. Einleitung

Innerhalb von nur 50 Jahren hat sich die Ladekapazität der jeweils größten Containerschiffe von einigen 100 Containern im Jahr 1956 auf mehr als 8000 TEU im Jahr 2005 vergrößert. Ein Schiff mit 9200 TEU Ladekapazität ist im Bau und soll 2005 in Dienst gestellt werden. Im Verlauf dieser Entwicklung mussten zahlreiche Entwurfs- und Konstruktionsprobleme überwunden werden, die durch die immer größeren Schiffe entstanden sind. Der Grund für das bis heute ungebrochene Anwachsen der Containerschiffs-Größe ist einfach und logisch: je größer die Schiffe, desto billiger der Transport.

Durch die zunehmende Globalisierung des Welthandels und der Warenherstellung ist das Transportvolumen der Welt-Containerschiffahrt seit 30 Jahren im Mittel um jährlich 8% gestiegen. Diese Tendenz ist ungebrochen und hat sich in den letzten Jahren eher noch verstärkt.

Das Antriebskonzept für die Containerschiffe hat sich bis auf eine kurzzeitige Ausnahme am Beginn der 70er Jahre nicht verändert; Containerschiffe werden als Einschrauber mit direkt antreibendem Dieselmotor am wirtschaftlichsten betrieben.

Bekanntlich können größere Schiffe mit einer geringeren spezifischen Leistung auskommen, brauchen aber absolut doch höhere Leistungen, um die gleiche Geschwindigkeit zu erreichen wie kleinere Schiffe. Wegen der längeren Hafentiegezeiten der großen Schiffe müssen sie zudem noch schneller fahren als kleinere mit denen sie in Konkurrenz stehen. So hat sich der Leistungsbedarf der Containerschiffe seit den 60er Jahren zur Triebkraft für die Entwicklung der langsam laufenden Dieselmotoren erwiesen. Die größten zurzeit zur Verfügung stehenden Motoren liefern mit 12 Zylindern 68.6 MW (MCR); Motoren mit 14 Zylindern mit 80.1 MW sind bereits bestellt, aber noch nicht ausgeliefert.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens ANCON (Methode zur Berechnung der Antriebsleistung für sehr große Containerschiffe) wurde in der HSVA ein Verfahren entwickelt, das auf der Basis von Hauptabmessungen die Vorausberechnung der erforderlichen Antriebsleistung sehr großer Containerschiffe im Projektstadium gestattet. Voraussetzung dafür waren die vorhandenen Daten in der HSVA Datenbank sowie der Zuwachs an Daten für sehr große Containerschiffe während der Bearbeitungszeit der Forschungsaufgabe. So hat die HSVA allein in den letzten 2 ½ Jahren 15 kommerzielle Projekte mit Post-Panmax Containerschiffen bearbeitet, wovon 11 Schiffe eine Ladekapazität von mehr als 8000 TEU hatten.

Im vorliegenden Beitrag wird der Begriff VLCS (Very Large Container Ships) für alle Schiffe benutzt, die nicht mehr durch den Panama-Kanal (post panmax ships) passen, weil sie breiter als 32.3 m sind.

**Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03SX149 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.**

## 2. Vergangenheit und Zukunft der Containerschiffe

Im Jahr 1956 nahm der umgebaute amerikanische T2-Tanker "Ideal X" mit 58 Container-Stellplätzen einen regelmäßigen Containerdienst von Port Newark nach Houston in Texas auf. Das war die Geburtsstunde der Containerschiffahrt. Die ökonomischen Vorteile waren so überzeugend, dass in den USA bald weitere Schiffe für diesen speziellen Transport umgebaut wurden. Das erste nur für den Containerdienst gebaute Schiff ohne eigenes Bordgeschirr die „Sea-Land Venture“ (Abb. 1), wurde schon 1961 in Dienst gestellt. Seither haben sich die Containerisierung und die Größe der Containerschiffe nahezu kontinuierlich zu immer größeren Schiffen entwickelt.



Abb. 1: „Sea-Land Venture“, das erste Voll-Containerschiff (aus Witthoef, 2000)

Abb. 2 zeigt das mit 9200 TEU Containerkapazität z. Zt. größte Containerschiff der Welt „MSC Pamela“; Bauwerft Samsung/Korea. Die wichtigsten Hauptabmessungen dieses Schiffes sind:

Lüa = 336.70 m  
 B = 45.60 m  
 $T_{\text{Scantling}}$  = 14.50 m  
 Geschwindigkeit = 25 kn



Abb. 2: „MSC Pamela“, 9200 TEU, 2005 das größte Containerschiff

Soweit heute zu übersehen ist, wird die Größe der Containerschiffe in absehbarer Zeit weiter ansteigen. Schiffe bis zu 10000 TEU Container-Kapazität sind in Planung.

