

## Anwendungen

Nach der Darstellung der denkbaren Vorgehensweisen zur Simulation des Einflusses der begrenzten Wassertiefe bei Schiffsmanövern widmet sich dieses Kapitel der Betrachtung der Anwendungsmöglichkeiten der Verfahren.

### **6.1 Simulationsziele**

Bei der Wahl eines mathematischen Modells zur Simulation der Schiffsbewegungen steht das Ziel der Applikation als entscheidendes Kriterium im Vordergrund. Es sind verschiedene Anwendungen denkbar, wobei der Schwerpunkt entweder auf der Erzeugung einer möglichst umfassenden Nachbildung der Brückenumgebung des fahrenden Schiffes oder auf der Gewinnung exakter Daten liegt.

#### **6.1.1 Umgebungsmodellierung**

Als Beispiel für eine Simulationsanwendung, in der die Nachbildung aller Umgebungseindrücke im Vordergrund steht, kann ein Ausbildungssimulator genannt werden. Nicht nur in der Schifffahrt, sondern auch auf anderen Gebieten des Verkehrswesens (z.B. Luftfahrt, Raumfahrt, Straßenverkehr, Militär oder Verfahrenstechnik) wird die Simulationstechnik als wertvolles Hilfsmittel eingesetzt, um das Personal für die Praxis zu schulen. Verglichen mit den Kosten, die die Ausbildung am realen Objekt verursachen würde, sind selbst hochwertige Simulatoren eine preiswerte Alternative. Sie sind durchgehend verfügbar und ermöglichen es dem Probanden, auch kritische Situationen selbständig zu bewältigen, ohne daß eine reale Gefahr besteht.

In Großsimulatoren, wie z.B. den Schiffsführungssimulatoren in Hamburg oder am Marine Institute in Neufundland wird den Probanden eine nahezu perfekte Darstellung des Schiffsbetriebs geboten, wobei Rundumsicht und die Nachahmung der Schiffsbewegungen zu den hervorstechendsten Merkmalen zählen. Das Ziel dieser Bemühungen liegt darin, die simulierten Situationen für die Auszubildenden möglichst realitätsnah darzustellen, um einen guten Schulungserfolg sicherzustellen.

Der rechentechnische Aufwand für die Erzeugung einer perfekten Illusion ist so hoch, daß in den meisten Fällen mehrere Computersysteme erforderlich sind, um die Simulation in Echtzeit durchzuführen. Der Umfang der Berechnungen für den in die-

ser Arbeit allein betrachteten Teil der reinen Schiffsbewegung ist im Vergleich zur Bilderzeugung für die Hintergrundprojektoren oder die Radarbildschirme relativ gering.

Bedingt durch den bei den Schiffsmanövern ausgesprochen langsamen Ablauf der Simulation ist es für das zu schulende Personal schwierig, feine Unterschiede im Bewegungsverhalten wahrzunehmen. Eine extreme Genauigkeit des Algorithmus für die Berechnung der Bewegungsgrößen des Schiffes ist also nicht erforderlich.

### 6.1.2 Mathematische Modellierung

Bei einem Simulator, der speziell für die Berechnung des Bewegungsverhaltens von Schiffen eingesetzt wird, liegen die Schwerpunkte bezüglich der Anforderungen an das System in anderen Bereichen. Die Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Manöversimulation dient entweder der Untersuchung von hydrodynamischen Grundlagen, der Beantwortung spezifischer Fragestellungen aus der Praxis oder dem Bereitstellen oder Verbessern von Anwendungen in Ausbildungssimulatoren. In allen Fällen ist eine hohe Qualität der Ergebnisse gefragt, da sonst z.B. Parametervariationen nicht zu zufriedenstellenden Resultaten führen können.

Da die Qualität (und vielfach auch die Quantität) der Ergebnisse im Vordergrund steht, ist anzustreben, diese möglichst schnell zu erzielen. Der Verzicht auf die in einer Ausbildungssituation unabdingbare Echtzeit kann den Prozessor des Computers voll auslasten und liefert die Resultate in kürzest möglicher Zeit. Die Zeit wird in dem Ablauf der Simulation zwar mitgeführt, hat aber außer durch die Vorgabe des Taktes  $\Delta t$  keinen Einfluß auf die Geschwindigkeit der Berechnung.

Die visuelle Darstellung tritt vollkommen in den Hintergrund und ist nur für die vergleichende Gegenüberstellung von Interesse. Aus diesem Grund reicht eine mittelmäßige Rechnerleistung für die reine Bahnberechnung vollkommen aus. Das mathematische Modell dagegen ist in dieser Anwendung meist relativ anspruchsvoll, da bei numerischem Vergleich der Ergebnisse Details interessieren, die bei einem Ausbildungssimulator von den Probanden kaum wahrgenommen werden können.

Es ist also in Abhängigkeit von der Anwendung zu prüfen, wo die Schwerpunkte bei einer geplanten Simulation liegen, um den am besten geeigneten Algorithmus auswählen zu können. Großsimulationsanlagen können zwar mit mathematischen Modellen ausgestattet werden, die äußerst leistungsfähig sind, aber in vielen Fällen

wird ein relativ einfacher mathematischer Ansatz gewählt, um den Aufwand für die Bestimmung der hydrodynamischen Beiwerte einzelner Schiffe zu verringern.

## 6.2 Anwendung des Ansatzes für die Wassertiefe

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ansätze für die Berücksichtigung der Wassertiefe sind im Programm SIM realisiert worden. Dabei wurden die entsprechenden Module programmiert und durch die Fast-time-Simulation getestet. Die Beispiele in Kapitel 5 wurden in Form von Variationsserien, die über mehrere Stunden liefen, berechnet. Dazu wurde eine Makrosteuerung verwendet, die sämtliche Befehle des normalerweise interaktiven Programmablaufs von einer vorher erstellten Befehlsdatei einliest. Dies ermöglicht exakt reproduzierbare Simulationsserien und gezielte Variationen bestimmter Steuerparameter des Simulationsprogramms wie z.B. der Wassertiefe.

Der Potenzansatz für die Darstellung der Wassertiefenabhängigkeit der einzelnen Koeffizienten kann auf die verschiedensten Simulatoren portiert werden. Die einzige Bedingung neben der Verwendung einer modernen Hochsprache bei der Programmierung ist das Erfordernis, daß die hydrodynamischen Koeffizienten als Variablen im Programm bereitgestellt werden.

Werden die Koeffizienten als separate Variablen verwendet, so sind zusätzlich zwei Größen je Koeffizient bereitzustellen: der Öffnungsgrad der Potenzfunktion und der Exponent. An einem fiktiven Beispiel in FORTRAN wird die Anwendung des Verfahrens für die dimensionslosen Kräfte und Momente demonstriert.

Eine programmtechnische Vereinfachung ist die Verwendung von Arrays (Feldern) für die Koeffizienten. Durch den Verzicht auf die explizite Nennung des Koeffizienten kann die Verwaltung der Beiwerte im Programm deutlich vereinfacht werden. Im ausgeführten Programm SIM wurde eine weitere Abstraktion verwendet, indem die Berechnung des Produktes von Bewegungsgröße und Koeffizient aus der eigentlichen Formel gelöst und in einem separaten Unterprogramm bzw. einer Funktion vorgenommen wurde. In diesem wird in Abhängigkeit von der vorher definierten Nummer eines Koeffizienten die Auswahl und Kombination der Bewegungs- und Steuergrößen, die die hydrodynamischen Kräfte beeinflussen, vorgenommen und nur noch eine Zahl zurückgegeben, die mit dem Koeffizienten multipliziert werden muß. Die gesamte Berechnung der 3 hydrodynamischen Kräfte und Momente ist

## 6. Anwendungen

---

durch Verwendung von Schleifen auf ein kompaktes Unterprogramm reduzierbar, welches exemplarisch im folgenden dargestellt ist.

```
* Berechnung der dimensionslosen Kräfte und Momente
* unter Verwendung des Potenzansatzes
* =====
* Index k = 1,2,3 für X,Y,N
* Index i = 1 für den Tiefwasseranteil c0
*           2 für den Flachwasseranteil cn
* Index n = laufende Nummer des Koeffizienten in nko(k)
* f(k)      : Summe der dimensionslosen
*             hydrodynamischen Kräfte X, Y bzw.
*             des Momentes N
* nko(k)    : Anzahl der Koeffizienten für X,Y bzw. N
* formel(n) : Unterprogramm für die Berechnung der
*             Funktion der Zustandsvariablen
* xynkof(k,i,n) : Werte der dimensionslosen Koeffizienten
* tzuh      : Verhältnis Tiefgang / Wassertiefe
* iexp(k,n) : Exponent für den Flachwasseranteil
*            common /koeff/ nko(3),xynkof(3,2,30),iexp(3,30)
*            common /kraft/ f(3)
*            ...
*            ...
* Initialisierung der dimensionslosen Kräfte und Momente
*   do 10 k=1,3
*   10 f(k)=0.
* Schleifen über Kraftindex k und
*           Anzahl n der Koeffizienten(k)
*   do 20 k=1,3
*       do 20 n=1,nko(k)
*   20 f(k)=f(k)+formel(n)*(xynkof(k,1,n)
* f           + xynkof(k,2,n)*tzuh**iexp(k,n))
```

Für die Berechnung der hydrodynamischen Kräfte in einem Computerprogramm können die verschiedensten Programmiersprachen, mathematischen Modelle und Formulierungen für die Berücksichtigung des Wassertiefeneinflusses verwendet werden. Das angeführte Beispiel soll nur das Prinzip verdeutlichen, nach dem der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz angewendet werden kann.

## 6.2.1 Hydrodynamische Einflußgrößen

Der dargestellte Mechanismus zur einfachen und übersichtlichen Repräsentation des Flachwassereinflusses auf die hydrodynamischen Koeffizienten kann prinzipiell auf alle Beiwerte eines mathematischen Modells angewendet werden. In Anbetracht des Aufwandes zur Bestimmung der Potenzfunktion ist es jedoch notwendig, sich auf die bei Variation der Wassertiefe deutlich ändernden Koeffizienten zu beschränken.

