

203 | Juli 1967

**SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU**

Dipl.-Ing. B. Wagner

**Windkräfte an Überwasserschiffen**

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Windkräfte an Überwasserschiffen

von

Dipl.Ing. B. Wagner

Vortrag vor der Hauptversammlung der Schiffbautechnischen  
Gesellschaft e.V., November 1967

Hamburg, Juli 1967

## 1. Einführung

Die Entwicklung der Aerodynamik ist eng mit dem Fortschritten der Luftfahrt verknüpft und fiel zeitlich etwa mit dem Niedergang der Segelschifffahrt zusammen. Von den Fortschritten der Aerodynamik konnten also die Segelschiffe nichts mehr profitieren (umso mehr allerdings die Segelyachten). Die Schiffsaerodynamik begann mit Versuchen, den zusätzlichen, durch Rumpf und Aufbauten bei Anströmung von vorn entstehenden Widerstand zu ermitteln, und zwar sowohl experimentell im Windkanal (McEntee 1916 [2], Föttinger 1924 [3]) als auch durch Rechnung (Schoeneich 1911 [1], Biles 1927 [4]).

Die ersten Mehrkomponentenmessungen an Überwasserschiffsmodellen wurden kurioserweise im Schlepptank durchgeführt, wobei das Modell umgekehrt unter einem Floß befestigt war (Hughes 1930 [5,6], vgl. EMB - Reports Nr. 276, 312, 334, 345 - 1930 bis 1933 [7], [8], [9], [10]). Das hauptsächliche Interesse galt der Längskraft (Luftkraftkomponente in Schiffslängsrichtung), die ihr Maximum meist jedoch nicht bei Anströmung genau von vorn hat.

In der Folgezeit wurden ausschließlich Windkanalversuche durchgeführt, wobei die verschiedenartigsten Versuchsmethoden Anwendung fanden. McEntee [2] hatte ein vollständiges Modell in Windkanalmitte an Drähten aufgehängt und den Teilwiderstand des Unterwasserschiffes abgezogen. Föttinger hat seine Modell in der Randzone des Windkanals untersucht und das Unterwasserschiff abgedeckt [3]. Hemke und Carson hatten 1936 die Modell auf einer Grundplatte angebracht und in Kanalmitte an Drähten gehalten [11].

Nach dem Kriege wurden in Japan eine Reihe von Mehrkomponentenmessungen durchgeführt, wobei die sog. Doppelmodellmethode angewandt wurde: ein Modell wurde mit seinem "Spiegelbild" in der Wasserlinie verbunden und an Drähten in Windkanalmitte aufgehängt [12], [13]; z.T. wurde in der Symmetrie - (Wasserlinien -) Ebene eine Grundplatte angebracht [16]. Neuere Messungen wurden im Randbereich des durch eine rauhe Ebene (Grundplatte) begrenzten Windkanalstrahls durchgeführt. Die Modelle waren entweder an Drähten dicht oberhalb der Grundplatte gehalten (Shearer-Lynn [19]) oder auf einer in die Grundplatte eingelassenen Drehscheibe befestigt (Long [18]). Die Schiffsmodelle befanden sich dabei in einer der natürlichen Wind-

verteilung über der See mehr oder weniger ähnlichen inhomogenen Strömung.

Es liegen also eine Menge Ergebnisse von Einzelversuchen vor, die unter sehr verschiedenen Versuchsbedingungen erzielt wurden (siehe auch die Bibliographie [26]). Der größte Teil dieser Versuche ist - teilweise neu ausgewertet - in einheitlicher Darstellungsweise in den Institutsberichten Nr. 113 (1963, [23]) und Nr. 157 (1965, [24]) enthalten. Die Analyse dieser Ergebnisse zeigte, daß nur systematische Versuche allgemeinere Kenntnisse über die Windkräfte an Schiffen vermitteln können. Diese Versuche müssen einheitlich mit einer Methode durchgeführt werden, die auf große Schiffe übertragbare Ergebnisse erwarten läßt. Dazu soll diese Arbeit einen Beitrag leisten.

## 2. Geometrische Verhältnisse von Überwasserschiffen

Die Vielfalt der möglichen und auch ausgeführten Überwasserschiffsformen bedingt eine möglichst klare Definition kennzeichnender Abmessungen und Abmessungsverhältnisse. Diese Abmessungen sollen leicht bestimmbar sein, da sie u.a. als Bezugsgrößen für die in der Form dimensionsloser Beiwerte dargestellten Versuchsergebnisse dienen.

### 2.1. Hauptabmessungen (vgl. Abb.1)

Länge über alles ( $L_{OA}$ ): ist die einzige direkt meßbare Länge am Schiff. Die Wasserlinienlänge ( $L_{WL}$ ) hat demgegenüber den Nachteil, vom Tiefgang des Schiffes abhängig zu sein.

Breite (B): maximale Breite des Schiffsrumpfes über Wasser.

Höhe (H): die Definition einer kennzeichnenden Modellhöhe oder Schiffshöhe ist schwierig. Es gibt keine meßbare Höhe, die zugleich aerodynamisch irgendeine Bedeutung hätte: die maximale Höhe wurde z.B. meist durch eine Mast- oder Schornsteinspitze festgelegt. - Hier sollen als Vergleichswerte die "mittlere Lateralplanhöhe"  $H_{Lm} = A_L/L_{OA}$  und die mittlere Hauptspanthöhe  $H_{Xm} = A_X/B$  definiert werden.

Lateralfläche ( $A_L$ ): ist die Projektionsfläche des Überwasserschiffes auf die Mittschiffsebene (Längsebene). Man kann sie z.B. in Flächenanteile des Rumpfes ( $A_{LR}$ ), der Aufbauten und der reinen Widerstandskörper (z.B. Masten) aufgliedern (s.u.!).

Lufthauptspantfläche ( $A_X$ ): ist die Projektionsfläche des Überwasserschiffes auf die Querebene. Auch hier kann eine Aufgliederung in Flächenteile des Rumpfes ( $A_{XR}$ ), der Aufbauten und der reinen Widerstandskörper erfolgen.

## 2.2. Verhältniszahlen

Aerodynamisch gesehen ist das Überwasserschiff in seiner Gesamtheit ein Körper kleinen Seitenverhältnisses. Dieses Seitenverhältnis  $\Lambda = 2H^2/A_L$  kann für das Überwasserschiff wegen des Fehlens einer geeigneten Höhe  $H$  nicht definiert werden. Setzt man  $H = H_{Lm}$ , so erhält man einen dem Seitenverhältnis ähnlichen Vergleichswert:

$$\frac{2H_{Lm}^2}{A_L} = \frac{2A_L}{L_{OA}^2} = \frac{2H_{Lm}}{L_{OA}}, \text{ das "Höhen-Längenverhältnis" des Überwasser-}$$

Lateralplans. In ähnlicher Weise kann definiert werden:

$$\frac{2A_X}{B^2} = \frac{2H_{Xm}}{B}, \text{ das "Höhen-Breitenverhältnis" des Lufthauptspantes.}$$

In der Aerodynamik wird ferner das "Dickenverhältnis" eines Strömungskörpers benutzt. Wir definieren:  $L_{OA}/B$ , das Längen-Breiten-Verhältnis.

Das Verhältnis  $A_L/A_X$  von Überwasserlateralfläche zu Lufthauptspantfläche ist stark vom Schiffstyp bzw. der Art und Länge der Aufbauten abhängig. Es kann als Maß für den "Auflösungsgrad" des Überwasserschiffes dienen, ist aber stark von  $L_{OA}/B$  abhängig:

$$\frac{A_L}{A_X} = \frac{L_{OA} \cdot H_{Lm}}{B \cdot H_{Xm}}.$$

Dagegen könnte man  $\frac{H_{Lm}}{H_{Xm}} = \frac{A_L}{H_{Xm} \cdot L_{OA}}$  als "Völligkeitsgrad des Überwasserlateralplans" deuten.

$A_{XR}/A_X$  und  $A_{LR}/A_L$  geben die Anteile der Rumpfprojektionsflächen an Lufthauptspant bzw. Überwasserlateralfläche an.

### 2.3. Weitere Einflußgrößen

Mit oben genannten Abmessungen und Verhältniszahlen nicht auszudrücken sind die folgenden meist durch den Schiffstyp bedingten Größen:

Form des Rumpfes: Anteil des parallelen Mittelschiffes, Bug- oder Heckform (z.B. Spiegelheck).

Lage und Form des Brückenfrontschottes: Neigung, stufenförmiger Aufbau usw.).

Aufbautentyp: Länge des durchgehenden Aufbaus, Aufspaltung in Teilaufbauten.

Länge und Höhe der Back: Einfluß auf die Abschirmwirkung gegenüber Ladegeschrir, Aufbau usw.).

Art und Umfang des Ladegeschrirs: Stellung der Ladebäume.

Art und Umfang der kleinen Ausrüstungsteile.

Von Einfluß sind ferner Trimm und Krängung der Schiffe.

### 2.4. Gliederung des Überwasserschiffes in Teilkörper (vgl. Abb.1)

Das Überwasserschiff setzt sich aus Teilkörpern unterschiedlicher aerodynamischer Eigenschaften zusammen:

Langgesteckte Körper kleinen Seitenverhältnisses (Rümpfe, lange Aufbauten),

Kurze gedrungene Körper (Aufbauten, Back, Deckshäuser, Windenhäuser usw.),

Reine Widerstandskörper (Masten, Ladebäume, Lüfter, verschiedene Ausrüstungsteile).

Durch die Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten dieser Körper, die sich außerdem gegenseitig beeinflussen (Interferenz), sind die Schwierigkeiten einer theoretischen Analyse der Versuchsergebnisse bedingt.

## 3. Versuchsprogramm

Da es bisher an systematischen Unterlagen über Windkräfte an Schiffen fehlte, sollten im Rahmen des Vorhabens "Windkräfte an Schiffen"

möglichst viele verschiedene Überwasserschiffe unter gleichartigen Versuchsbedingungen untersucht werden. (vgl. auch 11. I.T.T.C. Tokio Okt. 1966, Verhandlungen über die Fahrleistungen von Schiffen) und [27]).

Die Versuchsmodelle wurden deshalb so konstruiert, daß sie die Möglichkeit umfangreicher Aufbautenvariationen boten (Baukastenprinzip). Die untersuchten Schiffstypen sollten repräsentativ für moderne Handelsflotten sein. Ferner wurden einige häufige Spezialschiffstypen mit teilweise extremen Aufbautenanordnungen in das Versuchsprogramm aufgenommen:

#### Frachtschiffsmodelle:

Küstenmotorschiff 600 tdw. (Abb.2)

Frachtschiff 4500 tdw., 2 Varianten (Abb.3)

Frachtschiff 10000 tdw., 8 Varianten (Abb.4 und 5)

Tanker 50000 tdw., 2 Varianten (Abb.6 und 7)

#### Fährschiff 7000 BRT und Fahrgastschiff

Grundlage des Modells war das 1961 gebaute Fährschiff "Kronprinz Harald"; unter Beibehaltung des Rumpfes und der unteren Aufbautendecks wurde das Modell zu der Variante "Fahrgastschiff" umgebaut (vgl. Abb.8 und 9).

#### Spezialschiffstypen

Schlepper, 2 Varianten (Modell des 2750 PS-Seeschleppers "Atlas" wurde in einen Hafenschlepper umgebaut, vgl. Abb.10)

Tragflächenboot Supramar PT 50 (Abb.11)

Hecktrawler 940 BRT, 2 Varianten (Abb.12)

Forschungsschiff "Meteor" (Abb.13)

Die Versuche mit dem außerdem untersuchten Kühlschiff "Angelburg" (Schaukastenmodell) hatten den Zweck, den Einfluß kleiner Bauteile auf die Luftkräfte zu ermitteln (s.u.), (Abb.14).

Die Frachtschiffsmodelle wurden auf 2 Tiefgängen gemessen. Bei den meisten Modellen wurde auch der Rumpf ohne Aufbauten untersucht.