Es ist anzunehmen, dass auch weiterhin ausschließlich Einschrauber gebaut werden, weil Zweischrauber deutlich teurer sind, wie Abb. 3 zeigt. Aus heutiger Sicht sind Zweischrauber ab etwa 12000 TEU konkurrenzfähig (Stopford, 2002).

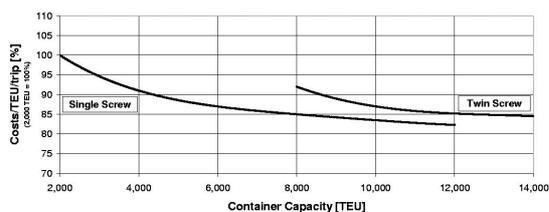


Abb. 3: Economy of Scale, relative Kosten pro TEU; Ein- und Zweischrauber

Die Entwicklung in der Zukunft kann niemand voraussagen, ein Blick in die Vergangenheit zeigt jedoch, dass nach Überwindung der Größenbeschränkung durch den Panamakanal am Beginn der 90er Jahre sich das Entwicklungstempo nahezu verdoppelt hat, siehe dazu Abb. 4.

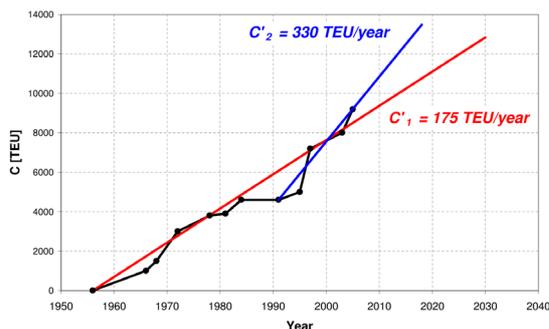


Abb. 4: Entwicklung der maximalen Ladefähigkeit

Im Moment stellt sich die überschaubare Entwicklung so dar: ein Schiff für 9200 TEU wurde 2005 ausgeliefert, 10000 TEU Schiffe sind bestellt und 12000 TEU Schiffe werden bereits in Versuchsanstalten untersucht.

Das größte Problem aus hydrodynamischer Sicht ist dabei die erforderliche Geschwindigkeit und Antriebsleistung, siehe dazu Tabelle 1, und alle damit zusammenhängenden Probleme für die Antriebsanlage, sowohl was die Bereitstellung der Leistung (Motor) als auch die Übertragung dieser auf das Wasser (Hinterschiff, Propeller, Ruder) betrifft.

### 3. Geschwindigkeit und Leistung

Durch die längeren Hafenliegezeiten müssen größere Containerschiffe schneller fahren als kleinere, um mit diesen konkurrieren zu können. Deshalb spielt die Schiffsgeschwindigkeit bei den großen Containerschiffen eine so herausragende Rolle. Für Schiffe >6000 TEU sind Dienstgeschwindigkeiten von über 25 kn erforderlich. In Tabelle 1 sind die etwa erforderlichen Geschwindigkeiten und die dafür zu installierenden Leistungen zusammengestellt.

**Tabelle 1: Einschrauber, erforderliche Geschwindigkeit und Leistung**

Capacity [TEU]	Required Service Speed [kts]	Required Engine Power (MCR) [MW]	Power at Propeller ( $P_D$ ) [MW]
6,000	25,1	57	44
8,000	25,4	70	54
10,000	25,7	82	63
12,000	26,0	95	73

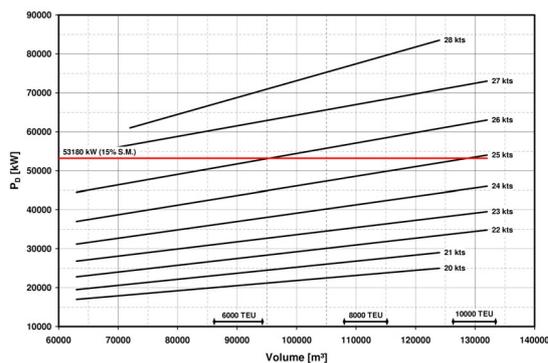
Da der Einschrauben-Propeller direkt mit dem Motor verbunden ist, kommt eine Mehrmotorenanlage nicht in Frage, so begrenzt immer der größte zur Verfügung stehende Motor die Möglichkeiten. Zurzeit erzeugt dieser Motor 68640 kW mit 12 Zylindern.

Am Propeller steht für den Schiffsantrieb jedoch nicht die am Motor (theoretisch) erzeugbare Leistung MCR zur Verfügung, sondern nur die Propellerleistung  $P_D$ , die bei 15% Sea Margin etwa 77% der installierten beträgt, wie Tabelle 2 zeigt.