Anhand der in Kapitel 2.1.3 vorgenommenen Modularisierung sollen die einzelnen Kraftkomponenten isoliert und untersucht werden. Aus den Gleichungen 2.42 und 2.43 wird:

$$\begin{aligned} X &= X_W + X_H + X_P + X_R \\ Y &= Y_W + Y_H + Y_P + Y_R \\ N &= N_W + N_H + N_P + N_R \end{aligned} \quad (6.1)$$

Da bei den meisten Schiffen Symmetrie vorliegt, können die Terme  $Y_W$  und  $N_W$ , die die Seitenkraft und das Moment bei reiner Längsanströmung des Schiffsrumpfes beschreiben, aus der Betrachtung ausgeschieden werden. Die anderen Terme sind dem Einfluß der Wassertiefe in verschiedenem Umfang unterworfen.

### 6.2.1.1 Starker Flachwassereinfluß

Die Erhöhung des Widerstands  $X_W$  ist der am meisten bekannte Effekt der abnehmenden Wassertiefe. In Abbildung 6-1 ist das Ergebnis einer Regression der Widerstandsmessungen für das Containerschiff wiedergegeben. Sowohl für das modulare mathematische Modell als auch für das 4-Quadranten-Modell wurde diese Abhängigkeit von der 3. Potenz der Geschwindigkeit verwendet. Die dargestellten Kurven umfassen einen Bereich der Froude-Zahl von 0 bis ca. 0.2. Darüber hinaus und speziell in Bereich der kritischen Froude-Tiefenzahl 1 und darüber sind sie nicht mehr gültig, da im Bereich der Stauwellengeschwindigkeit der steile Anstieg und die eventuell darauffolgende Senke von einer einfachen Potenzfunktion des Grades 3 nicht mehr sinnvoll dargestellt werden kann.

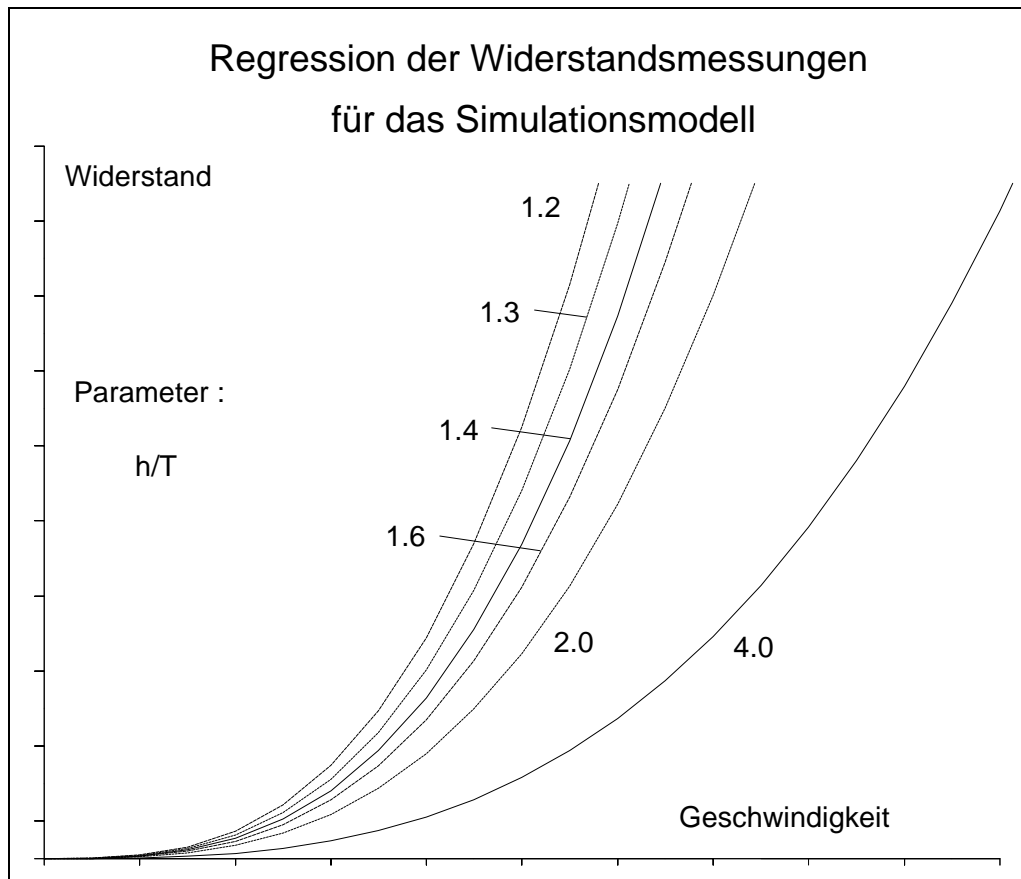


Abb. 6-1

Eigentlich zählt der Widerstand zu den allgemeinen Rumpfkraften, aber aus schiffbaulicher Sicht kommt ihm eine besondere Bedeutung zu, da für die Bestimmung der in einem Neubauprojekt zu installierenden Leistung nur die von der Vorausschwindigkeit abhängigen Längskräfte von Interesse sind. Beim Manövrieren sind jedoch alle am Rumpf angreifenden Kräfte und Momente als gleichrangig zu betrachten, da eine Änderung der Umströmung des Schiffskörpers nicht nur eine Änderung der Längskraft, sondern bei der Abweichung von der Geradeausfahrt auch zwingend eine Änderung der Seitenkräfte und Momente zur Folge hat.

Alle Kräfte am Rumpf in Abhängigkeit von der Längs-, Seiten- und Drehgeschwindigkeit sind also für die Berücksichtigung des Flachwassereinflusses mit hoher Priorität zu bewerten. Dies ist auch der Grund, warum in den Abbildungen der vorangegangenen Kapitel immer Beiwerte mit  $u$ ,  $\dot{u}$ ,  $v$ ,  $\dot{v}$ ,  $r$  und  $\dot{r}$  in die Anwendung der verschiedenen Verfahren zur Berücksichtigung der Wassertiefe aufgenommen wurden.

### 6.2.1.2 Schwacher Flachwassereinfluß

Einige bei Schiffsmanövern wirksame Kräfte sind bei Variation der Wassertiefe nur geringen Änderungen unterworfen. Dies gilt besonders für den Bereich der Ruder-, aber in gewissem Umfang auch für die Propellerkräfte.

Durch die geringere vertikale Ausdehnung des Strömungsgebietes ändert sich der Strömungszustand von der vollen 3-Dimensionalität in einen angenähert 2-dimensionalen Zustand. Dies, und die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit am Schiffskörper durch die zunehmende Versperrung haben schon bei Geradeausfahrt im Modellversuch nachweisbare Auswirkungen auf den Propeller. Es ist also sinnvoll, bei einer Staffelung der Prioritäten die Propellerkräfte nach den Rumpfkraften an die zweite Stelle zu setzen.

Es muß jedoch bedacht werden, daß eine Änderung der Anströmgeschwindigkeit zum Propeller während eines Manövers durch Verlangsamung des Schiffes wohl stärker zu bewerten ist, als die Änderung der Zuströmung durch Verringerung der Wassertiefe. Die Erstere wird in fortgeschrittenen mathematischen Modellen wie dem modularen oder dem 4-Quadranten-Modell berücksichtigt (siehe Kapitel 2.1.3.2 und 2.1.4.2). Die Letztere kann in die Modellierung der Propellerkräfte einfließen, bisher wurde dies jedoch im in der VBD verwendeten mathematischen Modell nicht praktiziert. Es wäre aber durchaus sinnvoll und notwendig, den Wassertiefeneinfluß auf die Propellerzuströmung über die Nachstromziffer mit in den durch Potenzfunktionen erweiterten Koeffizientensatz aufzunehmen.

Bei der Seitenkraft und dem Moment durch den bzw. die Propeller ist die Beurteilung schwieriger, da keine Informationen über den Zusammenhang mit der Änderung der Wassertiefe vorliegen. Bei Einschraubern ist durch die Außermittigkeit des Schubmittelpunktes eine Vernachlässigung dieser Kräfte nicht möglich, da durch sie allein der Ruderwinkel  $\boldsymbol{d}_{R0}$ , die für die Geradeausfahrt erforderliche Ruderlage, bestimmt wird, wenn man von sonstigen Unsymmetrien absieht. Eine generelle Berücksichtigung dieses Effektes sollte bei Einschraubern erfolgen, aber aufgrund des unbekannteren und eher als gering zu bewertenden Einflusses der Wassertiefe darauf kann auf eine Erfassung durch wassertiefenabhängige Potenzfunktionen verzichtet werden.

Die Ruderkräfte werden durch Anströmung des Profilkörpers erzeugt. Da ein Ruder hauptsächlich durch den Propellerstrahl beaufschlagt wird, ist die zu erwartende

## 6. Anwendungen

---

Kraftwirkung von der Strahlgeschwindigkeit abhängig. Wenn der Wassertiefeneinfluß im mathematischen Modell zur Beschreibung des Propellers schon berücksichtigt wird, kann auf eine gesonderte Berücksichtigung der Änderung der Zuströmung zum Ruder verzichtet werden.

Sollten größere Teile des Ruders über den Propellerstrahl hinausragen, so ist die Nachstromziffer am Ort des Ruders zur Bestimmung der effektiven Anströmgeschwindigkeit heranzuziehen. Diese ist normalerweise nicht bekannt, kann jedoch durch Reduktion um einen gewissen Prozentsatz aus der (eventuell wassertiefenabhängigen) Nachstromziffer für den Propeller festgelegt werden.

Ein Aspekt, der für die Berücksichtigung der Wassertiefe von Bedeutung sein kann, ist der in der Aerodynamik bekannte Wandeinfluß für die offene Kante eines einseitig eingespannten Tragflügels im Strömungskanal. Genau diese Konfiguration trifft für ein tieftauchendes Ruder bei extremem Flachwasser zu. In einer Arbeit des IfS (Institut für Schiffbau, Hamburg) [Zhao, 1986] wird dieser Einfluß berücksichtigt. Die Verengung des Spaltes zwischen Ruderende und Gewässerboden führt zu einer Erhöhung der effektiven Ruderfläche und damit zu einer Vergrößerung der Ruderkräfte. In den meisten Simulationsprogrammen jedoch wird dieser Effekt vernachlässigt.