Aus der folgenden Übersicht gehen Einzelheiten über die Modelle und das Versuchsprogramm hervor.

## 4. Versuchsmethode

### 4.1. Wahl der Versuchsmethode

Für die Wahl der Versuchsmethode waren folgende Gesichtspunkte entscheidend:

1. Untersuchung der Modelle in einer möglichst homogenen Strömung.

Die Modelle der verschiedenen Schiffstypen wurden aus Gründen einer guten Strahlausnutzung etwa gleichlang, also in unterschiedlichem Maßstab hergestellt. Wollte man die Modelle in inhomogener Strömung untersuchen, deren Gradienten ähnlich dem der natürlichen Windverteilung über der See ist, müßten entweder alle Modelle im gleichen Maßstab hergestellt werden, oder der Windgradient müßte jeweils dem Modellmaßstab angepaßt werden. Abgesehen von den Schwierigkeiten der Erzeugung einer inhomogenen Strömung mit gewünschten Gradienten, wären die Ergebnisse unmittelbar nur für ein in Ruhe befindliches Schiff anwendbar. Der Gradient der das Schiff treffenden Strömung hängt stark vom Verhältnis der wahren Windgeschwindigkeit zur Fahrtgeschwindigkeit (der Fahrtwind ist homogen!) und vom Winkel zwischen Fahrtrichtung und Windrichtung ab. Die Untersuchung der Modelle in homogener Strömung erschien auch aus Gründen der theoretischen Auswertung und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander wünschenswert. Die Auswirkung eines Gradienten der Relativströmung könnte nachträglich berücksichtigt werden (vgl. 4.4.3.).

2. Eine (Wasserlinien-)Ebene ist von großem Einfluß auf die Ausbildung der Strömung hinter dem Schiff (und damit der Kräfte am Schiff) besonders bei großen Anströmwinkeln (vgl. Gutsche [21]). Die Untersuchung von Doppelmodellen in Strahlmitte würde also zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Andererseits bedingt die Untersuchung des Modells auf einer Platte eine kleine (unvermeidliche) Anlaufgrenzschicht.

3. Hat man, wie das Institut für Schiffbau, nur einen verhältnismäßig kleinen Windkanal zur Verfügung, so ist eine besonders gute Strahlausnutzung erforderlich. Da die Strahlgeschwindigkeit durch Leistung und Strahlquerschnitt des Windkanals festliegt, müssen die Modelle zur Erzielung großer Reynoldszahlen möglichst groß ausge-

führt werden. Dem sind Grenzen gesetzt, da bei zu großer Strahlversperrung die Meßergebnisse stark verfälscht werden. Eine gute Strahl- ausnutzung wird durch Umformung des Kreisstrahls in einen Rechteck- strahl erreicht, in dessen Randzone das Modell untersucht wird. Dop- pelmodelle würden doppelte Strahlversperrung ergeben!

4. Die Versuchseinrichtung sollte die Untersuchung der Modelle bei beliebigen, auch nach Beginn der Versuche noch wählbaren Tief- gängen, Trimmlagen und Krängungen gestatten. Auch die Untersuchung vollständiger Schaukastenmodelle sollte möglich sein.

#### 4.2. Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtung wurde schon verschiedentlich beschrieben [25], [28] und soll anhand einiger Fotos erläutert werden (Abb.15 bis 17).

Der Windkanal des Instituts für Schiffbau hat einen kreisförmigen Austrittsquerschnitt der festen Düse von 2 m Durchmesser. Für die beschriebenen Versuche wurde der Austrittsquerschnitt mit Hilfe ei- ner Rechteckübergangsdüse in einen Rechteckquerschnitt umgeformt (1,750 m breit und 1,05 m hoch). Zur Erzielung paralleler Stromfäden waren am Düsenaustritt seitlich Leitbleche angebracht.

Die abschließende kastenförmig versteifte Bodenplatte (2,40 m breit und 3,90 m lang) begrenzt den Rechteckstrahl nach unten. Die Kanal- grenzschicht wurde durch Anbringen der Bodenplatte 50 mm oberhalb des unteren Düsenrandes abgeleitet. Dadurch ist eine bis auf die An- laufgrenzschicht von 26 mm Dicke homogene Strahlgeschwindigkeitsver- teilung erzielt worden (vgl. Abb.18).

Im Abstand  $x_S = 1,375$  m vom Düsenaustritt ist eine Drehscheibe von 1,70 m Durchmesser mit 2 mm Spalt niveaugleich in die Bodenplatte eingelassen. Zur Aufnahme der Modelle dient die Modellwanne (1,50 x 0,30 m) in Drehscheibenmitte, die einen in der Höhe verstellbaren Boden besitzt, auf dem das zu untersuchende Modell befestigt wird. Je nach Einstellung des Wannensbodens können die Modelle bei verschie- denen Tiefgängen und Trimmlagen (oder auch Krängungen) untersucht werden. Die Wanne wird dann jeweils bündig mit der Drehscheibe durch der Wasserlinie angepaßte Schablonen abgedeckt, die am Modell dicht

mit Plastilin angeschlossen werden. Zur Messung der Rollmomente bei einigen Modellen wurde eine Rollmomentenwaage in die Modellwanne eingebaut: Hierzu wurde durch 2 Stahlfedern mit DMS-Streifen eine zweite das Modell tragende Platte mit dem verstellbaren Boden der Modellwanne verbunden. Die Abdichtung zwischen Modell und Wasserlinienschablone erfolgte jetzt durch elastische Schaumstoffstreifen. Die elastischen Eigenschaften des Schaumstoffs wurden dadurch berücksichtigt, daß die Eichung der Rollmomentenwaage mit eingebautem und in der Wasserlinie abgedichtetem Modell erfolgte.

Ein dreiarmer Konsolstern trägt die Drehscheibe und verbindet sie mit der Drehvorrichtung (Spindeltrieb) der Dreikomponenten - Feder-gelenkwaage. Eine größere Vertikalbelastung der Waage wird durch den Styropor-Schwimmer in einem Schwimmergefäß mit Wasser vermieden.

Die Waage besitzt drei elektrische Kraftmeßdosen auf DMS-Basis (Hottinger-Baldwin) mit 20 kp Meßbereich, die über einen Meßstellenumschalter durch einen Trägerfrequenz-Meßverstärker (Hottinger-Baldwin KWS/II -5) gespeist werden. Die Meßwerte können an der Skala der Meßverstärker abgelesen werden.

Hinter der Drehscheibe wird der Strahl durch einen "Slotted Wall" (Schlitzwandstrecke aus Kunststoffplatten) von der Form des Austrittsquerschnitts der Rechteckdüse bis kurz vor den Auffangtrichter des Diffusors geführt. Der sechzehneckige Auffangtrichter hat einen Auswendurchmesser von 2,50 m.

#### 4.3. Versuchsdurchführung

Die Modelle wurden mit gewünschtem Tiefgang und Trimmzustand in die Drehscheibe eingebaut, und zwar so, daß  $L_{OA}/2$  der Mitte der Drehachse entsprach. Die Untersuchung der Frachtschiffsmodelle erfolgte außer bei dem Tiefgang  $T$  (beladen) auch für den Ballasttiefgang unvertrimmt, für den vereinfachend  $T_{Ballast} = 0,60 \cdot T$  gesetzt wurde. Der Einfluß des Trimms wurde für den Tanker ( $0,5^\circ$  Trimm) und das 10000 tdw.-Frachtschiff ( $1^\circ$  Trimm) auf Ballasttiefgang geprüft.

Die verschiedenen Anströmwinkel des Modells wurden durch Drehen der Drehscheibe erreicht, und zwar in Intervallen von  $5^\circ$  oder  $10^\circ$ , für symmetrische Modelle von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  und für zur Mittellängsebene unsymmetrische Modelle von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ .

Bei der Messung wurde der am Betzmanometer angezeigte Vorkammerdruck  $p_v$  konstant gehalten (Staudruck  $q = 1,01 \cdot p_v$ ). Die Messung erfolgte im allgemeinen bei zwei Vorkammerdrücken  $p_v = 25$  bzw.  $50 \text{ kp/m}^2$ , denen Geschwindigkeiten von ca. 20 bzw. 29 m/s entsprachen.

Aus den Ablesungen der Meßwerte der 3 Aufnehmerdosen an der Skala des Meßverstärkers ergaben sich zunächst 3 Komponenten (Widerstand, Querkraft, Giermoment). Nach Einbau der Rollmomentenwaage wurde für einige Modelle als vierte Komponente das Rollmoment gemessen.

#### 4.4. Meßgenauigkeit und Korrektur der Meßwerte

Nachfolgend sollen die Korrekturen diskutiert werden, die an den Meßwerten vorgenommen wurden oder die bei der Anwendung der vorliegenden Versuchsergebnisse beachtet werden müssen.

##### 4.4.1. Meßgenauigkeit

Die Meßwerte konnten an der Skala des Meßverstärkers im allgemeinen auf  $\pm 0,5$  Skalenteile (Skala mit 100 Teilstrichen) genau abgelesen werden, sofern nicht stärkere Ablösungserscheinungen (im Bereich der Queranströmung) zu großen Meßwertschwankungen führten. Die Meßgenauigkeit entsprach damit  $\pm 0,5\%$  des zum jeweiligen Meßbereich gehörigen maximalen Meßwertes. Der große Abstand der beiden Widerstandsmeßdosen von der Drehachse macht die Waage zur Messung großer Quermomente geeignet, führt aber andererseits bei der Messung kleiner Momente zu geringerer Meßgenauigkeit.

##### 4.4.2. Kräfte an der Drehscheibe

Von den gemessenen Gesamtkräften auf Modell und Drehscheibe wurden die getrennt ermittelten Teilkräfte auf die Drehscheibe abgezogen. Diese sind verhältnismäßig klein. Es handelt sich um Reibungskräfte und eine Kraft, die sich aus der Druckverteilung im Spalt zwischen Drehscheibe und Bodenplatte oberhalb der ringförmigen Wasserdichtung ergibt. Die Ermittlung der Drehscheibenteilkräfte erfolgte nach Anbringen einer Modellattrappe dicht über der Drehscheibe, die eine ähnliche Umströmung der Drehscheibe bewirkte, wie sie bei der Kraftmessung am Modell auftritt.

Die erforderlichen Korrekturen betragen (für  $p_v = 50 \text{ kp/m}^2$ ) z.B. für den Widerstand 40 bis 525 p und für die Querkraft 0 bis 200 p. Die maximalen Widerstandskorrekturen für die Drehscheibe schwanken zwischen 7% (Fahrgastschiff) und 24% (Tanker, beladen) des jeweiligen maximalen Meßwertes und betragen für Frachtschiffsmodelle 8 bis 13%. Die entsprechenden Querkraftkorrekturen lagen bei 4% (Fahrgastschiff) bis 22% (Tanker, beladen) der jeweiligen maximalen Querkraft.

#### 4.4.3. Korrektur der Anlaufgrenzschicht

Bei der gewählten Versuchsanordnung läßt sich die Anlaufgrenzschicht von 26 mm Dicke (auf Mitte Drehscheibe), vgl. Abb.18, nicht vermeiden. Oberhalb dieser Grenzschicht herrscht eine weitgehend homogene Geschwindigkeitsverteilung. Da die Modelle annähernd gleichlang sind und demzufolge in verschiedenem Modellmaßstab hergestellt wurden, wirkt sich die bei allen Modellen gleichgroße Grenzschicht verschieden auf die Meßergebnisse aus. Um die Meßergebnisse vergleichbar zu machen, müßte der Einfluß der Grenzschicht korrigiert werden, d.h. die Ergebnisse müßten auf homogene Geschwindigkeitsverteilung umgerechnet werden. Diese Umrechnung kann angenähert folgendermaßen erfolgen:

Die Ergebnisse der Modellversuche werden in der Form dimensionsloser Beiwerte gegeben (vgl. Anhang), die auf den Staudruck außerhalb der Grenzschicht  $q$  bezogen sind. Diese Beiwerte müßten auf den mittleren Staudruck  $q_m$  (integriert über die Modellhöhe, wobei sich wiederum die unter 2. definierte mittlere Höhe  $H_{Lm}$  anbietet) bezogen werden. Der Korrekturfaktor für die Ergebnisse im Anhang würde sich zu  $q/q_m$  ergeben und ist in den Tabellen mit angegeben worden. Für vergleichende Darstellungen wurden entsprechend korrigierte Beiwerte benutzt.