**Tabelle 2: Bestimmung der Leistung am Propeller**

MCR	68,640 kW		$P_{B \max}$
NCR (e.g. 90% MCR)	61,780 kW		$P_B$
Shaft Losses 1% (-620 kW)	61,160 kW		$P_{D \text{ service}}$
Sea Margin	15%	20%	
Contract Power (Trial)	53,180 kW	50,970 kW	$P_{D \text{ trial}}$

In Abb. 5 sind vereinfachte Kurven des Leistungsbedarfs für sehr große Containerschiffe zusammengestellt. Der Leistungsstrich bei  $P_D = 53$  MW, das ist die zur Verfügung stehende Propellerleistung bei 15% Sea Margin, zeigt, dass ein 6000 TEU Schiff die erforderliche Geschwindigkeit ohne Probleme auch mit einem kleineren Motor erreicht, das 8000 TEU Schiff dagegen gerade so die 25.4 kn erreicht, während alle größeren Schiffe zu langsam sind.



**Abb. 5: Leistungsbedarf von VLCS**

## 4. Mögliche Lösungen des Geschwindigkeitsproblems

Das augenblickliche Geschwindigkeitsproblem der sehr großen Containerschiffe könnte durch eine extreme Erhöhung der Brennstoffpreise ad absurdum geführt werden, weil dadurch vielleicht die Notwendigkeit einkehren könnte, mit niedrigeren Geschwindigkeiten zu fahren. Stopford, 2002, weist nach, dass aus wirtschaftlicher Sicht vorläufig nicht damit zu rechnen ist. Im Nachfolgenden wird deshalb davon ausgegangen, dass die Entwicklung zunächst so weiter geht wie in den letzten 15 Jahren. Im folgenden Text sind die zurzeit

überschaubaren Möglichkeiten einer Geschwindigkeitserhöhung zusammengestellt und gewertet. Die aufgezählten Maßnahmen sind in der Reihenfolge ihrer Wahrscheinlichkeit der Realisierung angeordnet.

- Optimierung der Schiffslinien und der Propulsionsorgane  
Hier ist nur noch ein geringes Einsparungspotential vorhanden, das im Durchschnitt etwa 5% Leistung beträgt, die mögliche Geschwindigkeitserhöhung: 0.3 bis 0.4 kn. Sehr gut optimierte Schiffsentwürfe haben dieses Potential bereits ausgeschöpft.
- Power Take In (PTI)  
Installation eines zusätzlichen elektrischen Antriebes auf der Welle; Anlagen von bis zu 5 MW sind in Betrieb, erhöhen die zur Verfügung stehenden Leistung um ca. 8%, die mögliche Geschwindigkeitserhöhung beträgt etwa 0.6 kn.
- Größerer Motor  
Antriebsmotor mit mehr als 12 Zylindern; 14-Zylinder-Motoren (MCR: 80,1 MW) sind bereits bestellt, das bedeutet eine Erhöhung der Antriebsleistung um 17%, die mögliche Geschwindigkeitserhöhung beträgt etwa 1 kn.
- Zweischrauber  
Theoretisch wäre eine Verdoppelung der Antriebsleistung möglich, was jedoch gar nicht erforderlich ist. Es wäre kein Problem für ein 12000 TEU Containerschiff die 95 MW zu installieren, die etwa erforderlich sind, um 26 kn zu erreichen. Den vielen weiteren hydrodynamischen Vorteilen, wie kleinere Propeller- und Ruderbelastung, stehen zurzeit nur die höheren Baukosten entgegen. Nach Stopford, 2002, beginnt bei 12000 TEU der 2-Schrauber wirtschaftlicher zu werden als das 8000 TEU- Schiff mit einer Schraube.
- Pod-Antrieb hinter dem Hauptpropeller  
Diese Lösung wird von einigen Pod-Herstellern propagiert; sie hat jedoch zwei entscheidende Nachteile: erstens arbeitet der Pod (20 MW) im Propellerstrahl des Hauptantriebes (53 MW) und muss erhebliche Kavitationsbelastungen aushalten, zweitens ist die Lastverteilung 73%/27% der beiden kontrarotierenden Propeller nicht optimal. Dieses Arrangement scheint deshalb zur Erhöhung der Geschwindigkeit von VLCS wenig geeignet.
- Zusätzliche Pod-Antriebe neben dem Hauptpropeller  
Diese Lösung ist hydrodynamisch denkbar und würde zu einer großen Leistungserhöhung führen (+2 x 20 MW). Es ist aber anzunehmen, dass die deutlich höheren Kosten dieser Quasi-Dreischrauber-Variante die Realisierung verhindern werden.
- Verringerung der Geschwindigkeit aller Einschrauber  
Diese vernünftig erscheinende Variante ist zurzeit schwer vorstellbar.