Sonderfälle wie z.B. weit unter den Propeller tauchende Ruder oder Manöver ohne Propellereinsatz sind Ausnahmen und brauchen in eine allgemeine Betrachtung nicht einzufließen. Wenn in Manövern der Propeller keinen Schub erzeugt, befindet sich das Ruder im Zustand des offenen bzw. nach außen begrenzten Flügels und wird bei abnehmender Wassertiefe höhere Kräfte erzeugen. Im Vergleich mit den Kräften im konstanten Propellerstrahl ist dieser Einfluß jedoch als gering zu bewerten.

Moderne Hochleistungsruder, wie sie bei Binnenschiffen installiert werden, verfügen in vielen Fällen über Endscheiben. Diese unterbinden die Kantenumströmung des Profils und erhöhen die Ruderkräfte, indem sie die Verluste an effektiver Fläche durch die nach unten freien Profilkanten vermindern. Dadurch wird ein mit Endscheiben versehenes Ruder unabhängig von möglichen Wassertiefeneinflüssen und erreicht seine höchste Wirksamkeit auch schon bei tiefem Wasser.



## 6.2.2 Beispiele

Aus den in den letzten Jahren in der VBD durchgeführten PMM-Versuchen, bei denen es möglich war, den Einfluß der Wassertiefe auf die hydrodynamischen Koeffizienten zu untersuchen, wurden 4 Beispiele ausgewählt, die in diesem Abschnitt einander gegenübergestellt werden sollen. Die Ergebnisse der restlichen Versuche konnten nicht verwendet werden, da eine Anzahl von nur drei oder weniger untersuchten Wassertiefen für die Zwecke dieser Arbeit nicht ausreichend ist.

In den folgenden Darstellungen wird immer die Potenzdarstellung zur Repräsentierung des Einflusses der begrenzten Wassertiefe verwendet. Die Gleichung 6.2 gibt die allgemeine Formulierung dieses Ansatzes wieder. In ähnlicher Form wurde sie auch in den Gleichungen 2.98, 4.11 und 5.1 ausgedrückt.

$$\left. \begin{array}{l} X... \\ Y... \\ N... \end{array} \right\} = \underbrace{c_0}_{\text{Tiefwasser}} + \underbrace{c_n \cdot (T/h)^n}_{\text{Flachwasser}} \quad (6.2)$$

Einzeluntersuchungen für nur eine Relation  $h/T$  können nur dem Zweck dienen, den Koeffizienten  $c_0$  zu bestimmen, und auch nur dann, wenn sie auf relativ großer Wassertiefe durchgeführt wurden. Liegen Ergebnisse für tiefes Wasser und nur einen Fall beschränkter Wassertiefe vor, so kann der Flachwasserbeiwert  $c_n$  berechnet werden, wenn der Exponent  $n$  vorgegeben ist. Bei drei untersuchten Wassertiefen dagegen ist es möglich, alle drei Freiwerte  $c_0$ ,  $c_n$  und  $n$  der Gleichung (6.2) zu berechnen. In diesem Fall handelt es sich um eine Bestimmung ohne Fehlerausgleich, da den drei Daten genau drei Unbekannte gegenüberstehen.

Leider führt in vielen Fällen auch diese Vorgehensweise nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen, da bei Koeffizienten aus Modellversuchen immer die Möglichkeit von Meßfehlern (siehe Kapitel 3.1.4) in die Betrachtung einbezogen werden muß. Je größer die Meßgenauigkeit ist, um so unsicherer wird die aus nur drei Datenpunkten bestimmte Potenzfunktion. Erst bei einer Erhöhung der Anzahl untersuchter Wassertiefen kann der Meßfehler abgeschwächt werden, indem Fehlmessungen als "Ausreißer" identifiziert und eliminiert werden können bzw. durch Anwendung der Approximation ein Ausgleich erzielt wird. Besonders gute Ergebnisse können dabei durch mehrfache Eingabe (mit minimaler Änderung z.B. der Wassertiefe) gewichtet werden. Bei Verwendung von 5 bis 6 untersuchten Wassertiefen hat sich in der

Praxis erwiesen, daß die erzeugte Potenzfunktion ausreichend durch Messungen gestützt und auch die Meßungenauigkeiten sinnvoll ausgeglichen werden.

### 6.2.2.1 Numerische Darstellung

Die vier Beispielschiffe sind in Tabelle 6-1 zusammengestellt und auf den folgenden Seiten durch Angabe einer Skizze und der Hauptabmessungen beschrieben. Die untersuchten Wassertiefen und die ermittelten Beiwerte  $c_0$ ,  $c_n$  und  $n$  sind in Tabellen wiedergegeben.

<i>Typ</i>	<i>Abbildung</i>	<i>Tabelle</i>
Containerschiff	6-2	6-2
Gütermotorschiff	6-3	6-3
Schubverband E II b	6-4	6-4
Schubverband E III	6-5	6-5

Tab. 6-1

## Containerschiff

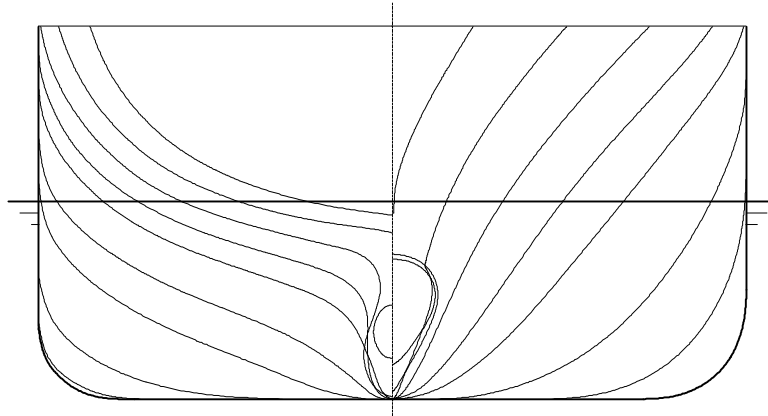


Abb. 6-2

Lpp =	232.90 m
B =	32.20 m
T =	10.06 m
CB =	0.660
Quelle : Gronarz, 1992	
Modellmaßstab $I = 1:40$	

$h/T$	1.2	1.3	1.4	1.6	2.0	4.0
$T/h$	.833	.769	.714	.625	.500	.250

Koeff.	$c_0 \cdot 1e5 +$	$c_n \cdot 1e5$	$\cdot T/h^\wedge$	$n$
Xv	-322.25 +	1652.3	$\cdot T/h^\wedge$	1
Xupkt	-127.92 +	169.9	$\cdot T/h^\wedge$	11
Xrr	38.51 +	37.6	$\cdot T/h^\wedge$	4
Xrv	-300.44 +	-1521.6	$\cdot T/h^\wedge$	2
Yv	-704.81 +	-11389.0	$\cdot T/h^\wedge$	8
Yv v	-4091.90 +	-52193.0	$\cdot T/h^\wedge$	4
Yvpkt	-495.35 +	-4445.3	$\cdot T/h^\wedge$	4
Yrpkt	23.13 +	-490.0	$\cdot T/h^\wedge$	7
Yr	50.21 +	896.8	$\cdot T/h^\wedge$	11
Yrrr	-85.26 +	-399.6	$\cdot T/h^\wedge$	6
Yrvv	-914.21 +	-5118.2	$\cdot T/h^\wedge$	4
Yvrr	1943.90 +	28267.0	$\cdot T/h^\wedge$	9
Nv	-529.86 +	-1562.9	$\cdot T/h^\wedge$	3
Nv v	-130.48 +	-8971.0	$\cdot T/h^\wedge$	6
Nvpkt	-1.34 +	214.2	$\cdot T/h^\wedge$	3
Nrpkt	-31.15 +	-53.3	$\cdot T/h^\wedge$	5
Nr	-134.82 +	-498.9	$\cdot T/h^\wedge$	3
Nrrr	-127.46 +	-76.9	$\cdot T/h^\wedge$	4
Nrvv	-1542.70 +	-17986.0	$\cdot T/h^\wedge$	7
Nvrr	159.60 +	4601.8	$\cdot T/h^\wedge$	10

Tab. 6-2

## Gütermotorschiff

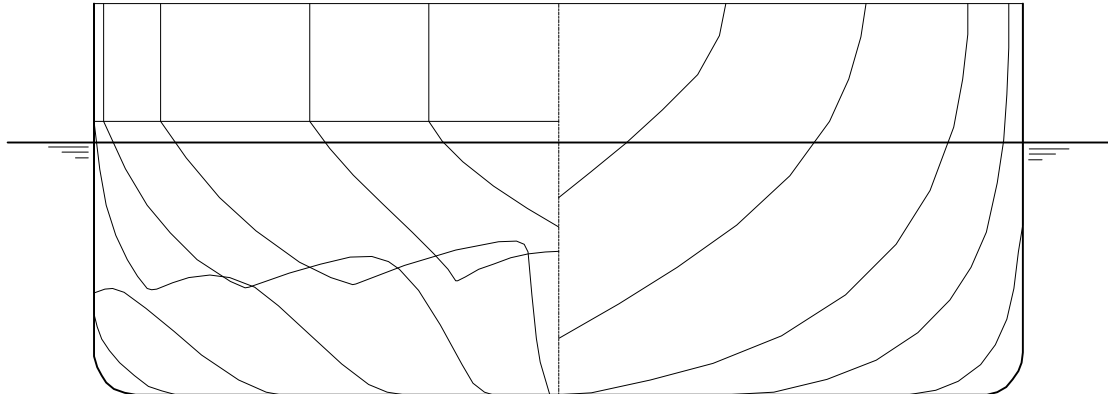


Abb. 6-3

$L_{pp}$	=	110,00 m
$B$	=	10.95 m
$T$	=	3.00 m
$CB$	=	0.868
Quelle : Gronarz, 1989		
Modellmaßstab $I = 1:15.45$		