In ähnlicher Weise könnte ein vorgegebener Windgradient berücksichtigt werden: die Beiwerte für homogene Strömung müßten mit dem Verhältnis des mittleren Staudruckes der inhomogenen Strömung (integriert über die Modellhöhe) zum Staudruck der homogenen Strömung multipliziert werden. Zur Überprüfung dieser Korrekturmethode könnten Windkanalversuche mit Schiffsmodellen in inhomogener Strömung

nützlich sein (vgl. Shearer - Lynn [19]).

#### 4.4.4. Korrekturen für die Strahlversperrung

Die Meßwerte enthalten keine Korrekturen für den Einfluß der Strahlversperrung auf Staudruck und wirksame Schräganströmung am Modell. Dieser Einfluß kann nach den Ergebnissen der Untersuchung von Rechteckplatten und Schiffssilhouetten mit verschiedenen Versperrungsverhältnissen im gleichen Rechteckstrahl (IfS-Bericht Nr. 160 [29]) abgeschätzt werden. Die Modelle wurden so groß gewählt, daß die für Strahlversperrung notwendigen Korrekturen verhältnismäßig klein sind.

Für die meisten Modelle lag die Strahlversperrung  $A_L/A_S$  zwischen 0,03 und 0,08. Die erforderlichen Korrekturen liegen hier innerhalb der Meßgenauigkeit. Höhere Versperrungsverhältnisse erreichten: Fahrgastschiff, Fährschiff und Tragflächenboot ( $A_L/A_S = 0,094$  bis  $0,167$ ).

Die Querkraftbeiwerte müßten in diesen Fällen um maximal 2 bis 5% erhöht werden. Auch die Widerstandsbeiwerte im Bereich anliegender Strömung müßten um etwa 5% erhöht werden. Diese Korrektur liegt jedoch bereits im Bereich der Meßgenauigkeit. Für Völlabgelöste Strömung ist im Bereich der vorliegenden Strahlversperrungen keine Korrektur erforderlich.

#### 4.4.5. Einfluß der Reynoldszahl

Die begrenzten Strahlquerschnitte der Windkanäle bedingen einen großen Modellmaßstab. Dadurch können selbst bei sehr hohen möglichen Strahlgeschwindigkeiten die Reynoldszahlen großer Schiffe im Modellversuch auch **nicht** annähernd erreicht werden:

$$\text{Modellversuche: } R_n = 1,0 \text{ bis } 7,0 \cdot 10^6$$

$$\text{Schiffe (Bft.6; } v = 12,3 \text{ m/s): } R_n = 0,4 \text{ bis } 2,5 \cdot 10^6$$

Bei den beschriebenen Versuchen wurden maximale Reynoldszahlen von etwa  $R_n = v \cdot L_{\text{OA}} / \nu = 2,7 \cdot 10^6$  erreicht.

Einige Modelle wurden in speziellen Versuchsreihen bei Anströmung von vorn ( $\epsilon = 0^\circ$ ) und seitlich ( $\epsilon = 90^\circ$ ) im Geschwindigkeitsbereich von 12,5 bis 31,0 m/s untersucht, um den Einfluß der Reynoldszahl

auf den Widerstand zu zeigen. Die Ergebnisse sind in Abb.19 dargestellt. Der Widerstand von vorn ist stärker von  $R_n$  abhängig: er strebt einem Minimalwert zu, der zwischen  $R_n = 2,0$  und  $2,5 \cdot 10^6$  erreicht wird. Auch der Widerstand bei seitlicher Anströmung nimmt mit steigender Reynoldszahl ab und erreicht für  $R_n > 2,0 \cdot 10^6$  ein Minimum. Für Windkanalversuche mit Schiffsmodellen wäre demnach eine Reynoldszahl von mindestens  $R_n = 2,0 \cdot 10^6$  erforderlich, um verlässliche Ergebnisse erzielen zu können. Die Abhängigkeit des Querkraftbeiwertes  $c_Q$  von  $R_n$  ist geringer.

Wegen der starken Reynoldszahlabhängigkeit von Kreiszyklindern kann bei Frachtschiffen eine weitere Widerstandsverminderung auftreten, sobald Masten und Ladebäume in den überkritischen Strömungsbereich gelangen ( $R_n = V \cdot d / \nu > 5,0 \cdot 10^5$ ), wozu Relativanströmgeschwindigkeiten von 9,10 m/s (Mast 0,80 m Durchmesser) bzw. 24,20 m/s (Ladebäume 0,30 m Durchmesser) erforderlich sind. Drahtseile gelangen im allgemeinen nicht in den überkritischen Strömungszustand.

Rechnet man den durch Messung ermittelten Teilwiderstand der Masten und Ladebäume (Widerstandsbeiwert  $e_D$  etwa 1,0) auf den Widerstand bei überkritischer Strömung um ( $c_D$  sinkt auf etwa 0,33), so ergeben sich für das gesamte Schiff bei seitlicher Anströmung im beladenen Zustand z.B. Widerstandsverminderungen um 8 bis 9%. In Wirklichkeit wirkt nicht an jeder Stelle die überkritische Geschwindigkeit erreicht, und die wirkliche Verminderung dürfte geringer sein. Im Ballastzustand liegen Masten und Ladebäume in stärkerem Maße in der Wirbelzone über dem Deck (größerer Freibord), wodurch der Widerstandsanteil des Ladegeschrirs und damit die mögliche Widerstandsverminderung wesentlich niedriger ist.

#### 4.4.6. Widerstand kleiner Bauteile

Die Windkanalmodelle wurden aus Teakholz hergestellt; Schanzkleid, Geländer waren aus Messing. Kleinere Bauteile wurden entweder weggelassen (z.B. Poller, Spille, kleinere Winden, Anker, kleine Lüfter) oder stark vereinfacht (z.B. Ladewinde, Ankerwinde).

Zur Nachprüfung des Einflusses kleiner Bauteile wurde ein im Institut verfügbares Schaukastenmodell des Kühlschiffes "Angelburg" in den Windkanal gebracht (Abb.13).

Der Originalzustand des Modells ließ hohen Windwiderstand erwarten (aufgetoppte Bäume mit entsprechendem laufendem Gut, umfangreiche Sonnensegeleinrichtung). Nach der Messung wurde das Modell in den "Normalzustand" gebracht (Bäume flach an Deck gehalten, laufendes Gut, Sonnensegeleinrichtung, Flaggen entfernt). Der dritte untersuchte Modellzustand entsprach etwa dem der Windkanalmodelle: die kleinen Ausrüstungsteile wurden entfernt (Poller, Anker, kleine Winden und Lüfter).

Das Ergebnis der Untersuchungen kann man wie folgt zusammenfassen: Aufgetoppte Bäume und umfangreiche Sonnensegeleinrichtung bedingen gegenüber dem "Normalzustand" um 28% (von vorn) bis 5% (seitlich) größere Widerstände eines Modells (Großausführung etwa 2/3 der Widerstandserhöhung). Diese Ergebnisse konnten durch Nachrechnung bestätigt werden.

Wesentlich niedriger ist der Einfluß der gegenüber dem "Normalzustand" bei den Windkanalmodellen weggelassenen kleinen Bauteile, die meist sehr nahe am Deck, hinter dem Schanzkleid oder im Staugebiet vor den Aufbauten liegen. Für diese kleinen Bauteile müßte ein Widerstandszuschlag von maximal 2 bis 3% berücksichtigt werden.

Diese Angaben gelten für das untersuchte Modell, lassen sich aber sinngemäß auch auf andere Schiffe übertragen.

## 5. Ergebnisse der Windkanalversuche

### 5.1. Definition der Kraftkomponenten und der Momente (vgl. Abb.20)

Als Ergebnis der Windkanalversuch erhält man die Komponenten der resultierenden Luftkraft  $F_r$ , sowie die Lage der Resultierenden zu den Körperachsen, woraus sich die Momente ergeben.

Unmittelbar gemessen wrden die Kraftkomponenten in Strömungsrichtung der Widerstand  $D$ , und dazu senkrecht in der Horizontalebene die Querkraft  $C$ , sowie Giermoment  $N$  und Rollmoment  $K$ . Die Schiffslängsachse  $x$  schließt mit der Anströmrichtung den Winkel  $\epsilon$  (Anströmwinkel) ein. Für die Kraftkomponenten in Schiffslängsrichtung (Längskraft  $X$ ) und senkrecht dazu (Seitenkraft  $Y$ ) erhält man:

$$X = C \cdot \cos \epsilon - D \cdot \sin \epsilon ;$$

$$Y = C \cdot \sin \epsilon + D \cdot \cos \epsilon ;$$

Der Nullpunkt des schiffsfesten Koordinatensystems ist gewählt auf  $L_{OA}/2$  in der WL-Ebene. Die positiven Achsenrichtungen sind: nach vorn (x), nach Steuerbord (y) und nach unten (z).

Als "Druckpunkt" definieren wir den Durchstoßpunkt der resultierenden Luftkraft  $F_T$  durch die Mittschiffsebene. Seine Koordinaten (auf den Koordinatenursprung bezogen) sind:

$$x_F = N/Y \quad \text{und}$$

$$z_F = -K/Y .$$

Zweckmäßigerweise werden die Kraftkomponenten und Momente in dimensionslose Form gebracht:

$$c_D = \frac{D}{q \cdot A_L} \quad \text{Widerstandsbeiwert} \\ \text{(entsprechend } c_C, c_X, c_Y)$$

$$c_N = \frac{K}{q \cdot A_L \cdot L_{OA}} \quad \text{Giermomentenbeiwert}$$

$$c_K = \frac{K}{q \cdot A_L \cdot H_{Lm}} = \frac{K \cdot L_{OA}}{q \cdot A_L} \quad \text{Rollmomentenbeiwert}$$

Sind die Beiwerte auf das Lufthauptspant  $A_X$  bezogen, wird dies in Klammern hinter dem Index angegeben:

$$c_{D(Ax)} = \frac{D}{q \cdot A_X}$$

Die Kraft- und Momentenbeiwerte können über den Anströmwinkel  $\epsilon$  aufgetragen werden und zeigen die in Abb.21 als Beispiel dargestellten charakteristischen Verläufe. Links (Abb.21a) sind die Beiwerte eines Frachtschiffes (mit stark aufgelöstem Lateralplan) aufgetragen; kennzeichnend sind ein hoher Frontalwiderstand und eine geringe Querkraft. Rechts sind dargestellt die Ergebnisse für ein Fahrgastschiff, das einen langen durchlaufenden Aufbau und somit einen wenig gegliederten Lateralplan besitzt: hier sind ein geringer Frontalwiderstand und große Querkraft erkennbar.

## 5.2. Darstellung und Erläuterung der Versuchsergebnisse

Im folgenden sollen die Verläufe der einzelnen Komponenten getrennt betrachtet werden.

### 5.2.1. Querkraft- und Widerstandsbeiwerte

Es handelt sich um die Beiwerte der Kraftkomponenten in Richtung der "aerodynamischen Achsen" in Anströmrichtung ( $c_D$ ) und senkrecht dazu ( $c_G$ ). Gesamtquerkraft und Gesamtwiderstand des Überwasserschiffes ergeben sich - unter Beachtung vielfältiger Interferenzen - als Summe der Querkräfte und Widerstände der zahlreichen verschiedenartigen Einzelkörper, aus denen sich das Überwasserschiff zusammensetzt. Sehr aufschlußreich ist in diesem Zusammenhang die Betrachtung der Abb.22: Rumpf und Aufbau allein bestimmen praktisch schon Größe und Verlauf des Querkraftbeiwertes, während der Widerstandsbeiwert des betrachteten Frachtschiffes noch sehr stark von Masten, Windhäusern und Ladebäumen beeinflusst wird.