## 5. Spezielle hydrodynamische Probleme sehr großer Containerschiffe, die durch den hohen Leistungsbedarf entstehen

### Propellerkavitation und Erosion

Die maximalen Propellerdurchmesser der VLCS sind seit 10 Jahren eigentlich nicht mehr gewachsen, obwohl die installierten Leistungen erheblich angestiegen sind. Der Grund dafür ist der mit der Schiffsgröße unveränderte Tiefgang von maximal ca. 14.5 m, der wiederum durch die Wassertiefen in den Häfen bestimmt wird. Dadurch steigt die Propellerbelastung für VLCS mit steigender Schiffsgröße, siehe dazu Abb. 6.

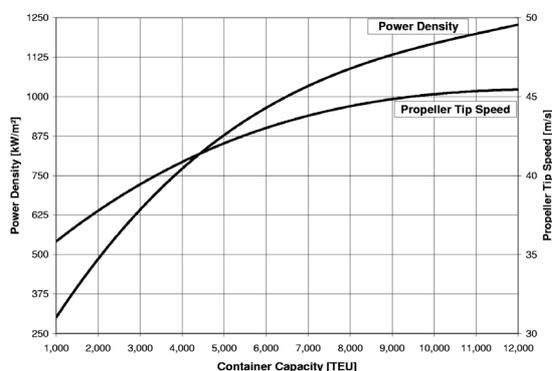


Abb. 6: Leistungs-Dichte und Propeller-Spitzengeschwindigkeit (MMG, 2001)

Erstaunlicherweise sind erfahrene Propellerdesigner aber trotzdem in der Lage einen kavitationsarmen Propeller für derartige Bedingungen zu entwerfen. Die Hauptdaten eines heutigen Propellers für ein 8000 TEU Schiff sind etwa folgende:

$$D_p = 8.90 \text{ m}$$

$$Z = 6$$

$$A_E/A_O = 0.95$$

### Ruderkavitation und Erosion

Infolge der hohen Propellerbelastung und der hohen Schiffsgeschwindigkeit sind auch die Ruder sehr hoch belastet. Erosionserscheinungen nach wenigen Wochen im Einsatz sind keine Seltenheit. Dem hydrodynamischen Design des Ruders sollte also eine hohe Aufmerksamkeit gezollt werden, es sollte von spezialisierten Designern entworfen werden, wie für Propeller selbstverständlich. Trotz der immensen Größe (ca. 70 m<sup>2</sup> bei einem 9000 TEU VLCS) sollte das Ruder ein Voll-Spatenruder sein, die Profile sollten getwistet sein und der Ruderboden vorn abgerundet sowie die seitlichen Einläufe abgeschrägt. Auf die Qualität und Maßhaltigkeit der Ruderoberfläche sollte mehr Wert gelegt werden.

Abb. 7 zeigt das Foto eines solchen Ruders für ein 8400 TEU Containerschiff mit 67 m<sup>2</sup> Ruderfläche, das 2005 in Dienst gestellt wurde (Bauwerft DSME, Korea; Ruderdesign BMS, Hamburg).



Abb. 7: Getwistetes Ruder eines 8400 TEU Containerschiffes (BMS-Design)

## 6. Methode zur Bestimmung der Antriebsleistung sehr großer Containerschiffe

### 6.1 Grundlegende Bemerkungen

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens ANCON (Methode zur Berechnung der Antriebsleistung für sehr große Containerschiffe) wurde in der HSVA ein Programm entwickelt, das auf der Basis von Hauptabmessungen die Vorausberechnung der erforderlichen Antriebsleistung sehr großer Containerschiffe im Projektstadium gestattet. Voraussetzung dafür waren die vorhandenen Daten in der HSVA Datenbank.

Die HSVA besitzt eine lange Tradition bei der Entwicklung von Leistungs-Prognoseverfahren auf der Basis von einfachen Eingabedaten. Der Grund dafür ist die ständig wiederkehrende Aufgabe, bereits im Projektstadium eines Schiffes auf der Basis der Hauptabmessungen (Länge, Breite, Tiefgang, Verdrängung) eine verlässliche Leistungsprognose erstellen zu können, bzw. eine Geschwindigkeitsprognose auf der Basis einer bekannten

installierten Leistung abzugeben. Auch die umgekehrte Fragestellung nach der Optimierung der Hauptabmessungen im frühen Projektstadium ist häufig gegeben. Entwickeln sich neue Schiffstypen, wie zum Beispiel die sehr großen Containerschiffe in den letzten 15 Jahren, geraten die vorhandenen Leistungs-Berechnungsverfahren schnell an ihre Grenzen. Sie müssen entweder neu justiert werden, oder es müssen neue Verfahren entwickelt werden.

Die Mehrzahl der klassischen Leistungs-Berechnungsverfahren geht von der Schätzung eines Restwiderstandsbeiwertes und der Propulsionskennziffer aus, benutzt Serienpropellerdiagramme (z. B. Holtrop, 1982).