$h/T$	1,17	1,33	1,66	2,50	5,00
$T/h$	.850	.750	.600	.400	.200

Koeff.	$c_0 \cdot 1e5 +$	$c_n \cdot 1e5$	$\cdot T/h^{\wedge}$	$n$
X <sub>v</sub>	-192.05 +	12382.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	9
X <sub>vpkt</sub>	-21.70 +	-97.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	4
X <sub>rr</sub>	-113.28 +	177.6	$\cdot T/h^{\wedge}$	1
X <sub>rv</sub>	182.66 +	2524.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	3
Y <sub>v</sub>	-864.01 +	-18686.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	7
Y <sub>v v </sub>	-265.51 +	-12956.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	2
Y <sub>vpkt</sub>	-133.30 +	-2056.1	$\cdot T/h^{\wedge}$	6
Y <sub>rpkt</sub>	-25.65 +	-500.1	$\cdot T/h^{\wedge}$	6
Y <sub>r</sub>	138.42 +	301.5	$\cdot T/h^{\wedge}$	2
Y <sub>rrr</sub>	118.01 +	4236.4	$\cdot T/h^{\wedge}$	5
Y <sub>rvv</sub>	369.25 +	12717.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	3
Y <sub>vrr</sub>	167.64 +	9461.5	$\cdot T/h^{\wedge}$	2
N <sub>v</sub>	-265.13 +	-4914.6	$\cdot T/h^{\wedge}$	7
N <sub>v v </sub>	295.96 +	-3524.8	$\cdot T/h^{\wedge}$	2
N <sub>vpkt</sub>	-118.28 +	493.7	$\cdot T/h^{\wedge}$	1
N <sub>rpkt</sub>	-31.42 +	-55.4	$\cdot T/h^{\wedge}$	2
N <sub>r</sub>	-102.48 +	-211.1	$\cdot T/h^{\wedge}$	3
N <sub>rrr</sub>	-42.59 +	-239.4	$\cdot T/h^{\wedge}$	1
N <sub>rvv</sub>	-747.73 +	-43271.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	6
N <sub>vrr</sub>	423.56 +	9684.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	5

Tab. 6-3

## "Kleiner" Schubverband

(Standardleichter E II b)

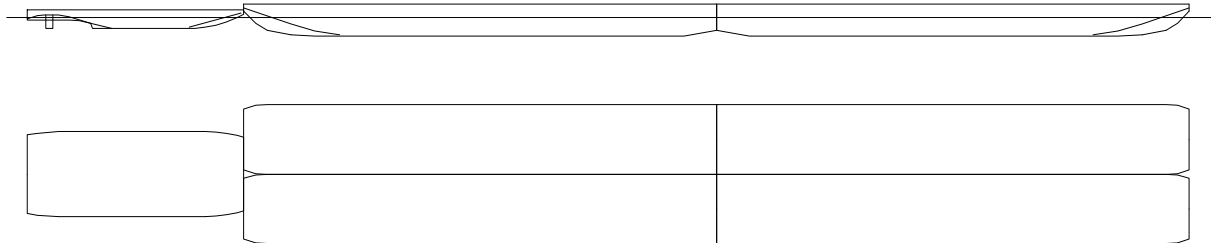


Abb. 6-4

	Verband	S-Boot	Leichter
Lpp =	188.00 m	35.00 m	76.50 m
B =	22.80 m	14.00 m	11.40 m
T =	3.00 m	1.75 m	3.00 m
CB =	0.785	0.626	0.914
Quelle : Gronarz, 1990			
Modellmaßstab $I = 1:21$			

$h/T$	1.50	1.78	2.19	2.84	3.97	6.29
$T/h$	.667	.562	.457	.352	.252	.159

Koeff.	$c_0 \cdot 1e5 +$	$c_n \cdot 1e5$	$\cdot T/h^\wedge$	$n$
Xv	6.45 +	-1821.8	$\cdot T/h^\wedge$	1
Xupkt				
Xrr	-150.99 +	580.1	$\cdot T/h^\wedge$	4
Xrv	151.11 +	1123.2	$\cdot T/h^\wedge$	2
Yv	-153.21 +	-4014.1	$\cdot T/h^\wedge$	8
Yv v	-133.80 +	-3597.0	$\cdot T/h^\wedge$	4
Yvpkt	-199.32 +	-2542.0	$\cdot T/h^\wedge$	4
Yrpkt	17.00 +	-101.8	$\cdot T/h^\wedge$	7
Yr	78.59 +	6659.0	$\cdot T/h^\wedge$	11
Yrrr	2.13 +	349.9	$\cdot T/h^\wedge$	6
Yrvv	2725.10 +	23836.0	$\cdot T/h^\wedge$	4
Yvrr	-409.29 +	2017.3	$\cdot T/h^\wedge$	9
Nv	23.42 +	-475.3	$\cdot T/h^\wedge$	3
Nv v	43.21 +	-3418.1	$\cdot T/h^\wedge$	6
Nvpkt	26.16 +	2186.6	$\cdot T/h^\wedge$	3
Nrpkt	-10.42 +	-62.5	$\cdot T/h^\wedge$	5
Nr	-69.30 +	-3700.5	$\cdot T/h^\wedge$	3
Nrrr	-6.33 +	-206.7	$\cdot T/h^\wedge$	4
Nrvv	-1356.30 +	-5910.1	$\cdot T/h^\wedge$	7
Nvrr	-6.91 +	1071.1	$\cdot T/h^\wedge$	10

Tab. 6-4

## "Großer" Schubverband (Großleichter E III)

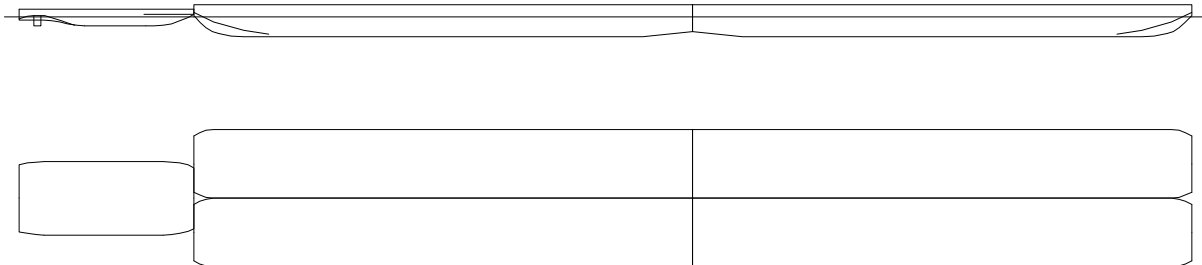


Abb. 6-5

	Verband	S-Boot	Leichter
Lpp =	235.00 m	35.00 m	100.00 m
B =	28.00 m	14.00 m	14.00 m
T =	4.00 m	1.90 m	4.00 m
CB =	0.831	0.686	0.948
Quelle : Gronarz, 1990			
Modellmaßstab $I = 1:21$			

$h/T$	1.22	1.40	1.71	2.17	2.98	4.53
$T/h$	.820	.714	.585	.461	.336	.221

Koeff.	$c_0 \cdot 1e5 +$	$c_n \cdot 1e5$	$\cdot T/h^{\wedge}$	$n$
Xv	118.53 +	-7862.1	$\cdot T/h^{\wedge}$	11
Xvpkt				
Xrr	-44.91 +	-167.3	$\cdot T/h^{\wedge}$	6
Xrv	122.93 +	2168.9	$\cdot T/h^{\wedge}$	3
Yv	-457.59 +	-6721.1	$\cdot T/h^{\wedge}$	5
Yv v	-370.50 +	-19944.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	3
Yvpkt	-191.04 +	-1237.5	$\cdot T/h^{\wedge}$	3
Yrpkt	3.82 +	-225.1	$\cdot T/h^{\wedge}$	8
Yr	58.01 +	558.6	$\cdot T/h^{\wedge}$	3
Yrrr	146.56 +	-118.3	$\cdot T/h^{\wedge}$	1
Yrvv	-36.34 +	-7872.1	$\cdot T/h^{\wedge}$	11
Yvrr	721.15 +	2255.9	$\cdot T/h^{\wedge}$	4
Nv	-112.07 +	-1494.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	4
Nv v	53.03 +	-772.5	$\cdot T/h^{\wedge}$	2
Nvpkt	20.68 +	164.2	$\cdot T/h^{\wedge}$	5
Nrpkt	-10.47 +	-31.8	$\cdot T/h^{\wedge}$	3
Nr	-85.16 +	-209.3	$\cdot T/h^{\wedge}$	4
Nrrr	44.71 +	-110.5	$\cdot T/h^{\wedge}$	1
Nrvv	-243.13 +	-6034.0	$\cdot T/h^{\wedge}$	5
Nvrr	201.46 +	689.8	$\cdot T/h^{\wedge}$	3

Tab. 6-5

### 6.2.2.2 Graphische Darstellung

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Potenzfunktionen für die 4 Schiffe einfach tabelliert. In den folgenden Abbildungen werden nun die einzelnen hydrodynamischen Koeffizienten betrachtet, dargestellt durch die Meßwerte und die sie approximierenden Potenzfunktionen. Dabei werden die einzelnen Schiffstypen bei jedem Koeffizienten unterschieden. Die Darstellungsform ist an die in den vorangegangenen Kapiteln verwendete angelehnt, wobei die Ergebnisse von Abbildung 4-3 hier wiederzufinden sind.

Die Qualität der Messung der Koeffizienten kann anhand der Güte der Approximation bewertet werden. Es ist hierbei jedoch zu beachten, daß aus meßtechnischen und physikalischen Gründen einige Koeffizienten mit besonderen Problemen behaftet sind (siehe Kapitel 3.1.4). Ein direkter Vergleich von Koeffizienten, die starke Kraftwirkungen beschreiben mit solchen, die schon fast vernachlässigbar sind, führt oft zu einer Fehleinschätzung der Meßgenauigkeit. Bei der Diskussion der folgenden Abbildungen wird auf diesen Punkt anhand der Beispiele noch genauer eingegangen.

In Abbildung 6-6 sind die Koeffizienten, die die Änderung der Längskräfte durch die Umströmung des Schiffskörpers bei verschiedenen Bewegungen beschreiben, für die vier Beispielschiffe wiedergegeben. Hier sind drei Anmerkungen zu machen, die die 4 angeführten Koeffizienten in 2 bzw. 3 Klassen unterteilen.