#### 5.2.1.1. Querkraftbeiwerte $c_G$

In Abb.23 sind die Querkraftverläufe für einige der untersuchten Modelle dargestellt. Die Verläufe sind mehr oder weniger sinusförmig: ausgehend von  $c_G = 0$  bei  $\epsilon = 0^\circ$ , erreichen die  $c_G$ -Werte etwa bei  $\epsilon = 45^\circ$  ein Maximum, werden im Bereich von  $\epsilon = 90^\circ$  wieder zu Null, um bei etwa  $\epsilon = 135^\circ$  ein negatives Maximum zu erreichen und für  $\epsilon = 180^\circ$  auf Null zurückzugehen. Die Form des Querkraftverlaufes wird stark von den Abmessungsverhältnissen der Aufbauten und ihrer Größe und Lage im Verhältnis zum Rumpf beeinflusst.

Ein charakteristischer Wert ist der maximale Querkraftbeiwert  $c_{Gmax}$ .  $c_{Gmax}$  hängt in hohem Maße vom "Höhen-Längen-Verhältnis"  $2A_L/L_{OA}^2$  ab, das dem Seitenverhältnis des Überwasserschiffes entspricht. Vom Einfluß für die Ausbildung der Querkraft ist ferner die Form des Überwasserschiffes, der Auflösungsgrad der Lateralfläche, der umgekehrt proportional dem Verhältnis  $A_L/A_X$  ist.  $c_{Gmax}$  steigt  $\pm$  im untersuchten Bereich - mit wachsendem  $2A_L/L_{OA}^2$  und  $A_L/A_X$ . Dies ist eine erneute Bestätigung der bereits in [30] theoretisch und experimentell (für

Rechteckplatten) gezeigten Zusammenhänge; auch dicke Körper zeigen diesen Einfluß [31]. In Abb. 25 wurde versucht, diese Zusammenhänge mit Hilfe des zur Verfügung stehenden Materials für den vorderen Anströmbereich quantitativ darzustellen: die Vergleichswerte  $2A_{L0}/L_{OA}^2$  und  $A_{L0}/A_{X0}$  wurden ohne Flächenanteile der reinen Widerstandskörper berechnet.

Das Verhältnis der maximalen Querkraft im vorderen **Anströmbereich** zur maximalen Querkraft im hinteren Anströmbereich hängt stark von der eben erwähnten Größe und Lage der Aufbauten im Verhältnis zum Rumpf ab: entgegengesetzt gleichgroße Maxima für  $c_G$  im vorderen und hinteren Anströmbereich kann man bei Fahrgastschiffen und anderen Schiffen mit langgestreckten zentral gelegenen Aufbauten erwarten; ebenso bei Schiffen mit dominierendem Einfluß des Rumpfes.

Bei vorn gelegenen und im Verhältnis zum Rumpf großen Aufbauten (z.B. Schlepper) wird im vorderen Anströmbereich ein wesentlich größeres Querkraftmaximum erreicht, entsprechend ergeben weit hinten gelegene und im Verhältnis zum Rumpf große Aufbauten (Kümo und Tanker mit Aufbauten hinten, beladen) ein größeres hinteres Querkraftmaximum. Beim Übergang in den Ballastzustand wächst im allgemeinen das vordere Querkraftmaximum stärker als das hintere.

#### 5.2.1.2. Widerstandsbeiwerte $c_D$

Typische Verläufe des Widerstandsbeiwertes  $c_D = f(\epsilon)$  zeigt Abb.24: von einem stark vom Schiffstyp abhängenden Wert bei  $\epsilon = 0^\circ$  steigt  $c_D$  mit größer werdendem Anströmwinkel an, wobei der  $c_D$ -Anstieg anfangs zunimmt und mit beginnender Teilablösung der Strömung wieder abnimmt. Der Widerstandsbeiwert erreicht ein Bereich seitlicher Anströmung einen Maximalwert und nimmt dann wieder ab. Die größten Unterschiede der  $c_D$ -Werte für verschiedene Schiffstypen treten bei Anströmung von vorn ( $\epsilon = 0^\circ$ ) und seitlich ( $\epsilon = 90^\circ$ ) auf. Diese Widerstandsbeiwerte sollen als charakteristische Werte höher betrachtet werden (vgl. auch die Abhängigkeit dieser Werte von der Reynoldszahl, Abb.19). Die angegebenen Zahlenwerte für Schiff "in Ballast" beziehen sich auf den unvertrimmten Zustand. Eine achterliche Vertrimmung von  $1^\circ$  (Frachtschiff 10000 tdw) bzw.  $0,5^\circ$  (Tanker) ergab eine Erhöhung des

Widerstandsbeiwertes  $c_D$  für Anströmung von vorn um 10 bis 20%, während der Widerstand für seitliche Anströmung ( $\epsilon = 90^\circ$ ) sich nur wenig änderte.

Die folgende Tabelle stellt die zu erwartenden Widerstandsbeiwerte  $c_{D(Ax)}$  für  $\epsilon = 0^\circ$  und  $c_D$  für  $90^\circ$  für einige Schiffstypen zusammen:

Schiffstyp	$c_{D(Ax)} \quad \epsilon = 0^\circ$ *)	$c_D \quad \epsilon = 90^\circ$
Fahrgastschiffe	0,27 bis 0,41	0,84 bis 0,87
Tragflügelhörnboot		
auf CWL	0,39	0,78
auf Tragflügelhörnboot	0,42	0,93
Schlepper	0,60 bis 0,70	0,88 bis 0,93
Hecktrawler	0,65 bis 0,75	0,88 bis 0,90
kleines Frachtschiff (Kümo)	1,08 (beladen) 0,85 (Ballast)	0,96 (beladen) 0,92 (Ballast)
Frachtschiffe	0,66 bis 0,82 (beladen) 0,57 bis 0,72 (Ballast)	0,82 bis 0,92 (beladen) 0,87 bis 0,94 (Ballast)
Tanker	1,04 (beladen) 0,77 bis 0,83 (Ballast)	0,72 bis 0,77 (beladen) 0,75 bis 0,80 (Ballast)

\*) in der Praxis ist es vielfach üblich, den Widerstandsbeiwert auf das Lufthauptspant  $A_X$  zubeziehen.

#### Widerstand bei Anströmung von vorn ( $\epsilon = 0^\circ$ )

Als hauptsächliche Einflußgrößen auf  $c_{D(Ax)}$  für  $\epsilon = 0^\circ$  kommen in Betracht:

"Höhen-Breiten-Verhältnis" des Lufthauptspantes  $2A_X/B^2$ , sowie der

"Völligkeitsgrad" des Überwasserlateralplans  $A_L/H_{Xm} \cdot L_{OA} = H_{Lm}/H_{Xm}$ .

Das Produkt beider Einflußgrößen ergibt eine anschauliche Größe: das Verhältnis der mittleren (Lateralplanhöhe) zur Schiffsbreite:

$$\frac{A_L}{H_{Xm} \cdot L_{OA}} \quad ; \quad \frac{2A_X}{B^2} = \frac{A_L \cdot B \cdot 2A_X}{A_X \cdot L_{OA} \cdot B^2} = \frac{2H_{Lm}}{B} .$$

Da beide Größen  $c_{D(AX)}$  in gleicher Richtung beeinflussen (mit wachsendem  $2A_X/B^2$  bzw.  $H_{Lm}/H_{Xm}$  wird  $c_{D(AX)}$  kleiner), wurde eine Auftragung von  $c_{D(AX)}$  über  $2H_{Lm}/B$  für Schiffe mit ähnlichem Dickenverhältnis  $L_{OA}/B$  gewählt (vgl. Abb.26a).

Neben dem  $L_{OA}/B$ -Verhältnis sind folgende "Sekundäreinflüsse" auf  $c_{D(AX)}$  bei  $\epsilon = 0^\circ$  zu nennen: Anteil des Rumpfes am Lufthauptspant ( $A_{XR}/A_X$ ), Lage und Form der Aufbauten, Umfang der Masten und des Ladegeschrirs.

### Widerstand bei seitlicher Anströmung ( $\epsilon = 90^\circ$ )

Der Widerstandsbeiwert bei seitlicher Anströmung ist außer vom Schiffstyp auch von dessen Beladungszustand abhängig. Als Einflußgrößen sind zu nennen:

$2A_L/L_{OA}^2$  (Höhen-Längen-Verhältnis des Überwasserlateralplans)

$A_{LR}/A_L$  (Flächenanteil des Rumpfes an Überwasserlateralplan)

Lage und Form der Aufbauten (unsymmetrische Anordnung der Aufbauten erhöht den Widerstand).

Umfang der Masten und des Ladegeschrirs.

In Abb.25b sind die  $c_D$ -Werte für seitliche Anströmung über  $2A_L/L_{OA}^2$  aufgetragen. Man kann die Widerstandsbeiwerte für 3 Schiffstypen durch ordnende Linien verbinden:

Frachtschiff, beladen: Lateralplan stark gegliedert, kleiner Anteil des Rumpfes an Lateralfläche ( $A_{LR}/A_L = 0,66$  bis  $0,720$ )

Frachtschiffe, Ballast, und Hecktrawler: Lateralplan weniger stark gegliedert, größerer Anteil des Rumpfes am Lateralplan ( $A_{LR}/A_L = 0,75$  bis  $0,82$ )

Fahrgastschiffe: wenig gegliederter Lateralplan mit langem Aufbau.

### 5.2.2. Längskraft- und Seitenkraftbeiwerte

Die Beiwerte der Komponenten der Luftkraft in Richtung der schiffsfesten Achsen x und y erhält man durch Umrechnung aus den Widerstands-

und Querkraftbeiwerten (vgl. 5.1.). Längskraftbeiwert  $c_X$  und Seitenkraftbeiwert  $c_Y$  haben für die praktische Anwendung der Windkanalversuchsergebnisse größere Bedeutung.

### 5.2.2.1. Längskraftbeiwerte $c_X$

Die Luftkraftkomponente in Schiffslängsrichtung gibt die direkte Erhöhung ( $c_X$  negativ) oder Verminderung ( $c_X$  positiv) des Schiffswiderstandes durch die Luftströmung an. Da es vielfach üblich ist, die Längskraft auf das Lufthauptspant  $A_X$  zu beziehen, wurden für die Vergleichsdarstellung die Längskraftbeiwerte  $c_{X(A_X)}$  über  $\epsilon$  aufgetragen (Abb.27). Die Verläufe von  $c_{X(A_X)}$  hängen sehr stark vom Schiffstyp ab, d.h. vom Zusammenwirken großer oder kleiner Widerstandsbeiwerte mit großen oder kleinen Querkraftbeiwerten. Für kleine Anströmwinkel tritt im allgemeinen zunächst eine Verminderung von  $c_{X(A_X)}$  ein.

In den meisten Fällen erreicht der Längskraftbeiwert dann zwischen  $\epsilon = 25^\circ$  und  $\epsilon = 35^\circ$  ein negatives Maximum, das teilweise beträchtlich über dem Wert für  $\epsilon = 0^\circ$  (hier entgegengesetzt gleich dem Widerstandsbeiwert  $c_D$ ) liegt. Bei sehr unsymmetrisch angeordneten Aufbauten (Kümo, Tanker mit Aufbauten hinten) kann im Anströmbereich  $\epsilon > 90^\circ$  noch eine negative Längskraft ("Widerstand") auftreten. Bei Schiffen mit großem  $2A_L/L_{OA}^2$  und langem durchlaufendem Aufbau, die sich durch große Querkraftbeiwerte auszeichnen, kann schon im Bereich  $\epsilon < 90^\circ$  noch eine negative Längskraft auftreten (Fahrgastschiff, Fährschiff, Tragflächenboot).

Der Absolutwert der Längskraft im Bereich  $\epsilon > 90^\circ$  kann kleiner als die Längskraft im vorderen Anströmbereich werden, besonders wenn die Decks nach hinten stufenförmig auslaufen. Die folgende Tabelle enthält einige charakteristische Zahlenwerte für die Verhältnisse  $c_{Xmax}/c_{X(\epsilon=0^\circ)}$  und  $c_{X(\epsilon=0^\circ)}/c_{X(\epsilon=180^\circ)}$ .