Ein alternatives Verfahren von Helm, das in der HSVA seit 1986 eingesetzt wird, prognostiziert mit einem minimalen Eingabesatz, der auch den Propellerdurchmesser und die Nenndrehzahl bei der Entwurfsgeschwindigkeit enthält, den Leistungs-Verdrängungs-Koeffizienten

$$C_{DV} = \frac{P_D}{\frac{\rho}{2} V^3 \cdot \nabla^{2/3}}$$

in Abhängigkeit der Froudezahl.

Dieses Verfahren ist sehr robust, setzt aber geeignete Vergleichsschiffe zur Korrelation der Ergebnisse voraus.

Für sehr große Containerschiffe werden die  $C_{DV}$ -Verläufe mit diesem Verfahren schlecht geschätzt, so dass es praktisch nicht anwendbar ist, zumal für die immer größer werdenden Schiffs-Projekte gar keine Vergleichsschiffe vorhanden sein können. Ein weiterer Grund für die Ungenauigkeit des Verfahrens ist, dass für VLCS der optimale Propellerdurchmesser wegen der Tiefgangsbeschränkungen nicht realisiert werden kann, siehe dazu auch Abschnitt 5.

Eine wichtige Frage bei der Anwendung derartiger Prognoserechnungen ist: wie genau müssen bzw. können solche Prognosen überhaupt sein? Gelegentlich werden in Publikationen von Prognoseverfahren Fehlergrößen angegeben, die das Verfahren bei Anwendung auf das Ausgangskollektiv liefert. Dies gibt aber nur eine Abschätzung für die Güte des Approximationsmodells.

Die Standardabweichung kann als Grenze eines 68%-Konfidenzintervalls gesetzt werden (eine Normalverteilung der statistischen Größe vorausgesetzt). Was bedeutet eine angegebene Standardabweichung  $S$  für den Anwender? Hier ist äußerste Aufmerksamkeit geboten, liegt der wahre Wert doch nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% in einem Bereich von  $\pm S$  um den errechneten Schätzwert. In 32% aller Fälle ist der Fehler größer.

Die Anwendung einer Prognosemethode auf Vergleichsschiffe gibt einerseits eine Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeit, andererseits können systematische Abweichungen erkannt und der Grad der Abweichung als Korrekturfaktor bei der Prognose verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit bietet das von Keil 1986 entwickelte Verfahren, nach dem die Modellversuchsergebnisse der Vergleichsschiffe auf das Verdrängungsvolumen des Projektschiffes umgerechnet werden. Die Leistungskurven der skalierten Vergleichsschiffe werden gemeinsam mit den Punkten der Leistungsprognose des Projektschiffes graphisch dargestellt. Dieses Diagramm ermöglicht eine Beurteilung, ob die Leistungsprognose noch zu korrigieren ist, um etwa eine durchschnittliche Leistungskurve zu erhalten oder eine Leistungskurve, die bei einem optimalen Entwurf zu erwarten ist.

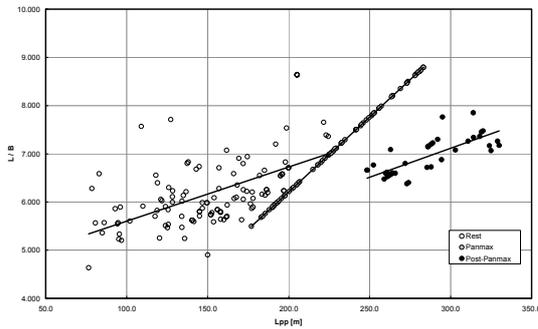
In der HSV-Datenbank sind zurzeit über 5300 Modellversuchsreihen (normalerweise je ein Widerstands- und ein Propulsionsversuch) gespeichert. Es sind sowohl für die Datenbank aufbereitete Datensätze verfügbar (u.a. die Auswertung für Probefahrtsbedingungen) als auch die den Versuchsberichten zugrunde liegenden Projektdateien mit den Messdaten.

## 6.2 Auswahl der Versuche

Die zur Analyse herangezogenen Versuche wurden eingeschränkt auf Versuche bei Konstruktionstiefgang im unvertrimmten Modellzustand. Diese Versuche sollten alle ein vergleichbares Optimierungsniveau der Schiffsform besitzen. Da in der HSVA sämtliche Versuche archiviert werden, sind auch die Versuche mit nicht optimierten Modellvarianten Teil des Dateninhalts der Datenbank. Für die sehr großen Containerschiffe zeigt sich durch die Schiffsformoptimierung innerhalb der Projektbearbeitung ein mittlerer Gewinn in  $P_D$  von 4.5 %, der maximale Gewinn beträgt hier 14.7 %.