1. Am Beispiel des Beiwertes  $X_{rv}$  ist eine relativ geringe Streuung der Messungen (Symbole) bezogen auf die jeweilige Potenzfunktion (Kurve) festzustellen. Dies weist darauf hin, daß die meßbare Kraftkomponente eine signifikante Größe besitzt und bei einer Reduzierung des Koeffizientensatzes zur Vereinfachung des mathematischen Modells dieser Beiwert nicht vernachlässigt werden darf.
2. Die Koeffizienten  $X_{vv}$  und  $X_{rr}$ , die eine (bezogen auf das Vorzeichen der Bewegungsgrößen) symmetrische Änderung der Längskraft bei reiner Schräg- bzw. Kurvenfahrt beschreiben, sind die Wirkungen relativ gering und daher nur schwierig zu messen. Das unvermeidliche "Rauschen", welches durch Schwingungen des Schleppwagens und ungünstige Relation Kraftwirkung/Meßumfang des Kraftmeßgliedes verursacht wird, erreicht Werte, die die Größenordnung der zu messenden Kräfte erreicht. Durch diesen Effekt kann die Verteilung der Punkte so stark beeinflusst werden, daß es fraglich ist, ob der ermittelte Koeffizient überhaupt noch sinnvoll angewendet werden kann.

## 6. Anwendungen

3. Für den Koeffizienten  $X_{ii}$ , der in dynamischen PMM-Versuchen bestimmt wird, können für die Schubverbände keine Angaben gemacht werden. Dies ist in der angewendeten Versuchstechnik begründet. Die "Surge"-Versuche (Oszillation in Längsrichtung) werden prinzipiell wie die "Sway"-Versuche (Oszillation in Quer- richtung) durchgeführt, wobei jedoch das Modell um  $90^\circ$  gedreht und der Schleppwagen nicht bewegt wird. Bei der Länge der Modelle der Schubverbände (8.95 m bzw. 11.19 m) war die Durchführung dieser Tests im großen Flachwas- sertank der VBD (Breite 9.83 m) nicht möglich. Obwohl der kleine Schubverband noch quer in den Tank paßte, verblieb nach Abzug der Amplitude der PMM-An- lage nicht mehr genug Raum, um den Wandeinfluß bei der Längsschwingung vernachlässigen zu können. Diese dritte Klasse bei der Unterscheidung der Koeffizienten tritt bei den Darstellungen zur Seitenkraft und zum Moment nicht mehr auf.

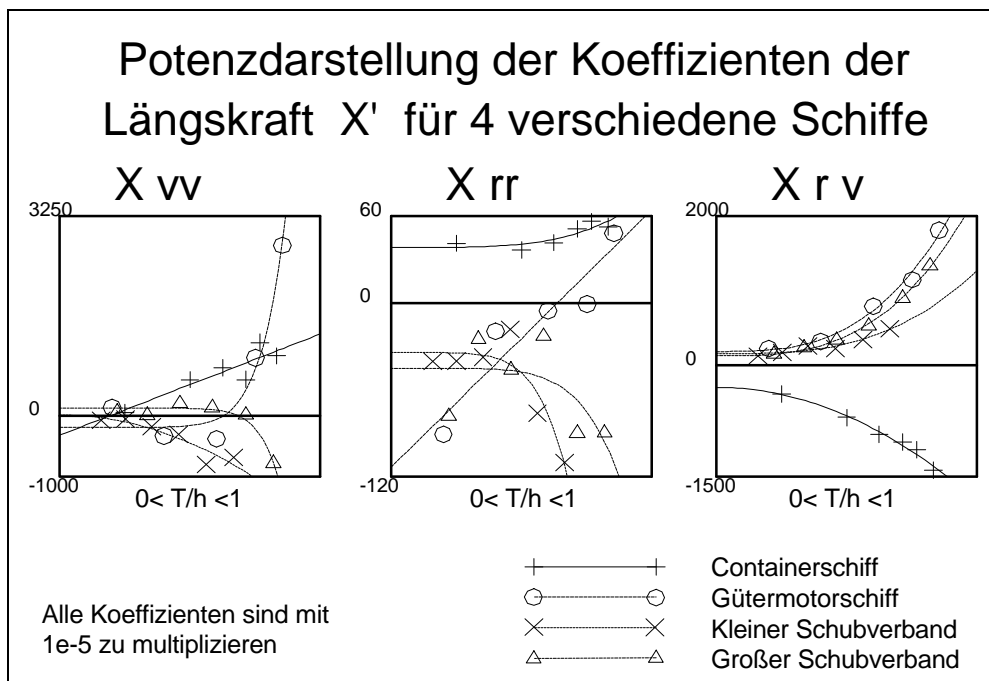


Abb. 6-6

Die bedeutsamen Koeffizienten für die Seitenkraft in Abbildung 6-7 sind die, welche vom Driftwinkel  $\mathbf{b}$  bzw. der Seitengeschwindigkeit  $v$  und von deren Änderungsrate  $\dot{v}$  abhängen. Verglichen mit den im Gierversuch auftretenden Seitenkräften sind die im Schrägschleppversuch ermittelten Werte um ein Vielfaches größer, was eindeutig durch die Qualität der Approximation für die Beiwerte  $Y_v$ ,  $Y_{v/v}$  und  $Y_{\dot{v}}$  zum Ausdruck kommt. Alle anderen Koeffizienten fallen in die Klasse 2, wobei  $Y_{rvv}$  und  $Y_{vrr}$  nicht nur vergleichbar geringe Kraftwirkungen repräsentieren, sondern zusätzlich noch durch



die in Kapitel 3.1.4, Punkt 6 beschriebene Differenzenbildung mit weiteren Ungenauigkeiten beaufschlagt werden.

Der dominante Beiwert  $Y_v$ , der die Änderung der Seitenkraft bei kleinen Driftwinkeln im Schrägschleppversuch beschreibt, gibt in der Darstellung der Meßwerte und der Potenzfunktion ein Beispiel sowohl für die gute Darstellung durch die Approximation bei "strakenden" Punkten als auch für relativ einheitliche Werte unabhängig von der Schiffsform. Leider ist diese Gleichartigkeit in den meisten Fällen nicht wiederzufinden.

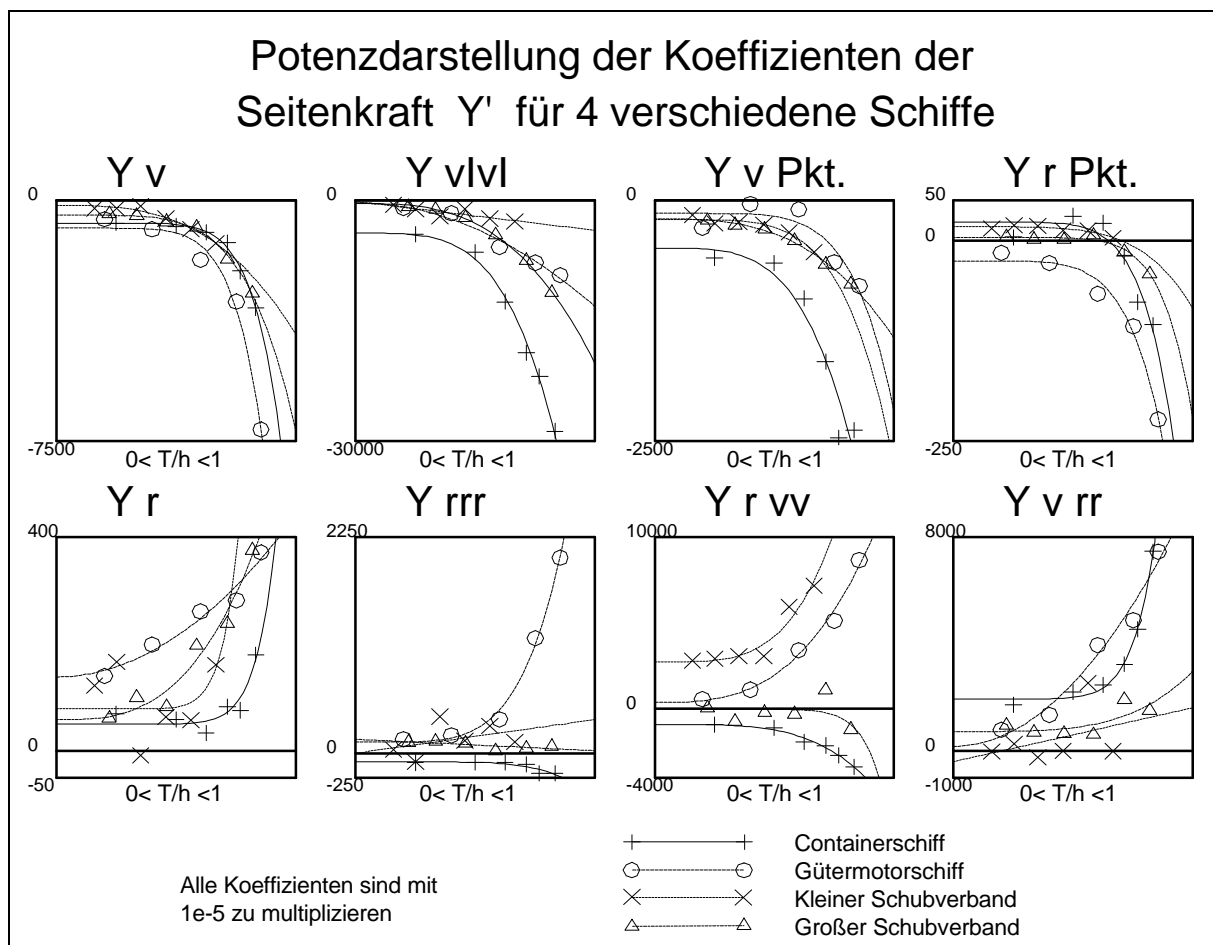


Abb. 6-7

Für das Moment in Abbildung 6-8 gelten in Bezug auf die Signifikanz der Koeffizienten fast die gleichen Ausführungen wie zur Seitenkraft, jedoch mit dem bedeutenden Unterschied, daß die Parameter  $v$  und  $r$  zu vertauschen sind. Es ist unmittelbar einleuchtend, daß bei einem Drehmoment auch die Parameter Drehgeschwindigkeit und Drehbeschleunigung die Haupteinflußgrößen darstellen. In Tabelle 6-6 sind die Zusammenhänge zwischen  $Y$  und  $N$  bzw.  $v$  und  $r$  als Übersicht zusammengefaßt. Die bekannte Tatsache, daß die direkten Wirkungen stark und die Kopplungen

## 6. Anwendungen

schwach sind, wird durch den Koeffizienten  $N_v$ , der für die Schiffsbewegung eine herausragende Bedeutung besitzt, gebrochen.