Verhältnis-Werte für  $c_X$

Schiffstyp	$\frac{c_X(\max)}{c_X(\epsilon=0^\circ)}$	$\frac{-c_X(\epsilon=0^\circ)}{c_X(\epsilon=180^\circ)}$
Küstenmotorschiff, beladen (Ballast)	0,92 * 1,02	1,64 2,04
Frachtschiffe, beladen Ballast	1,17 bis 1,38 1,07 bis 1,44	1,03 bis 1,47 0,99 bis 1,16
Tanker, Aufb.hinten, beladen Ballast	0,91 * 0,86 *	1,15 1,26
Tanker, mit Brücke, beladen Ballast	1,19 1,17	1,08 1,26
Fahrgastschiffe	1,07 bis 1,15	0,75 bis 0,90
Schlepper	1,06 bis 1,12	0,80 bis 0,86
Hecktrawler	1,02	0,95
Frachter, Aufb.hinten, ohne Ladegeschirr, beladen Ballast	0,88 * 1,08	1,84 1,40

\*) relatives Maximum

5.2.2.2. Seitenkraftbeiwerte  $c_Y$

Die Kenntnis der Seitenkraftbeiwerte ist in Verbindung mit der Druckpunkthöhenlage wichtig zur Abschätzung der Stabilitätsbeanspruchung durch Seitenwind (vgl. 5.2.3.2.) sowie zur Ermittlung des Driftwinkels bei Seitenwind.

Wie die als Beispiel in Abb.28 dargestellten Verläufe von  $c_Y = f(\epsilon)$  zeigen, tritt der maximale Wert für  $c_Y$  nur selten bei  $\epsilon = 90^\circ$  auf. Die Seitenkraftkomponente erreicht z.T. schon bei  $\epsilon > 50^\circ$  ihr Maximum, besonders charakteristisch bei Schiffen mit hohen Querkraftbeiwerten. Im Bereich  $50^\circ < \epsilon < 130^\circ$  ändert sich  $c_Y$  nur wenig.

Die folgende Tabelle bringt Beispiele für die Verhältnisse  $c_{Y(\max)}/c_{Y(\epsilon=90^\circ)}$  und die Lage von  $c_{Y(\max)}$ .

Verhältnis-Werte für  $c_Y$

Schiffstyp	$\frac{c_{Y(\max)}}{c_{Y(\epsilon=90^\circ)}}$	$\epsilon$ bei $c_{Y(\max)}$
Küstenmotorschiff beladen	1,03	105°
Ballast	1,02	95°
Frachtschiff, beladen	1,00	ca. 90°
Ballast	1,0 bis 1,03	90° bis 105°
Tanker, beladen	1,02 bis 1,11	75° bis 80°
Ballast	1,0 bis 1,04	75° bis 90°
Fahrgastschiff	1,04 bis 1,23	55° bis 60°
Schlepper	1,04 bis 1,07	65° bis 75°
Hecktrawler	1,06	110°

5.2.3. Beiwerte der Gier- und Rollmomente

Es wurden nur die Giermomente  $N$  und die Rollmomente  $K$  gemessen, die zur Beurteilung der Manöviereigenschaften bzw. der Stabilitätsbeanspruchungen bei Seitenwind von Bedeutung sind. Demgegenüber ist die Bedeutung der (nicht gemessenen) Trimmomente für normale Schiffe gering.

5.2.3.1. Giermomentenbeiwerte  $c_N$

Abb.29 gibt Beispiele für den Verlauf der Giermomentenbeiwerte  $c_N = N/q \cdot A_L \cdot L_{OA}$  über dem Anströmwinkel  $\epsilon$ .

Die Giermomentenbeiwerte haben im allgemeinen ein positives und ein negatives Maximum, die bei  $\epsilon = 30^\circ$  bis  $50^\circ$  bzw.  $130^\circ$  bis  $145^\circ$  liegen.

Die Druckpunktvorlage  $x_F$ , die in engem Zusammenhang mit der Lage des Lateralschwerpunktes  $x_L$  steht (vgl. Abb.30b), hat großen Einfluß auf den Verlauf  $c_N = f(\epsilon)$ . In Abb.30a sind die relativen Druckpunktvorlagen  $x_F/L_{OA}$  für einige charakteristische Schiffstypen als Funktion des Anströmwinkels  $\epsilon$  dargestellt. Als charakterischer Wert ist in Abb.30b  $x_F/L_{OA} = f(x_L/L_{OA})$  bei  $\epsilon = 90^\circ$  aufgetragen. Bei größer werdendem Anströmwinkel  $\epsilon$  wandert der Druckpunkt nach hinten, und zwar stärker in den Bereichen anliegender Strömung. Die Neigung der Kurven  $x_F/L_{OA} = f(\epsilon)$  nimmt im allgemeinen mit wachsendem  $2A_L/L_{OA}^2$  zu und wird außerdem

wird außerdem von der Größe und Form der Aufbauten beeinflusst.

Ein Spiegelheck schiebt den Druckpunkt nach hinten (z.B. Hecktrwler, Forschungsschiff "Meteor"). Große, symmetrisch zur Mitte angeordnete Aufbauten verschieben den Druckpunkt ebenfalls nach hinten, während große, extrem hinten angeordnete Aufbauten die entgegengesetzte Wirkung haben.

#### 5.2.3.2. Rollmomentenbeiwerte $c_K$

Für einige Modelle wurden die Rollmomente gesondert gemessen. Abb.31 zeigt den Verlauf der Rollmomentenbeiwerte  $c_K = f(\epsilon)$ . Diese erreichen ihren Maximalwert zwischen  $\epsilon = 40^\circ$  und  $140^\circ$ , ändern sich im genannten Bereich aber nur wenig.

Bei Stabilitätsbetrachtungen ist es üblich, die Seitenkraft im Lateralschwerpunkt wirkend anzunehmen. Das ist eine grobe Vereinfachung. In Abb.32 sind die aus den Meßergebnissen ermittelten Druckpunkthochlagen  $z_F$  in der dimensionslosen Form  $-z_F/H_{Lm} = f(\epsilon)$  dargestellt. Danach schwankt  $-z_F/H_{Lm}$  für den Bereich maximaler Rollmomente zwischen 0,75 und 1,05. Eine Ausnahme bildet das Forschungsschiff "Meteor" ( $-z_F/H_{Lm}$  ca. 0,60). Wahrscheinlich können sich wegen der speziellen Form und Anordnung der Aufbauten der "Meteor" die die Druckpunkthochlage stark beeinflussenden Unterdruckspitzen an Deck nicht ausbilden. Das Rollmoment (und damit die "scheinbare Druckpunkthochlage") ergibt sich ja aus der Druckverteilung an Seitenflächen und freien Decks des Schiffes, so daß bei großen freien Decksflächen der "scheinbare Druckpunkt" wesentlich oberhalb des Lateralschwerpunktes liegen kann. Die folgende Tabelle enthält auch die Höhenlagen des Lateralschwerpunktes in der Form  $-z_L/H_{Lm}$ .

---

Maximale Rollmomentenbeiwerte und Druckpunkthochlagen im Bereich  
 $40^\circ < \epsilon < 140^\circ$ .

Schiffstyp	$c_{Kmax}$	bei $\epsilon$	$\frac{-z_F}{H_{Lm}}$	$\frac{-z_F}{H_{Lm}}(\epsilon=90^\circ) = \frac{z_L}{H_{Lm}}$	
Fährschiff	0,73	$120^\circ$	0,76 bis 0,93	0,88	0,57
Fahrgastschiff	0,76	$110^\circ$	0,78 bis 0,98	0,92	0,57
Hecktrawler	0,78	$70^\circ$	0,77 bis 1,04	0,94	0,62
"Meteor"	0,51	$70^\circ$	0,57 bis 0,64	0,62	0,65
Frachtschiff, (10000 tdw, Ballast)					
Aufb.mittschiffs	0,76	$110^\circ$	0,75 bis 0,93	0,83	0,62
Aufb.hinten	0,77	$110^\circ$	0,76 bis 1,07	0,86	0,61

Die Tatsache, daß der Druckpunkt oberhalb des Lateralschwerpunktes etwa in der Höhe  $H_{Lm}$  über der Wasserlinie liegt, wird auch durch eine entsprechende Auswertung der Messungen von Gutsche [21] bestätigt.

Druckverteilungsmessungen an einem Quader bei homogener und inhomogener Queranströmung haben ergeben, daß sich die Unterdruckspitzen "an Deck" bei inhomogener Anströmung, deren Gradient dem der natürlichen Windverteilung über der See ähnlich ist, stärker ausbilden [32]. Dadurch wird der "scheinbare Druckpunkt" nach oben verschoben und man kann erwarten, daß in der Praxis die angegebenen Werte  $-z_F/H_{Lm}$  noch übertroffen werden.

Als Richtwert für die Druckpunkthochlage ist also die mittlere Lateralplanhöhe besser geeignet als die (schwerer bestimmbare) Hochlage des Lateralschwerpunktes.

### 5.3. Hinweise zur theoretischen Analyse der Versuchsergebnisse

Strömungskräfte an Körpern kleinen Seitenverhältnisses (z.B. Ruder) kann man analysieren nach [33]:

$$c_G - c_{G0} = c_{W\epsilon} \cdot \sin \epsilon + c_{S\epsilon} \cdot \sin^{-2} \epsilon \cdot \cos \epsilon$$

$$c_D - c_{D0} = d_{W\epsilon} \cdot \sin^{-2} \epsilon + c_{S\epsilon} \cdot \sin^3 \epsilon$$

Auf diese Weise können u.U. auch Körper sehr kleinen Seitenverhältnisses (z.B. Unterwasserschiffe) in den Bereichen anliegender Strömung bzw. schwacher Teilablösung, sowie mit geänderten Koeffizienten auch im Bereich voll abgelöster Strömung analysiert werden, während der Übergangsbereich in dieser einfachen Weise nicht erfaßbar ist.

Die Analyse ist auf physikalischer Basis nur bereichsweise möglich. Bereits bei gewissen Unterwasserschiffsformen, besonders aber bei Überwasserschiffen ist, bedingt durch das z.T. vollständige Verschwinden der zirkulationsbedingten Saugkraft an der Vorderkante, eine Modifizierung des vorgenannten Systems erforderlich. Dies geschieht z.B. bei der Analyse von Messungen an schräg angeströmten Platten.

Ein komplizierterer Verlauf z.B. des Widerstandes, bei dem im Bereich  $\epsilon = 5^\circ$  bis  $15^\circ$  Extremwerte auftreten (vergl. Abb. 24), läßt sich aber auch damit nicht befriedigend darstellen. Es ist dann im Gleichungssystem der Einfluß einer um  $90^\circ$  verschobenen Abflußbedingung und einer zusätzlichen Druckverlust-Kraftkomponente durch die "Kiel-Längsströmung" zu berücksichtigen (vergl. auch [34]).

Als Kompromiß zwischen den erwähnten physikalischen Gesichtspunkten einerseits und einer erwünschten Einfachheit der Analyse andererseits hat sich z.B. das nachstehende Gleichungssystem bewährt:

$$c_G - c_{G0} = c_{W\epsilon} \cdot \sin \epsilon \cdot \cos \epsilon + c_{S\epsilon} \cdot \sin^{-2} \epsilon \cdot \cos \epsilon$$

$$c_D - c_{D0} = d_{W\epsilon} \cdot \sin \epsilon \cdot \cos \epsilon + d_{S\epsilon} \cdot \sin^{-2} \epsilon \cdot \cos \epsilon .$$

## 6. Hinweise für die praktische Anwendung der mitgeteilten Ergebnisse

Anhand einiger Beispiele soll nachfolgend auf einige Probleme hingewiesen werden, die sich im Zusammenhang mit der Anwendung der mitgeteilten Versuchsergebnisse ergeben.