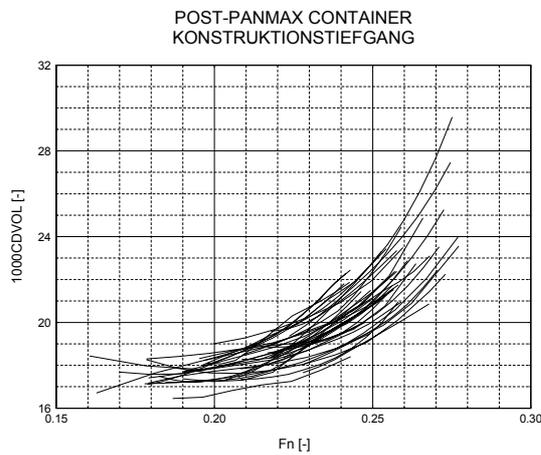
Bei der Datenaufbereitung für das Prognoseprogramm wurden nur die Versuche mit den günstigsten Leistungsverläufen berücksichtigt. Um diese eindeutig zu kennzeichnen wurden sämtliche Versuche aller Containerschiffe geprüft und ein Versuch pro Modell in der Datenbank markiert. Diese Markierung zeichnet die jeweils leistungsgünstigste Formvariante aus und kann als Suchkriterium bei einer Datenbankabfrage genutzt werden.

Die folgende Abbildung 8 zeigt die Verteilung dieser 237 ausgewählten Versuche in die Klassen Post-Panmax, Panmax und restliche Containerschiffe. In den Diagrammen sind die Parameterbereiche der Post-Panmax Schiffe markiert.



**Abb. 8: Länge-Breiten-Verhältnis als Funktion von  $L_{PP}$**

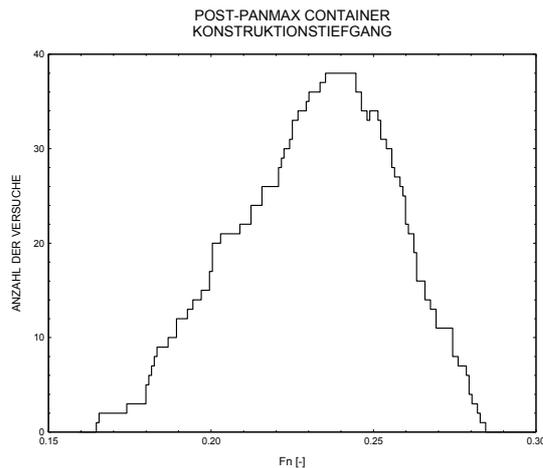
Für die weiteren Auswertungen wurden nur die Versuche der Post-Panmax-Schiffe herangezogen. Die 40 berücksichtigten  $C_{DV}$ -Verläufe zeigt die folgende Abbildung 9.



**Abb. 9:  $C_{DV}$  als Funktion der Froudezahl**

### 6.3 Datenaufbereitung

Als Schiffslänge wurde für alle folgenden Rechnungen die Länge in der Wasserlinie ( $L_{WL}$ ) verwendet. Sie dient als Bezugsgröße für die Berechnung von  $C_B$  und der Froudezahl  $F_n$ . Der von den Versuchen abgedeckte Froudezahlbereich zeigt die Abbildung 10; es gibt keinen Bereich, der von allen Versuchen abgedeckt wird.



**Abb. 10: Froudezahlbereich der Versuche**

Da die Grundgesamtheit bei jeder Froudezahl unterschiedlich ist und die Stichprobenzahl vergleichsweise klein, wurde ein einfaches bilineares Regressionsmodell mit folgender Ansatz für  $C_{D\nabla}$  gewählt:

$$C_{D\nabla}(F_n) = a_0(F_n) + a_1(F_n)\nabla^{\frac{1}{3}} + a_2(F_n)C_B$$

Im Froudezahlbereich zwischen 0.185 und 0.270 wurden 11 Koeffizientensätze dieser Funktion bestimmt. Um die bei diesem Vorgehen unvermeidlichen Schwankungen im Kurvenverlauf einer späteren Prognose auszugleichen, werden die durch die Regressionskoeffizienten bestimmten Stützstellen mit einer Funktion geglättet, die die  $C_{D\nabla}$ -Verläufe der Versuche gut beschreibt:

$$C_{D\nabla}(F_n) = b_0 + b_1 \cdot \exp(F_n^6 - 1) + b_2 \cdot F_n + b_3 \cdot F_n^2$$