Kraftart	In der Simulation	
	dominante	untergeordnete
$Y$	$v, \dot{v}$	$r, \dot{r}$
$N$	$v, r, \dot{r}$	$\dot{v}$

Tab. 6-6

Eine zusätzliche Bemerkung ist zum Koeffizienten  $N_{rrr}$  erforderlich. Die Darstellung in Abbildung 6-8 zeigt eine sehr inhomogene Verteilung der einzelnen Beiwerte und eine schwache Wassertiefenabhängigkeit. Vergleicht man den Skalenbereich der Ordinate mit dem Beiwert  $N_r$ , so stellt man fest, daß die Beträge sich in vergleichbaren Größenordnungen bewegen. Dies gilt auch für den Vergleich  $N_{v/v}$  und  $N_v$ , nicht jedoch für die Koeffizienten der Seitenkraft. Der Grund dafür ist, daß die Seitenkraft sowohl für Schrägschlepp- als auch Gierversuche einen deutlich nichtlinearen Verlauf zeigt, was für das Moment jedoch nicht zutrifft. Hier ist die Nichtlinearität

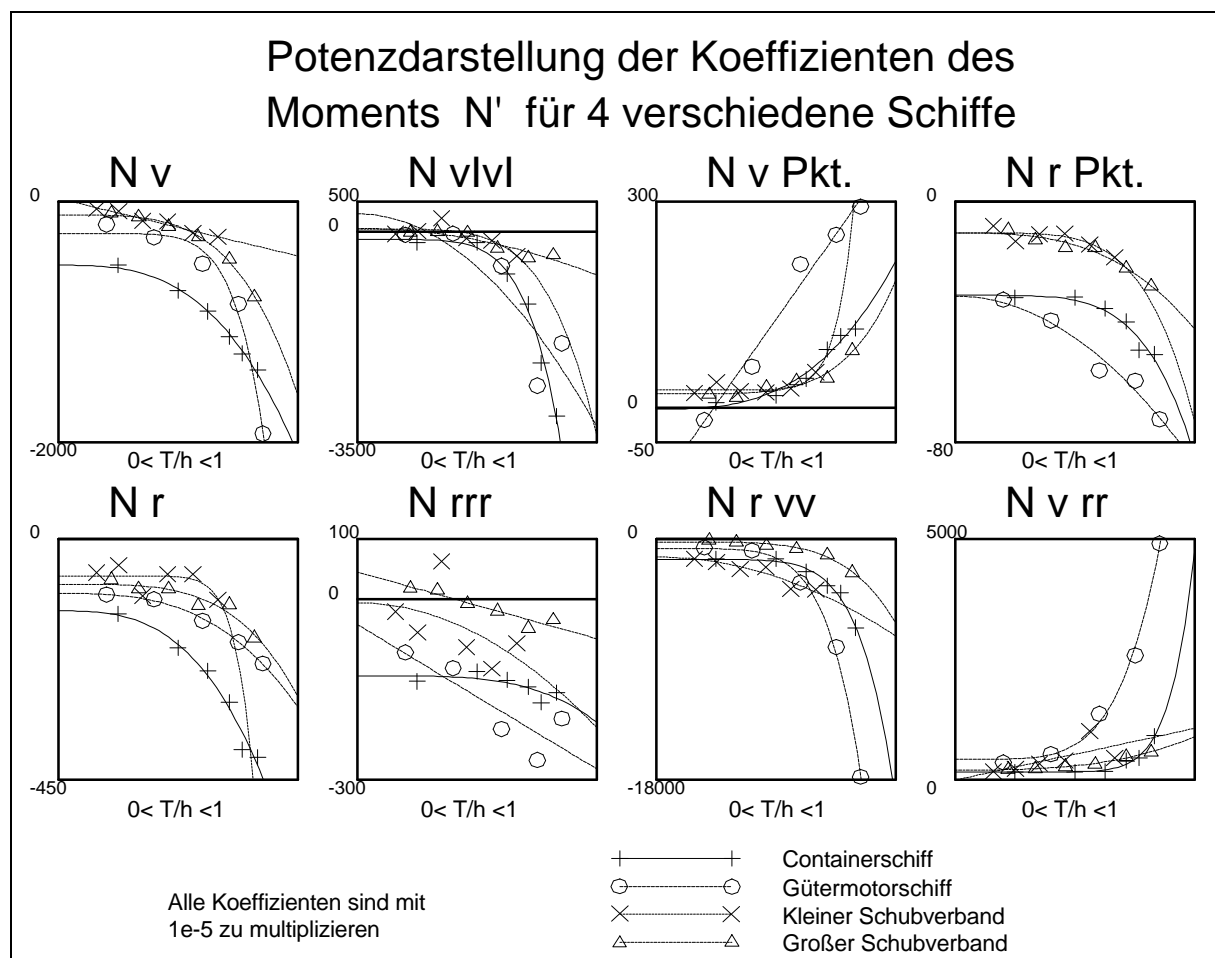


Abb. 6-8

nur sehr schwach ausgeprägt. Deshalb kann nicht nur der untergeordnete Koeffizient  $N_{v|v}$ , sondern auch  $N_{rrr}$  in die Klasse 2 der Beiwerte geringerer Wichtigkeit eingeordnet werden.

### 6.2.2.3 Vereinfachungen

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Anwendung des Potenzansatzes für bestimmte Schiffe erfolgreich demonstriert. Für die allgemeine Anwendung der Potenzdarstellung für die hydrodynamischen Koeffizienten erscheint es aber unzuweckmäßig, wenn jedem Einzelfall spezifische Koeffizienten zugeordnet werden müssen. Besonders für die Abschätzung des Flachwassereinflusses auf die Beiwerte ist es zu wünschen, daß eine Hochrechnung allein auf der Basis des Tiefwasserkoeffizienten möglich ist. Aus diesem Grund wurde der Versuch unternommen, eine vom Schiffstyp unabhängige Darstellung der Koeffizienten zu finden, die sich allein auf den jeweiligen Beiwert  $c_0$  bezieht.

Der erste Schritt ist die Reduktion des Beiwertes  $c_n$  in der Potenzfunktion auf die Bezugsgröße  $c_0$  durch Division. In einer Erweiterung kann analog zu den Ausführungen in Kapitel 4.1.4 (Tabelle 4-1) dieser Quotient noch durch den verwendeten Exponenten dividiert werden, um eine allgemeine Darstellung zu finden. Die Resultate dieser Berechnungen sind in Tabelle 6-7 und 6-8 zu finden. Die erste Liste ist dabei eine Zusammenfassung der Daten aus den Tabellen 6-2 bis 6-5.

## 6. Anwendungen

Koeffizient	$c_0 \cdot 1e5$				$c_n \cdot 1e5$				$n$			
	Cont.-schiff	GMS	Kl. Verb.	Gr. Verb.	Cont.-schiff	GMS	Kl. Verb.	Gr. Verb.	C	G	kl	gr
Xvv	-322,25	-192,05	6,45	118,53	1652,30	12382,0	-1821,8	-7862,1	1	9	2	11
Xrr	38,57	-113,28	-150,99	-44,97	37,61	177,64	580,06	-167,28	4	1	1	6
Xrv	-300,44	182,66	151,17	122,93	-1521,6	2524,00	1123,20	2168,90	2	3	3	3
Yv	-704,87	-864,07	-153,27	-457,59	-11389,	-18686,	-4014,1	-6721,1	8	7	3	5
Yv v	-4091,9	-265,51	-133,80	-370,50	-52193,	-12956,	-3597,0	-19944,	4	2	1	3
Yvpkt	-495,35	-133,30	-199,32	-191,04	-4445,3	-2056,7	-2542,0	-1237,5	4	6	5	3
Yrpkt	23,13	-25,65	17,00	3,82	-490,00	-500,71	-101,75	-225,14	7	6	5	8
Yr	50,21	138,42	78,59	58,01	896,81	301,49	6659,00	558,63	11	2	11	3
Yrrr	-85,26	118,07	2,79	146,56	-399,61	4236,40	349,94	-118,29	6	5	1	1
Yrvv	-914,21	369,25	2725,10	-36,34	-5118,2	12717,0	23836,0	-7872,7	4	3	4	11
Yvrr	1943,90	167,64	-409,29	721,15	28267,0	9461,50	2017,30	2255,90	9	2	1	4
Nv	-529,86	-265,75	23,42	-112,07	-1562,9	-4914,6	-475,27	-1494,0	3	7	1	4
Nv v	-130,48	295,96	43,21	53,03	-8971,0	-3524,8	-3418,1	-772,47	6	2	5	2
Nvpkt	-1,34	-118,28	26,16	20,68	214,24	493,73	2186,60	164,18	3	1	11	5
Nrpkt	-31,15	-31,42	-10,42	-10,47	-53,26	-55,37	-62,45	-31,83	5	2	5	3
Nr	-134,82	-102,48	-69,30	-85,16	-498,91	-211,65	-3700,5	-209,30	3	3	11	4
Nrrr	-127,46	-42,59	-6,33	44,71	-76,92	-239,43	-206,67	-110,48	4	1	2	1
Nrvv	-1542,7	-747,73	-1356,3	-243,75	-17986,	-43271,	-5910,1	-6034,0	7	6	2	5
Nvrr	159,60	423,56	-6,91	201,46	4601,80	9684,00	1071,10	689,83	10	5	1	3