### 6.1. Verlauf der wirksamen Kraft- und Momentenbeiwerte

Die in den Abbildungen und Tabellen gegebenen Kraft- und Momentenbeiwerte sind auf die Geschwindigkeit der Relativanströmung  $V$  bezogen. Bei gegebener wahrer Windgeschwindigkeit  $V_W$  hängt die Relativanströmgeschwindigkeit  $V$  von der Fahrtgeschwindigkeit des Schiffes  $V_H$  und dem Kurs des Schiffes zum Wind ab. Der Winkel  $\epsilon$  gibt den Kurs des Schiffes zur Richtung der Relativanströmung  $V$  an ("scheinbarer Wind"). Aus dem Dreieck der Geschwindigkeitsvektoren gewinnt man die Beziehung

$$\frac{V}{V_H} = \left( \frac{V_W}{V_H} \right)^2 - \sin^2 \epsilon + \cos \epsilon ,$$

aus der man als Funktion von  $V_W/V_H$  und  $\epsilon$  das Verhältnis  $V/V_W$  berechnen kann.

Die "wirksamen" Kraft- und Momentenbeiwerte (einheitlich auf  $V_W$  bezogen) erhält man durch Multiplikation der Beiwerte mit dem Verhältnis  $(V/V_W)^2$ , das nach oben angegebener Beziehung ermittelt wurde. Als Beispiel sind in Abb.33 die Rollmomentenbeiwerte  $c_K$  und die "wirksamen" Rollmomentenbeiwerte  $c_K \cdot (V/V_W)^2$  für ein Fährschiff ( $V_H = 20$  kn) und ein Frachtschiff in Ballast ( $V_H = 17$  kn) bei einer Windgeschwindigkeit  $V_W = 25$  kn (etwa Bft.6) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die größten wirksamen Rollmomente bei  $\epsilon = 40^\circ$  bzw.  $50^\circ$  auftreten.

### 6.2. Erhöhung des Schiffswiderstandes durch den Wind (effektive Längskraft)

Besonders für Probefahrtsauswertungen interessiert die wirkliche durch den Wind hervorgerufene Erhöhung des Schiffswiderstandes.

Die Komponente der Luftkraft in Schiffslängsrichtung  $X$  (Beiwert  $c_X$ ) ist nur ein Teil dieser Widerstandserhöhung. Die gleichzeitig auftre-

tende Seitenkraft  $Y$  muß durch eine gleichgroße Kraft des Unterwasserschiffes ausgeglichen werden, die durch Schrägstellen des Rumpfes (Abtrift) erzielt wird.

Es entsteht eine zusätzliche Längskraft  $X_{HY}$  im Wasser, die eine Funktion der Seitenkraftkomponente des Rumpfes  $Y_H$  ist:

Für kleine Driftwinkel  $\beta$  ist

$$X_{HY} = \epsilon_{CH} \cdot Y_H,$$

wobei  $\epsilon_{CH}$  die als Verhältnis der Widerstandserhöhung  $D_{HC}$  zur Querkraft  $C_H$  bei Schräganströmung des Rumpfes definierte Gleitzahl der Kräfte an Unterwasserschiff ist.

$\epsilon_{CH}$  hängt von der Rumpfform, vom Seitenverhältnis und vom Driftwinkel  $\beta$  des Unterwasserschiffes ab und kann durch Schrägschleppversuche vermittelt werden.

Den Driftwinkel  $\beta$  erhält man für ausgeglichene Seitenkraft

$$c_Y \cdot \frac{\rho}{2} V^2 \cdot A_V = c_{YH} \cdot \frac{\rho_H}{2} V_H^2 \cdot L_{pp} \cdot T$$

als Funktion des Rumpferquerkraftbeiwertes  $c_{CH}$  (für kleine  $\beta$  <sup>gilt</sup>  $c_{CH} \approx c_{YH}$ ) aus Versuchsergebnissen.

Damit wird der Beiwert der effektiven Längskraft

$$c_{Xeff} = c_X + c_{XHY}(c_{YH}) \cdot \frac{L_{pp} T}{A_L} \cdot \frac{\rho_H}{\rho} \cdot \frac{V_H^2}{V^2} = c_X + \epsilon_{CH} \cdot c_Y$$

Ergebnisse von Beispielrechnungen für ein Fährschiff ( $V_H = 20$  kn) und ein Frachtschiff, Ballast ( $V_H = 17$  kn) bei einer Windgeschwindigkeit  $V_W = 25$  kn (Bft.6) sind in Abb.34 dargestellt. Für die Berechnung von  $c_{Xeff}$  wurden Ergebnisse von Schrägschleppversuchen mit dem Mariner-Rumpf zugrundegelegt [33]. Das Verhältnis  $V_H/V$  wurde als Funktion von  $V_W/V_H$  und  $\epsilon$  berechnet (vgl. 6.1.). Aus der Abb.34 geht hervor, daß der maximale Beiwert  $c_{Xeff}$  beim Fährschiff um 162% und beim Frachtschiff in Ballast um 48% über dem maximalen Längskraftbeiwert  $c_X$  liegt.

### 6.3. Resultierendes Giermoment

Die Unter 5.2.3. beschriebenen Giermomentenbeiwerte der Luftkräfte gestatten für sich allein noch keine Aussage darüber, in welchem Maße ein Schiff luv- oder leegierig ist. Bei ausgeglichener Seitenkraft wirkt auf das Schiff im allgemeinen ein resultierendes Giermoment, das sich aus der Summe der Giermomente von Luft- und Wasserkräften ergibt. Wegen der stärkeren Druckpunktvorlage der Unterwasserkraft  $x_{FH}$  wirkt das resultierende Giermoment in den meisten Fällen luvgerig:

$$c_{Nres} \equiv c_N + c_{NH} \cdot \frac{L_{pp} \cdot T}{A_L} \cdot \frac{\rho_H}{\rho} \cdot \frac{V_H^2}{V^2} = c_Y \cdot \left( \frac{x_F}{L_{pp}} - \frac{x_{FH}}{L_{OA}} \right)$$

Unter Beachtung des Verhältnisses von Windgeschwindigkeit  $V_W$  und Fahrtgeschwindigkeit  $V_H$ , muß unter Benutzung von Schrägschleppversuchsergebnissen der Driftwinkel  $\epsilon$  des Schiffes für ausgeglichene Seitenkraft vermittelt werden (s. auch 6.2.). Die Druckpunktvorlage der Unterwasserseitenkraft  $x_{FH}$  ergibt sich dann als Funktion des Driftwinkels.

Als Beispiel wurden die Beiwerte des resultierenden Giermomentes  $c_{Nres}$  für ein Fährschiff ( $V_H = 20$  kn) und 2 Frachtschiffe in Ballast ( $V_H = 17$  kn) berechnet ( $V_W = 25$  kn, Bft.6) und in Abb. 35 dargestellt. Der Beiwert des resultierenden Giermomentes  $c_{Nres}$  nimmt mit  $\epsilon$  stetig zu. Da jedoch die Geschwindigkeit  $V$  der Relativanströmung für  $V_W = \text{konst.}$  mit wachsendem Anströmwinkel  $\epsilon$  abnimmt (vergl. 6.1.), sind zum Vergleich die Beiwerte des "wirksamen" resultierenden Giermomentes  $c_{Nres} \cdot \frac{V^2}{V_W^2}$  in Abb. 35 mit eingetragen worden. Das resultierende Giermoment  $m_W$  erreicht bei  $\epsilon = 40^\circ$  bis  $50^\circ$  ein Maximum.

## 7. Zusammenfassung und Folgerungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Windkräfte an Schiffen" wurden Windkanalversuche mit Modellen von Frachtschiffen, Fahrgastschiffen und einigen häufigen Spezialschiffstypen durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit werden diese Versuche beschrieben und die Ergebnisse der Versuche anhand von Beispielen erläutert. Ausführlich sind die Versuchsergebnisse in den Institutsberichten Nr. 153 [25] und Nr. 187 bis 189 [34], [35], [36] enthalten.

Gemessen wurden die horizontalen Komponenten der Luftkräfte sowie die Gier- und Rollmomente der Luftkräfte bei verschiedenen Schräganströmwinkeln. Die Frachtschiffsmodelle wurden auf Normal- und Ballasttiefgang untersucht.

Es werden Hinweise auf erforderliche Korrekturen und die Anwendung der Versuchsergebnisse gegeben.

Die Ergebnisse der durchgeführten systematischen Versuche machen künftige Untersuchungen auf diesem Gebiet nicht überflüssig. Jedoch sollte auch bei weiteren Einzeluntersuchungen auf eine einheitliche Versuchsmethodik geachtet werden, um vergleichbare Ergebnisse zu garantieren. Themen für weitere systematische Untersuchungen wären z.B.:

1. Windkanalversuche mit stark vereingachten Schiffsmodellen in homogener Strömung (Rumpf ohne Sprung und Schanzkleid, z.B. elliptische Wasserlinien, senkrechte Spante; Aufbauten quaderförmig in verschiedenen Abmessungsverhältnissen). Die Ergebnisse derartiger Versuche wären nützlich zum Studium der Interferenzen zwischen Rumpf und Aufbauten und zur Überprüfung und Weiterentwicklung der Methoden der theoretischen Analyse der Ergebnisse.

2. Versuche mit Schiffsmodellen in inhomogener Strömung.

Die Ergebnisse könnten zur Nachprüfung bzw. Entwicklung von Methoden zur Umrechnung der Ergebnisse von Versuchen in homogener Strömung auf inhomogene Strömung mit gegebenen Geschwindigkeitsgradienten dienen.

Künftige Windkanalversuche mit Überwasserschiffsmodellen sollten immer vollständige Rollmomentenmessungen einschließen, im Hinblick auf die Beurteilung der Querstabilität bei Seitenwind auch für das gekrängte Schiff. Da für einige schnelle Spezialschiffe (Tragflächenboote, Gleitboote) auch die Vertikalkomponente und das Trimmoment der Luftkraft von Bedeutung sind, wären für diese Schiffe Sechs-Komponenten-Messungen anzustreben.

Die Inangriffnahme und eine wesentliche finanzielle Förderung der Untersuchungen ist dem Forschungsrat der Freien und Hansestadt Hamburg zu danken. Der Dank gilt ferner den Firmen Howaldtswerke Hamburg A.G., Kieler Howaldtswerke A.G., Maierform GmbH, Bremen, Rickmers Werft und F.Schichau GmbH, Bremerhaven, für die Überlassung von Unterlagen für den Bau der Windkanalmodelle, sowie der Supramar A.G., Luzern, die uns für die Versuche ein Modell ihres Tragflächenbootes PT50 zur Verfügung stellte.

Abschließend möchte ich Herrn Thieme für seinen Rat und allen beteiligten Mitarbeitern des Instituts für Schiffbau, besonders Herrn Böhme, für ihre Hilfe bei Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Untersuchungen danken.

8. Schrifttum

- [1] Schoeneich: Der Windwiderstand von Seeschiffen, Schiffbau 1911, S.121.
- [2] Mc Entee, W.: Notes from the Model Basin, SNAME 1916, S.86.
- [3] Föttinger, G.S.: Vergleichsversuche über den Luftwiderstand von Schiffsmodellen, JSTG 1924, S.329.
- [4] Biles, H.: Notes on the Effect of Wind on Power and Speed, TINA 1927, S.164.
- [5] Hughes, G.: Model Experiments on the Wind Resistance of Ships, TINA 1930, S.310.
- [6] Hughes, G.: The Air Resistance of Ships' Hulls with Various Types and Distributions of Superstructures, IESS 1932, S.302.
- [7] EMB - Report 276, Dezember 1930: Tests of Drawing Room Model of 10000 - Ton Light Cruisers (PENSACOLA and SALT LAKE CITY) in Water to Determine Forces Due to Wind.
- [8] EMB - Report 312, Oktober 1931: Tests of Drawing Room Model of US Destroyer HAMILTON in Water to Determine Forces Due to Wind.
- [9] EMB - Report 334, August 1932: Test of Model of S.S. CLAIRTON to Determine Forces Due to Wind.
- [10] EMB - Report 345, Januar 1933: Tests of Model of USS SALINAS Inverted in Water to Determine Forces Due to Wind.
- [11] Hemke, P.E., Carson, G.B.: Wind Tunnel Tests on Streamlining Superstructures of Ships, Marine Engineering and Shipping Review 1936, S.603.
- [12] Araki, H., Hanaoka, T.: Wind Tunnel Experiments on Train Ferries, presented at the Autumn M. of the Soc. of N.A. Japan 1948, published in Vol. 84.
- [13] Kinoshita, M., Hanaoka, T., Nakajima, Y.: On the Effect of Wind on the Manoeuvrability of Bonito- and Tuna-Fishing Boats, presented at the Autumn M. of the Soc. of N.A. Japan 1949, published in Vol. 86.