## 6.4 Einsatz eines künstlichen neuronalen Netzes

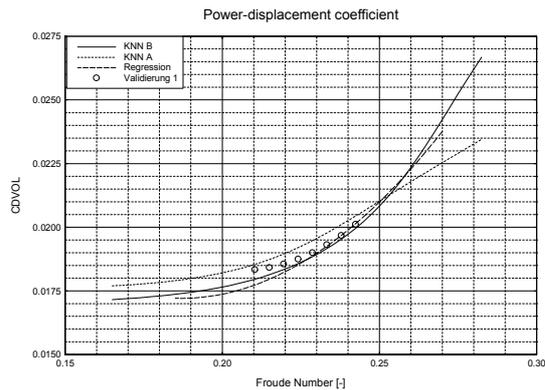
Alternativ wurden für die Interpolation des Datensatzes künstlich neuronale Netze (KNN) verwendet. Auf die Beschreibung der Details wird hier verzichtet. Eine große Anzahl von Netzen wurde erstellt, um in der Anwendungen dieser Technik erste Erfahrungen zu sammeln. Im Gegensatz zum Regressionsansatz wurden hier alle Versuchspunkte verwendet. Die oberen und unteren Geschwindigkeitspunkte dienen zur Erzeugung eines sinnvollen Kurvenverlaufs im zentralen Froudezahlbereich von 0.185 bis 0.270. Das schließt nicht aus, dass der Kurvenverlauf einer Prognose nicht im gesamten Froudezahlbereich von 0.165 bis 0.285 einen plausiblen Verlauf zeigt. Die Verwendung von Werten aus diesem Randbereich ist aber im Einzelfall kritisch zu überprüfen. Das Prognoseprogramm liefert unabhängig vom gewünschten Geschwindigkeitsbereich der Prognose, stets den gesamten Geschwindigkeitsbereich, den der aktuell gewählte Datensatz zulässt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse, die 2 ausgewählte KNN liefern, mit denen des Regressionsansatzes verglichen. Das erste KNN (A) hat die Eingangsgrößen  $F_n$ ,  $C_B$  und  $\nabla$  und ist daher gut mit dem Regressionsansatz zu vergleichen. Das zweite KNN (B) hat die Eingangsgrößen  $F_n$ ,  $C_B$ ,  $L/B$  und  $B/T$ . Tabelle 3 zeigt die Fehler, die die 3 Methoden bei Anwendung auf die Grundgesamtheit zeigen.

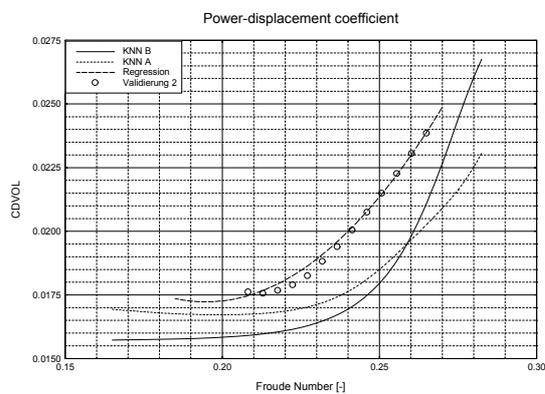
**Tabelle 3: Fehler bei Anwendung auf die Grundgesamtheit**

	Regres- sion	KNN (A)	KNN (B)
<b>Mittlerer Fehler [%]</b>	0.69	0.49	-0.05
<b>Standardabweichung [%]</b>	4.52	3.09	1.76
<b>Maximaler Fehler [%]</b>	11.92	9.34	7.99

Während der Programmentwicklung wurden in der HSVA weitere Projekte mit großen Containerschiffen bearbeitet, deren Auswertung nicht Teil der Grundgesamtheit ist. Die beiden Abbildungen 11 und 12 zeigen die Prognoseergebnisse für zwei dieser Versuche.

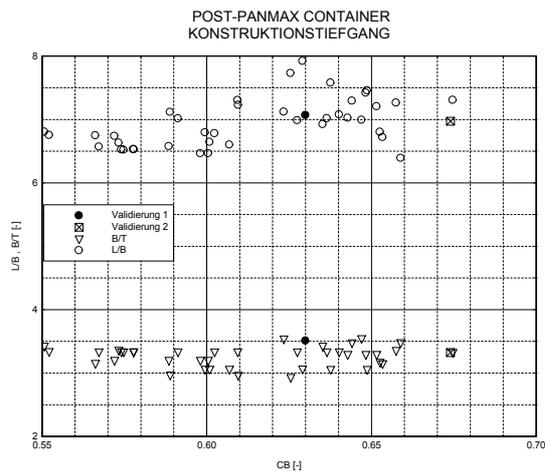


**Abb. 11: Validierungsversuch 1**



**Abb. 12: Validierungsversuch 2**

Die große Abweichung der beiden *KNN*-Kurven zu den Validierungsdaten in Abb. 12 wird verständlich, wenn man den Wertebereich der Grundgesamtheit mit den Daten der Validierungsschiffe vergleicht (Abb. 13).