Tab. 6-7

Koeffizient	$c_n / c_0$				$c_n / (c_0 \cdot n)$				$n$			
	Cont.-schiff	GMS	Kl. Verb.	Gr. Verb.	Cont.-schiff	GMS	Kl. Verb.	Gr. Verb.	C	G	kl	gr
Xvv	-5,13	-64,47	-282,56	-66,33	-5,13	-7,16	-141,28	-6,03	1	9	2	11
Xrr	0,98	-1,57	-3,84	3,72	0,24	-1,57	-3,84	0,62	4	1	1	6
Xrv	5,06	13,82	7,43	17,64	2,53	4,61	2,48	5,88	2	3	3	3
Yv	16,16	21,63	26,19	14,69	2,02	3,09	8,73	2,94	8	7	3	5
Yv v	12,76	48,80	26,88	53,83	3,19	24,40	26,88	17,94	4	2	1	3
Yvpkt	8,97	15,43	12,75	6,48	2,24	2,57	2,55	2,16	4	6	5	3
Yrpkt	-21,18	19,52	-5,99	-58,97	-3,03	3,25	-1,20	-7,37	7	6	5	8
Yr	17,86	2,18	84,73	9,63	1,62	1,09	7,70	3,21	11	2	11	3
Yrrr	4,69	35,88	125,50	-0,81	0,78	7,18	125,50	-0,81	6	5	1	1
Yrvv	5,60	34,44	8,75	216,65	1,40	11,48	2,19	19,70	4	3	4	11
Yvrr	14,54	56,44	-4,93	3,13	1,62	28,22	-4,93	0,78	9	2	1	4
Nv	2,95	18,49	-20,30	13,33	0,98	2,64	-20,30	3,33	3	7	1	4
Nv v	68,75	-11,91	-79,10	-14,57	11,46	-5,95	-15,82	-7,28	6	2	5	2
Nvpkt	-159,33	-4,17	83,59	7,94	-53,11	-4,17	7,60	1,59	3	1	11	5
Nrpkt	1,71	1,76	5,99	3,04	0,34	0,88	1,20	1,01	5	2	5	3
Nr	3,70	2,07	53,40	2,46	1,23	0,69	4,85	0,61	3	3	11	4
Nrrr	0,60	5,62	32,66	-2,47	0,15	5,62	16,33	-2,47	4	1	2	1
Nrvv	11,66	57,87	4,36	24,75	1,67	9,64	2,18	4,95	7	6	2	5
Nvrr	28,83	22,86	-154,95	3,42	2,88	4,57	-154,95	1,14	10	5	1	3

Tab. 6-8

Das Ergebnis ist nur mäßig zufriedenstellend, da sowohl bei der Normierung mit  $c_0$  als auch mit  $c_0 \cdot n$  in den meisten Fällen stark voneinander abweichende Werte festzustellen sind. In wenigen Fällen, wie z.B. bei dem Koeffizient  $Y_v$  und der Division durch  $c_0 \cdot n$  zeigen sich die erhofften Vereinfachungen. Derartige "Einzeltreffer" sind allerdings nicht zu hoch zu bewerten, wenn es nicht gelingt, zumindest die dominanten Beiwerte durch diese Formulierung zu erfassen.

Ungeachtet dieser Zwischenergebnisse wurde versucht, in einem zweiten Schritt eine Angleichung der Exponenten vorzunehmen. Für eine Bestimmung eines mittleren Exponenten für jeden Koeffizienten sollten zwei Randbedingungen erfüllt sein.

1. Es ist eine ausreichende Anzahl an Daten für die Mittelwertbildung bereitzustellen, damit überhaupt eine relevante Aussage getroffen werden kann. Dies ist mit der Bereitstellung von Ergebnissen aus 4 ausgedehnten Untersuchungen der Wassertiefenabhängigkeit weitgehend erfüllt, obwohl die Schiffe sich in wichtigen Details stark unterscheiden.
2. Die Streuung der Exponenten sollte gering sein, da sonst keine brauchbare Repräsentation aller Fälle durch einen mittleren Exponenten sichergestellt ist. Dies ist leider nur in wenigen Fällen gegeben und kann auf die sehr unterschiedliche Formgebung der Schiffskörper zurückgeführt werden.

In der Tabelle 6-9 wurde, ausgehend von den einzelnen Versuchsergebnissen, eine Neuberechnung der Potenzfunktionen unter Vorgabe des Exponenten vorgenommen. Die Werte  $n$  aus den Tabellen 6-7 und 6-8 wurden dazu arithmetisch gemittelt und für diese festgesetzten Funktionen die Approximation der Koeffizienten durchgeführt. Wie anhand der Abbildung 4-2 deutlich gemacht wurde, ist im Bereich höherer Grade der Übergang von einem Exponenten zum Nächsten mit nur geringem Verlust an Güte der Approximation verbunden (siehe Randbedingung 2). Dies klingt zwar ermutigend, aber bei der teilweise sehr starken Streuung der Exponenten führt der Übergang vom "optimalen" Exponenten zum "gemittelten" in einigen Fällen zu einem Verlust der Qualität des Tiefwasserwertes  $c_0$ , was teilweise sogar zum Vorzeichenwechsel führen kann. Die dabei errechneten Werte für  $c_n$  sind für Simulationszwecke in diesen Fällen zweifelhaft, obwohl der Verlauf der Kurve den zu erwartenden Flachwassereinfluß gut wiedergibt.

## 6. Anwendungen

Koeffizient	$c_0 \cdot 1e5$				$c_n \cdot 1e5$				$n$
	Cont.-schiff	GMS	Kl. Verb.	Gr. Verb.	Cont.-schiff	GMS	Kl. Verb.	Gr. Verb.	
Xvv	413.29	-331.51	-197.11	159.14	2247.90	7702.60	-7132.70	-2756.80	6
Xrr	37.24	-59.27	-26.63	-40.45	32.15	170.86	-256.66	-86.08	3
Xrv	-437.33	182.66	151.17	122.93	-1672.30	2524.00	1123.20	2168.90	3
Yv	-571.75	-738.84	-299.42	-524.99	-7896.70	-16000.00	-12737.00	-8135.30	6
Yv v	-2172.10	-1318.40	-985.24	-370.50	-44855.0	-14042.00	-5845.40	-19944.00	3
Yvpkt	-612.75	-112.22	-199.32	-260.44	-5205.80	-1762.20	-2542.00	-1761.50	5
Yrpkt	23.13	-29.77	16.42	4.46	-490.00	-582.67	-226.27	-184.35	7
Yr	43.85	195.01	77.79	104.06	408.94	555.45	1168.70	1152.40	7
Yrrr	-67.06	-49.55	108.98	106.63	-229.43	3111.20	347.11	-104.15	3
Yrvv	-1149.00	1367.10	3032.40	-73.51	-7069.50	19361.00	51758.00	-1802.00	6
Yvrr	1167.70	1290.70	217.30	721.15	11158.00	11828.00	3269.00	2255.90	4
Nv	-602.48	-138.87	-104.52	-112.07	-1792.30	-3052.10	-1097.70	-1494.00	4
Nv v	125.63	-146.11	58.68	-45.45	-6303.50	-4289.30	-2285.80	-984.54	4
Nvpkt	15.04	68.10	24.67	20.68	288.07	578.65	179.75	164.18	5
Nrpkt	-30.06	-38.42	-10.14	-11.57	-44.98	-67.08	-41.79	-37.80	4
Nr	-173.44	-115.96	-66.90	-88.79	-668.02	-274.96	-300.77	-252.80	5
Nrrr	-121.25	-99.02	-6.33	19.13	-55.28	-210.03	-206.67	-101.68	2
Nrvv	-1211.40	-312.28	-1912.30	-243.75	-12583.0	-37024.00	-17034.00	-6034.00	5
Nvrr	74.99	423.56	339.53	240.37	1817.90	9684.00	2539.40	979.79	5

Tab. 6-9

Koeffizient	$c_n / c_0$				$c_n / (c_0 \cdot n)$				$n$
	Cont.-schiff	GMS	Kl. Verb.	Gr. Verb.	Cont.-schiff	GMS	Kl. Verb.	Gr. Verb.	
Xvv	5.44	-23.23	36.19	-17.32	0.91	-3.87	6.03	-2.89	6
Xrr	0.86	-2.88	9.64	2.13	0.29	-0.96	3.21	0.71	3
Xrv	3.82	13.82	7.43	17.64	1.27	4.61	2.48	5.88	3
Yv	13.81	21.66	42.54	15.50	2.30	3.61	7.09	2.58	6
Yv v	20.65	10.65	5.93	53.83	6.88	3.55	1.98	17.94	3
Yvpkt	8.50	15.70	12.75	6.76	1.70	3.14	2.55	1.35	5
Yrpkt	-21.18	19.57	-13.78	-41.37	-3.03	2.80	-1.97	-5.91	7
Yr	9.33	2.85	15.02	11.07	1.33	0.41	2.15	1.58	7
Yrrr	3.42	-62.79	3.19	-0.98	1.14	-20.93	1.06	-0.33	3
Yrvv	6.15	14.16	17.07	24.51	1.03	2.36	2.84	4.09	6
Yvrr	9.56	9.16	15.04	3.13	2.39	2.29	3.76	0.78	4
Nv	2.97	21.98	10.50	13.33	0.74	5.49	2.63	3.33	4
Nv v	-50.18	29.36	-38.95	21.66	-12.54	7.34	-9.74	5.42	4
Nvpkt	19.15	8.50	7.29	7.94	3.83	1.70	1.46	1.59	5
Nrpkt	1.50	1.75	4.12	3.27	0.37	0.44	1.03	0.82	4
Nr	3.85	2.37	4.50	2.85	0.77	0.47	0.90	0.57	5
Nrrr	0.46	2.12	32.66	-5.32	0.23	1.06	16.33	-2.66	2
Nrvv	10.39	118.56	8.91	24.75	2.08	23.71	1.78	4.95	5
Nvrr	24.24	22.86	7.48	4.08	4.85	4.57	1.50	0.82	5

Tab. 6-10

Leider konnte auch durch die Homogenisierung der Exponenten kein befriedigendes Ergebnis erzielt werden. Die Werte  $c_n/c_0$  und  $c_n/(c_0 \cdot n)$  in der vorangegangenen Tabelle 6-10 sind zwar teilweise für die 4 Schiffe sehr ähnlich, aber eine globale Vorhersagbarkeit für das Flachwasserverhalten aller betrachteten Koeffizienten ist leider nicht gegeben.