- [14] Kinoshita, M., Nakajima, Y.: On the Effect of Wind on Manoeuverability of Vessels, Abstract Notes and Data Concerning the Subjects at the Sixth International Conference of Ships Tank Superintendents. Experimental Tank Committee of Japan 1951.
- [15] Okada, S.: On the Heeling Moment Due to Wind Pressure on Small Vessels, Presented at the Autumn M. of the Soc. of N.A. Japan, Nov. 1952, to be Published in Vol. 84.
- [16] Kinoshita, M., Okada, S.: Heeling Moment Due to Wind Pressure on Small Vessels, Proc. of Symposium on the Behaviour of Ships in a Seaway, Wageningen, Sept. 1957, S. 527.
- [17] ExperimentaTank Committee of Japan: An Investigation into the Sea-Going Qualities of the Single-Screw Cargo Ship NISSEI MARU by Actual and Model Ship Experiments, Transport. Technical Research Inst. Mejiro, Toshimaku, Tokyo, Japan 1954, S. 69.
- [18] DTMB-Report 839, 1952: Long, M.E.: Wind Tunnel Tests on Multiple Ship Moorings, Part 3.
- [19] Shearer, K., Lynn, W.: Wind Tunnel Tests on Models of Merchant Ships, NECI Vol. 76, S. 229.
- [20] Aertssen, G.: Service Performance and Seakeeping Trials on M.V. LUKUGA, TRINA 1963, S. 297.
- [21] Gutsche, F., Schroeder, G.: Seitliche Luft- und Wasserkräfte bei Schräganströmung von Fahrgastschiffen und Fischereifahrzeugen. Schiffbauforschung 4. Jahrgang (1965), Heft 3/4, S. 97.
- [22] Paterson, W.A.: Four Fast Cargo Liners, TRINA 1965.
- [23] Wagner, B.: Auswertung veröffentlichter Modellmessungen zur Bestimmung der Luftkräfte an Überwasserschiffen bei Schräganströmung, IfS-Bericht Nr. 113. April 1963.
- [24] Wagner, B.: Auswertung von Windkanalversuchen zur Bestimmung der Luftkräfte an Überwasserschiffen bei inhomogener Strömung. IfS-Bericht Nr. 117. Dez. 1965.

- [25] Wagner, B.: Windkanalversuche mit dem Modell des Forschungsschiffes Meteor, IfS-Bericht Nr. 153. Februar, 1966.
- [26] Thieme, H.: Bibliography on Aerodynamic Forces Influencing the Performance of Ships, IfS-Schrift Nr. 2092. Dez. 1966
- [27] Thieme, H.: Wind-Tunnel Program for Extended Experiments on Aerodynamic Forces on Ship Superstructure, IfS-Schrift Nr. 2095. Juni 1967.
- [28] Wagner, B.: Windkanalversuche mit dem Takelagemodell einer Viermastbark, IfS-Bericht Nr. 172. Okt. 1966.
- [29] Wagner, B.: Windkanalversuche mit Schiffssilhouetten und Rechteckplatten zur Prüfung des Versperrungseinflusses in einem Rechteckstrahl. IfS-Bericht Nr. 160 (in Vorbereitung).
- [30] Thieme, H.: Mechanik des Segelantriebs. Jb. STG 49. Band, 1955.
- [31] Malzahn, P., Thieme, H.: Windkanaluntersuchung von Quertriebsflächen mit Spantarealkurven-Profil IfS 56 SR 15 bei verschiedenen Seitenverhältnissen. IfS-Schrift Nr. 2049. Juni 1966
- [32] Wegner, U.: Grundlagen der Hebelarmbilanz für intakte Schiffe und Empfehlungen für Vorschriften zur Sicherung ausreichender Intaktstabilität. Bericht des Lehrstuhles und Inst. f. Entwerfen von Schiffen und Schiffstheorie an der Techn. Hochschule Hannover, Prof. Dr. Ing. K. Wendel. Dez. 1964.
- [33] Thieme, H.: Zur Behandlung von Ruderproblemen. Schiff und Hafen 1955, H.10, S. 605.
- [34] Thieme, H.: Berichterstattung zum Forschungsvorhaben "Luftkräfte an Schiffen" gefördert vom Forschungsrat der Freien und Hansestadt Hamburg. IfS-Schrift, Nr. 2012. Jan. 1964.
- [35] Wagner, B.: Schrägschleppversuche für einen Seglerrumpf mit und ohne Balkenkiel und für den MARINER. IfS-Bericht Nr. 186 (in Vorbereitung).

- [36] Wagner, B.: Windkanalversuche für ein 10 000tdw-Frachtschiff mit verschiedenen Aufbautenanordnungen und Beladungszuständen. IfS-Bericht Nr. 187 (in Vorbereitung).
- [37] Wagner, B.: Windkanalversuche mit Überwasserschiffsmodellen - Kümo 600 tdw, Frachtschiff 4500 tdw, Kühlschiff, Tanker 50 000tdw. IfS-Bericht Nr. 188 (in Vorbereitung).
- [38] Wagner, B.: Windkanalversuche mit Überwasserschiffsmodellen - Fährschiffe, Fahrgastschiff, Hecktrawler, Schlepper und Tragflächenboot. IfS-Bericht Nr. 189 (in Vorbereitung).

9. Übersicht über die verwendeten Symbole (Vergl. Abb.1, Abb.20)

- $F_T$  . . . . . resultierende Luftkraft (Horizontalkomponente).  
 $C$  . . . . . Luftkraftkomponente senkrecht zur Anströmrichtung  
(Querkraft, positiv in Anströmrichtung gesehen nach  
links).  
 $D$  . . . . . Luftkraftkomponente in Anströmrichtung (Widerstand,  
positiv in Anströmrichtung).  
 $X$  . . . . . Luftkraftkomponente in Schiffslängsrichtung (Längskraft,  
positiv nach vorn gerichtet).  
 $Y$  . . . . . Luftkraftkomponente senkrecht zur Schiffslängsrichtung  
(Seitenkraft, positiv nach Steuerbord gerichtet).  
 $N$  . . . . . Moment der Luftkraft um die Hochachse durch  $L_{OA}/2$   
(Giermoment, positiv rechtsdrehend).  
 $K$  . . . . . Moment der Luftkraft um die Längsachse in der Wasser-  
linienebene (Rollmoment, positiv rechtsdrehend).
- $c_C, c_D,$             { dimensionslose Beiwerte der Luftkraftkomponenten, be-  
 $c_X, c_Y, c_{FT}$         { zogen auf Lateralfläche  $A_L$ .  
 $c_{D(Ax)},$             { dimensionslose Beiwerte des Widerstandes bzw. der  
 $c_{X(Ax)}$                 { Längskraft, bezogen auf Lufthauptspantfläche  $A_X$ .  
 $c_N$  . . . . . Giermomentenbeiwert der Luftkraft.  
 $c_K$  . . . . . Rollmomentenbeiwert der Luftkraft.  
 $c_{Xoff}$  . . . . . Beiwert der effektiven Schiffswiderstandserhöhung bei  
Seitenwind.  
 $c_{XHY}$  . . . . . Beiwert der zusätzlichen Längskraft des Unterwasser-  
schiffes bei Schräganströmung.  
 $c_{YH}$  . . . . . Beiwert der Seitenkraft des Unterwasserschiffes bei  
Schräganströmung.  
 $c_{CH}$  . . . . . Gleitzahl der Kräfte am Unterwasserschiff.  
 $c_{NH}$  . . . . . Giermomentenbeiwert des Unterwasserschiffes bei  
Schräganströmung.  
 $c_{Nres}$  . . . . . Beiwert des resultierenden Giermomentes am Schiff.

- $x_F = \frac{N}{Y}$  . . . . . Druckpunktvorlage der Luftkraft, positiv nach vorn.
- $z_F = \frac{-K}{Y}$  . . . . . Druckpunkthochlage der Luftkraft, positiv nach unten.
- $V$  . . . . . Geschwindigkeit der Relativanströmung des Überwasserschiffes.
- $V_m$  . . . . . mittlere Geschwindigkeit der Relativanströmung des Überwasserschiffes über die Höhe  $H_{Lm}$ .
- $V_W$  . . . . . Geschwindigkeit des wahren Windes.
- $V_H$  . . . . . Geschwindigkeit der Relativanströmung des Unterwasserschiffes (Fahrtgeschwindigkeit).
- $P_V$  . . . . . Vorkammerdruck des Windkanals.
- $q = \frac{\rho}{2} \cdot V^2$  . . . . . Staudruck der Relativanströmung des Überwasserschiffes.
- $q_m = \frac{\rho}{2} \cdot V_m^2$  . . . . . mittlerer Staudruck der Relativanströmung des Überwasserschiffes. über die Höhe  $H_{Lm}$ .
- $R_n = V \cdot L_{OA} / \nu$  . . . . . Reynoldszahl.
- $\rho, \rho_H$  . . . . . Dichte von Luft bzw. Wasser unter Versuchsbedingungen.
- $\nu$  . . . . . kinematische Zähigkeit der Luft unter Versuchsbedingungen.
- $\epsilon$  . . . . . Anströmwinkel des Überwasserschiffes in bezug auf Schiffslängsrichtung.
- $L_{OA}, L_{WL}, L_{pp}$  . . . . .  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Länge über alles, Länge in der Wasserlinie, Länge} \\ \text{zwischen den Loten.} \end{array} \right.$
- $B$  . . . . . Breite.
- $H$  . . . . . Höhe **Höhe (allgemein)**
- $H_{Lm}, H_{Xm}$  . . . . . mittlere Höhe des Überwasserlateralplans bzw. des Lufthauptspantes.
- $T$  . . . . . Tiefgang.
- $A_S$  . . . . . Strahlquerschnitts des Windkanals.
- $A_L$  . . . . . Überwasserlateralfläche ( $A_{L0}$  = Lateralfläche ohne reine Widerstandskörper).
- $A_X$  . . . . . Lufthauptspantfläche
- $A_{LR}, A_{XR}$  . . . . . Flächenanteil des Rumpfes an Überwasserlateralfläche bzw. Lufthauptspant
- $x_L, z_L$  . . . . . Koordinaten des Lateralschwerpunktes des Überwasserschiffes
- $2A_L / L_{OA}^2$  . . . . . Höhen-Längen-Verhältnis des Überwasserschiffes