**Abb. 13: Wertebereich der Grundgesamtheit**

Hier zeigt sich deutlich, dass der Blockkoeffizient des Validierungsschiffes 2 an der oberen Grenze des  $C_B$ -Wertebereichs liegt und in diesem Bereich nur ein Datenpunkt vorhanden ist. Das *KNN* hat in diesem Fall zu wenig Information um hier ausreichend zu generalisieren.

## 6.5 Anwendbarkeit der untersuchten Methoden

Eine Leistungsprognose bei Kenntnis der Hauptabmessungen ( $L_{WL}$ ,  $B$  und  $T$ ) und des Verdrängungsvolumen mit einem einfachen Regressionsansatz erreicht eine Prognosegenauigkeit von etwa 5%. Die Generalisierungseigenschaften der *KNN*, die eine bessere Genauigkeit erzielen als mit dem untersuchten Regressionsverfahren, sind für eine allgemeine Anwendung bei dem zur Zeit vorhandenen Datensatz zu schlecht; nur wenn die Projektdaten in einem Wertebereich liegen, die in der Grundgesamtheit gut vertreten sind, kann ein genaueres Prognoseergebnis erwartet werden.

Die oben beschriebene Interpretation der Fehlergrenze als Konfidenzintervall führt zu der Aussage, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 68% der wahre Wert einer Leistungsprognose innerhalb der Fehlergrenzen von  $\pm 5\%$  liegt. Diese Aussage lässt es natürlich zu, dass die Prognose auch (weit) außerhalb liegen kann. Unabhängig vom Prognoseverfahren, kann diese Situation nur durch vorhandene Vergleichsschiffe entschärft werden. Es wird erwartet, dass bei ähnlichen Blockkoeffizienten der Vergleichsschiffe durch die Skalierung auf das Verdrängungsvolumen des Projektschiffs, wie oben beschrieben, der Variationsbereich einer Prognose bestimmbar ist. Der Anwender kann so entscheiden, ob er im „sicheren Bereich“ bleiben will, oder mit einer Leistungsprognose arbeiten will, die einen weitgehend hydrodynamisch optimierten Entwurf voraussetzt.

## 7. Danksagungen

Ein großer Teil der dargelegten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojektes ANCON erzielt. Der Autor und die HSVA danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Unterstützung.

Besonderer Dank gilt den Kollegen der beiden deutschen Werften Aker-Ostsee Wismar und TNSW Emden, die als Berater und bei der Auswahl der Schiffmodelle tätig waren.

Der Dank des Autors gilt auch seinen Kollegen Monika Anders, Hilmar Klug und Hanno Stöhrmann, die entscheidend an der Bearbeitung der Forschungsaufgabe mitgewirkt haben.

Ferner bedanke ich mich bei den Firmen DSME (Korea), MMG und BMS (beide Deutschland) für die Erlaubnis zur Veröffentlichung ihrer Diagramme bzw. Fotos.

## 8. Schrifttum

Helm, G. (1986), „Bestimmung des Leistungsbedarfs von konventionellen Schiffen“, HSVA-Bericht WP1/86, 1986.

Holtrop, J. (1982), „An Approximate Power Prediction Method“, ISP, Vol. 29, pp. 166-170.

Keil, U.; Heller, R.; Gußner, C. (1988), „Entwurfsverfahren für Schiffe mit niedrigem Leistungsbedarf“, HSVA-Bericht, 1988.

Mewis, F.; Urban, M. (2001): „Hydrodynamische Aspekte großer Containerschiffe“, Schiffbau Forschung 40, 4, p. 39-60.

Mewis, F.; Klug, H. (2003), „Very Large Container Ships – Difficulties and Potential from the Hydrodynamic Standpoint“, The International Symposium on Naval Architecture and Ocean Engineering, September 23-26, 2003, Shanghai, P.R. of China.

Mewis, F.; Klug, H. (2004), „The Challenge of Very Large Container Ships – A Hydrodynamic View“, PRADS 2004, Lübeck-Travemünde, Germany, 12.-17. September 2004.

Stöhrmann, H. (1999), „HSVA Datenbank für Modell- und Schiffsdaten“, Teilbericht aus dem FE-Vorhaben: „Nutzung von Probefahrtsmessungen zur Verbesserung der Technik der Schiffmodellversuche und der Leistungsprognose“, HSVA-Bericht WP 09/99, 1999.

Stopford, M. (2002), „Is the Drive for Ever Bigger Containerships Irresistible“, Lloyds List Shipping Forecasting Conference, London, 26th April 2002.

Tozer, D.; Penfold, A. (2001): „Ultra-Large Container Ships (ULCS): designing to the limit of current and projected terminal infrastructure capabilities“, LR Technical Association Paper No. 5, Session 2001-2002.

Witthöft, H. J. (2000), „Container: Eine Kiste macht Revolution“, Köhler-Verlag, Hamburg, 2000, 224 pages.