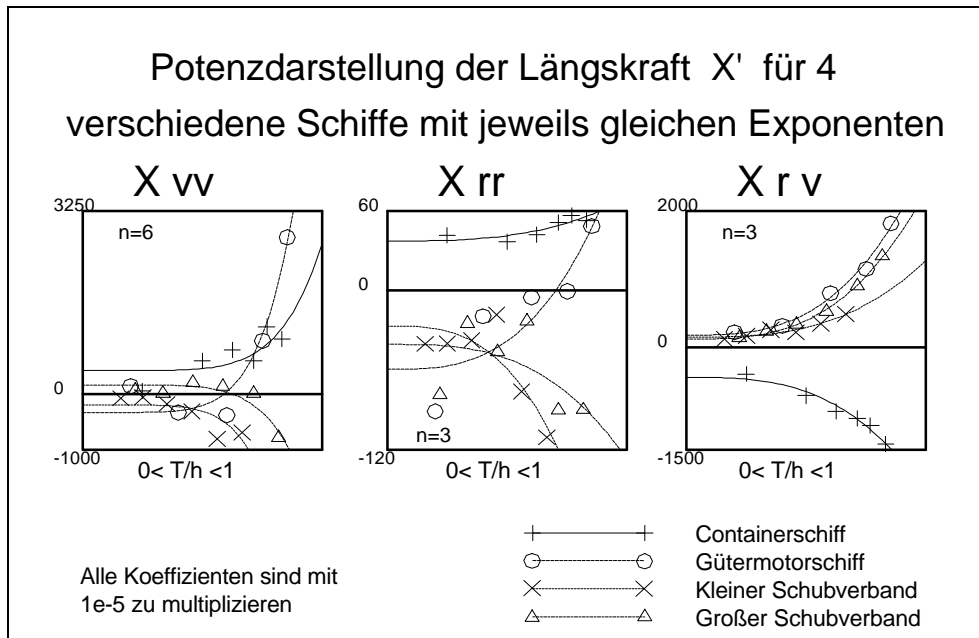


Abb. 6-9

Zur Verdeutlichung der Mittelung der Exponenten in den Tabellen 6-9 und 6-10 sind die Approximationsergebnisse für die Potenzfunktionen in den drei Abbildungen 6-9 bis 6-11 für  $X$ ,  $Y$  und  $N$  aufgetragen. Die Annäherung der Kurven an die Meßwerte ist in den meisten Fällen im Vergleich zu den Abbildungen 6-6 bis 6-8 schlechter geworden. Die Änderung des Tiefwasserwertes  $c_0$  kann nur schwer beurteilt werden, da die Skalierung der Darstellungen die bei abnehmender Wassertiefe deutlich wachsenden Kräfte und Momente berücksichtigt. Jedoch ist für die "bedeutsamen" Koeffizienten, für die bei der Regression Exponenten in untereinander vergleichbarer Größenordnung ermittelt wurden, der Unterschied im Ergebnis aus optimierten und gemittelten Exponenten gering.

Ist also ein Fall gegeben, in dem nur ein Tiefwasserwert für einen bestimmten Koeffizienten vorliegt, so kann zumindest näherungsweise ein Flachwassereinfluß abgeschätzt werden. Dabei wird der entsprechende gemittelte Exponent  $n$  in Tabelle 6-10 verwendet und ein Wert für die normierte Darstellung von  $c_n/(c_0 \cdot n)$  ausgewählt. Für die "signifikanten" Koeffizienten wie z.B.  $X_{rv}$ ,  $Y_v$ ,  $Y_{|v|}$ ,  $Y_{\dot{v}}$ ,  $N_v$ ,  $N_r$ ,  $N_{rrr}$  und  $N_{\dot{r}}$  ist diese Methode durchaus anwendbar, wie die Tabellen und auch die Abbildungen belegen.

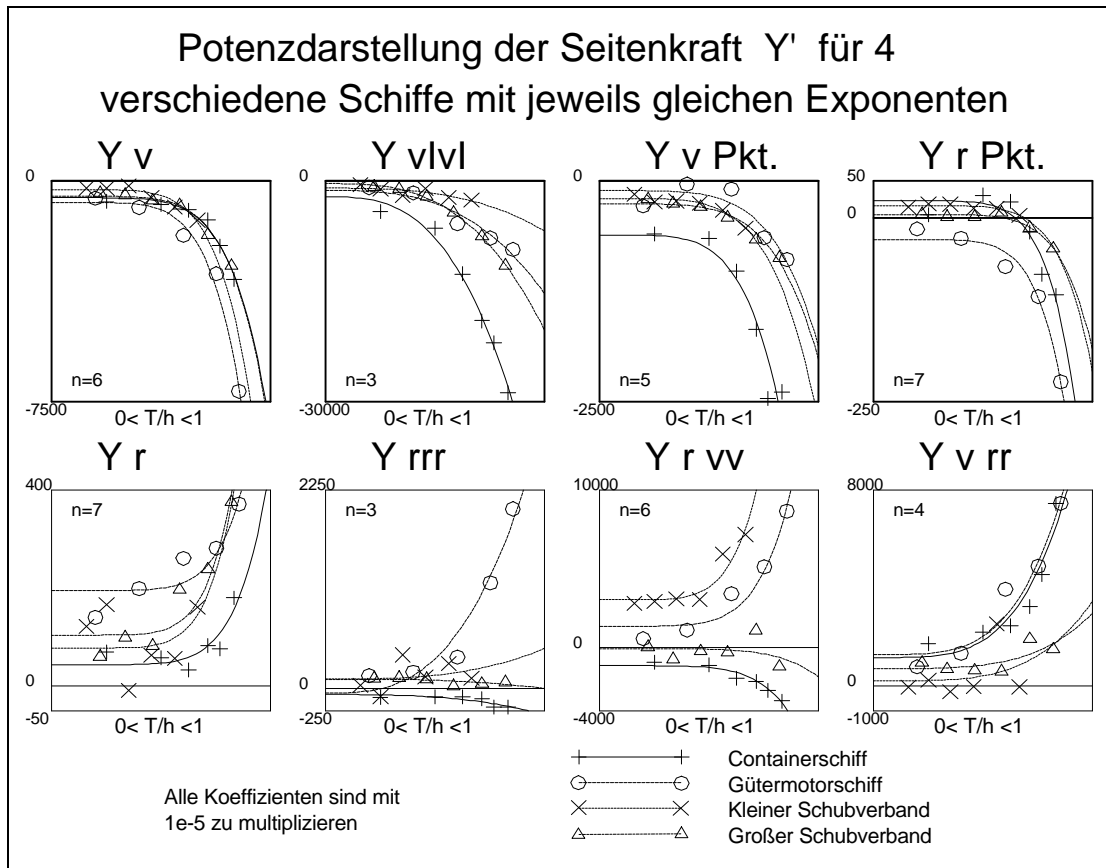


Abb. 6-10

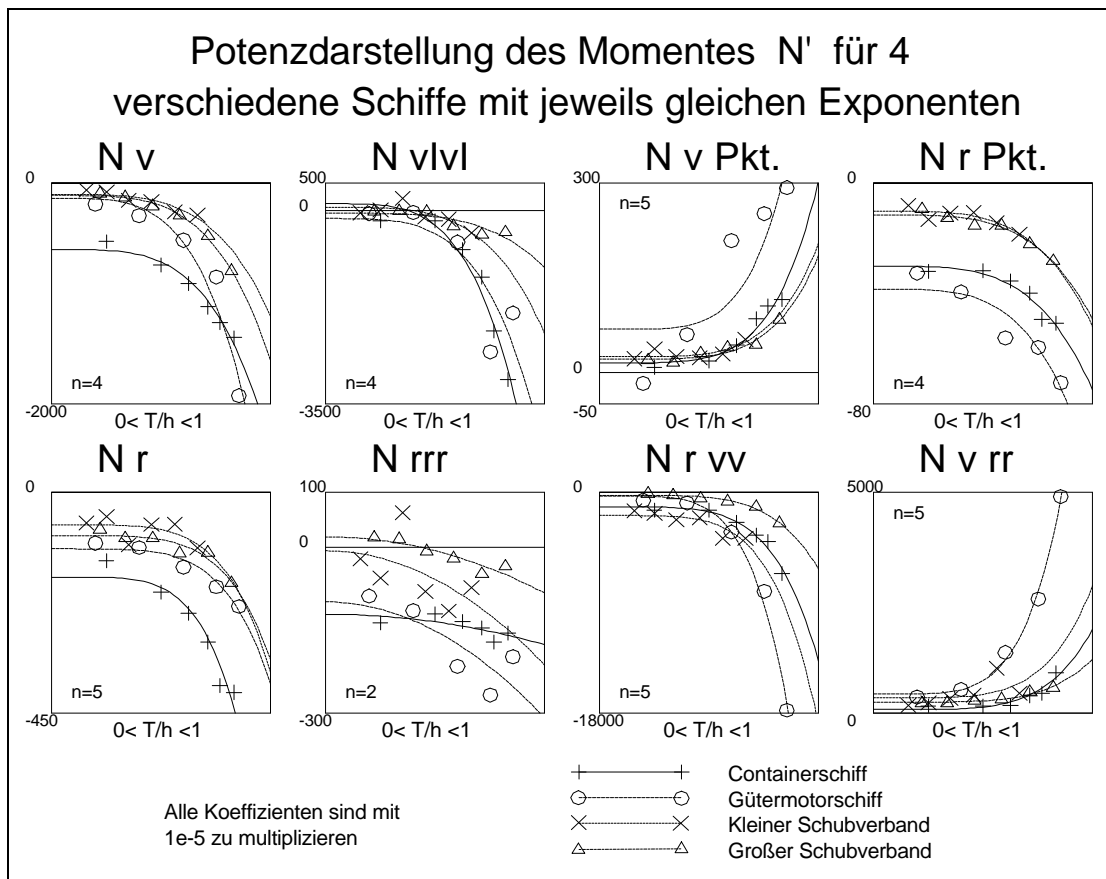


Abb. 6-11