10. Anhang

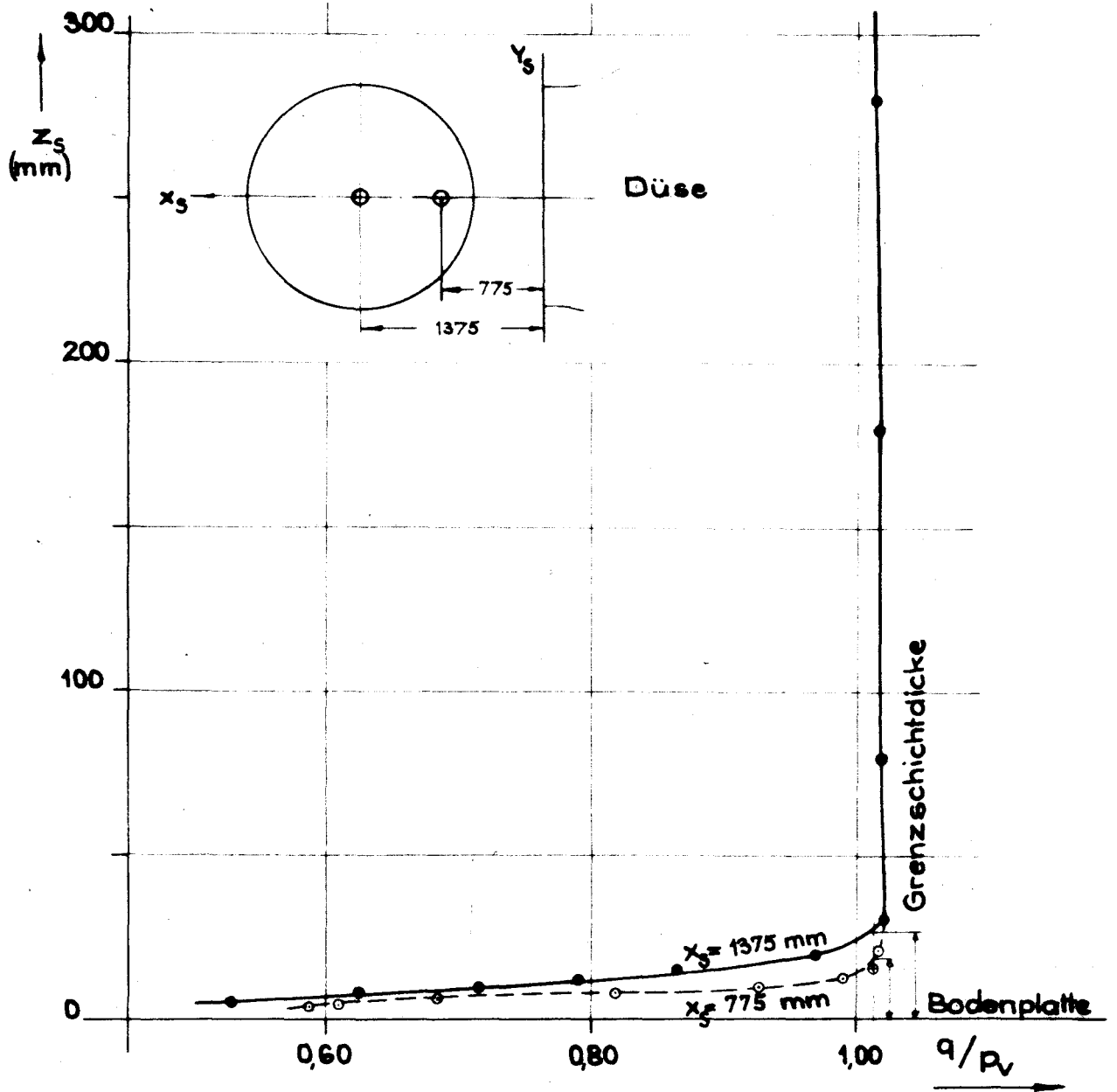
Die folgenden Tabellen geben in der Form dimensionsloser  
Beiwerte Beispiele für die erhaltenen Versuchsergebnisse.

Übersicht über Modelldaten und Versuchsprogramm

(Abmessungen in m bzw. m<sup>2</sup>)

Modell	Maßstab	Variante	L <sub>OA</sub>	B	T	A <sub>L</sub>	$\frac{A_L}{A_X}$	$\frac{2A_L}{L_{OA}}$	$\frac{L_{OA}}{B}$	H <sub>Lm</sub>	Abb.	Gemessene Komponenten Schiff Rumpf	
Kiemo, (600 tdw) beladen Ballast*	1:50	-	1,000	0,167	0,070	0,0713	2,97	0,143	5,98	0,071	-	3	
			"	"	0,042	0,0962	3,35	0,192	"	0,096	2	3	
Frachtschiff, (4500 tdw) beladen Ballast*	1:88	1	1,293	0,169	0,073	0,1050	3,83	0,126	7,65	0,081	3a	3	
		1	"	"	0,044	0,139	4,30	0,167	"	0,108	-	3	
		2	"	"	0,073	0,1044	3,71	0,125	"	0,081	3b	3	
		2	"	"	0,044	0,1385	4,18	0,166	"	0,107	-	3	
Frachtschiff, (10000 tdw) beladen Ballast**	1:125	1	1,287	0,160	0,066	0,092	3,96	0,111	8,03	0,072	4,5a	3	
		1	"	"	0,039	0,123	4,48	0,149	"	0,096	-	3	
		2	"	"	0,066	0,092	3,96	0,111	"	0,072	5b	3	
		2	"	"	0,039	0,123	4,48	0,149	"	0,096	-	3	
		3	"	"	0,066	0,094	3,96	0,113	"	0,073	5c	3	
		3	"	"	0,039	0,125	4,48	0,151	"	0,097	-	3	
		4	"	"	0,066	0,094	3,92	0,113	"	0,073	5d	3	
		4	"	"	0,039	0,125	4,43	0,151	"	0,097	-	3	
		5	"	"	0,066	0,083	3,60	0,100	"	0,065	5e	3	
		5	"	"	0,039	0,114	4,18	0,138	"	0,089	-	3	
		6	"	"	0,066	0,087	4,40	0,105	"	0,068	5f	3	
		6	"	"	0,039	0,118	4,91	0,143	"	0,092	-	3	
7	"	"	0,066	0,087	4,50	0,105	"	0,068	5g	3			
7	"	"	0,039	0,119	5,01	0,143	"	0,092	-	3			
8	"	"	0,066	0,087	4,57	0,105	"	0,068	5h	3			
8	"	"	0,039	0,119	5,07	0,143	"	0,092	-	3			





Staudruck profil über Bodenplatte.  
Strahlmitte  $y_s = 0$ .

**Tab. 17: Forschungsschiff 'Meteor' (Steuerbord-Anströmung)**

$$\begin{aligned}
 A_L &= 0.1184 \text{ m}^2 & L_{OA} &= 1.093 \text{ m} \\
 2A_L/L_{OA}^2 &= 0.1982 & L_{OA}/B &= 6.07 & A_L/A_X &= 3.44 \\
 R_H &= 1.84 \cdot 10^6 & q/q_H &= 1.056
 \end{aligned}$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$	$c_K$
0	-0.017	0.231	-0.231	-0.017	0.232	-0.0065	—
10	-0.069	0.250	-0.234	-0.111	0.259	-0.0430	-0.083
20	-0.162	0.332	-0.257	-0.266	0.370	-0.0716	-0.157
30	-0.266	0.428	-0.237	-0.444	0.503	-0.0922	-0.245
40	-0.301	0.550	-0.228	-0.584	0.627	-0.0972	-0.348
45	-0.330	0.611	-0.199	-0.666	0.695	-0.1046	-0.390
50	-0.336	0.679	-0.180	-0.736	0.758	-0.1093	-0.439
60	-0.282	0.760	-0.136	-0.799	0.811	-0.1074	-0.468
70	-0.203	0.776	-0.075	-0.798	0.802	-0.0849	-0.513
80	-0.136	0.801	-0.005	-0.812	0.812	-0.0642	-0.498
90	-0.041	0.805	0.041	-0.805	0.806	-0.0222	-0.502
100	0.069	0.801	0.071	-0.801	0.804	0.0003	-0.495
110	0.153	0.789	0.126	-0.794	0.804	0.0062	-0.491
120	0.270	0.763	0.148	-0.796	0.809	0.0167	-0.456
130	0.334	0.722	0.208	-0.768	0.796	0.0266	-0.438
135	0.338	0.644	0.217	-0.694	0.727	0.0273	-0.432
140	0.332	0.588	0.237	-0.633	0.676	0.0309	-0.412
150	0.296	0.481	0.268	-0.497	0.565	0.0308	-0.374
160	0.201	0.377	0.286	-0.318	0.427	0.0252	-0.277
170	0.098	0.306	0.285	-0.150	0.322	0.0128	-0.178
180	0.005	0.226	0.226	-0.005	0.226	0.0020	—

**Tab. 15: Tragflächenboot Supramar PT50, auf Tragflächen**

$$A_L = 0.2920 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.3950 \text{ m}$$

$$A_L/L_{OA}^2 = 0.1500 \quad L_{OA}/B = 4.81 \quad A_L/A_X = 4.02$$

$$R_n = 1.91 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.000$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$
0	0.000	0.108	-0.108	0.000	0.108	0.
10	0.131	0.134	-0.110	0.152	0.188	0.0294
20	0.267	0.217	-0.113	0.325	0.344	0.0534
30	0.385	0.360	-0.119	0.514	0.527	0.0664
40	0.521	0.551	-0.087	0.753	0.758	0.0738
45	0.571	0.653	-0.058	0.866	0.867	0.0778
50	0.594	0.777	-0.045	0.978	0.978	0.0770
60	0.432	0.825	-0.039	0.931	0.932	0.0621
70	0.283	0.911	-0.046	0.953	0.954	0.0322
80	0.148	0.960	-0.021	0.971	0.971	0.0161
90	-0.041	0.942	-0.041	0.942	0.943	-0.0045
100	-0.167	0.853	-0.016	0.869	0.869	-0.0260
110	-0.316	0.770	-0.034	0.832	0.833	-0.0617
120	-0.393	0.688	0.004	0.792	0.792	-0.0816
130	-0.454	0.596	0.036	0.748	0.749	-0.1019
135	-0.476	0.564	0.062	0.736	0.738	-0.1032
140	-0.488	0.515	0.081	0.705	0.710	-0.0955
150	-0.439	0.377	0.107	0.569	0.579	-0.0759
160	-0.293	0.233	0.118	0.355	0.374	-0.0604
170	-0.125	0.144	0.121	0.148	0.191	-0.0331
180	0.000	0.112	0.112	0.000	0.112	0.

**Tab. 16: Hecktrawler 940 BRT**

$$A_L = 0.1284 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.2740 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.1583 \quad L_{OA}/B = 6.81 \quad A_L/A_X = 4.11$$

$$R_n = 2.40 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.060$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$	$c_K$
0	0.000	0.171	-0.171	0.000	0.171	0.	—
10	0.102	0.163	-0.143	0.129	0.193	0.0376	0.136
20	0.241	0.261	-0.163	0.315	0.355	0.0606	0.248
30	0.322	0.382	-0.170	0.470	0.500	0.0701	0.399
40	0.395	0.548	-0.166	0.655	0.676	0.0672	0.504
45	0.410	0.608	-0.140	0.720	0.734	0.0640	0.582
50	0.398	0.661	-0.120	0.762	0.772	0.0639	0.631
60	0.322	0.726	-0.084	0.790	0.794	0.0480	0.724
70	0.242	0.757	-0.031	0.794	0.795	0.0391	0.783
80	0.133	0.789	-0.006	0.800	0.800	0.0233	0.781
90	-0.008	0.826	-0.008	0.826	0.826	-0.0069	0.774
100	-0.170	0.830	-0.023	0.846	0.847	-0.0342	0.777
110	-0.287	0.823	0.012	0.872	0.872	-0.0762	0.739
120	-0.406	0.760	0.029	0.861	0.862	-0.1067	0.738
130	-0.428	0.659	0.096	0.780	0.786	-0.1170	0.731
135	-0.402	0.595	0.136	0.705	0.718	-0.1097	0.709
140	-0.387	0.547	0.170	0.648	0.670	-0.1014	0.672
150	-0.358	0.432	0.195	0.526	0.561	-0.0808	0.619
160	-0.231	0.302	0.205	0.320	0.380	-0.0644	0.478
170	-0.075	0.204	0.188	0.109	0.218	-0.0300	0.252
180	0.000	0.180	0.180	0.000	0.180	0.	—

**Tab. 13: Seeschlepper 'Atlas' (Bb-Anströmung)**

$$A_L = 0.0886 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 0.8480 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.2464 \quad L_{OA}/B = 4.08 \quad A_L/A_X = 2.65$$

$$R_n = 1.63 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.058$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$
0	-0.045	0.246	-0.246	-0.045	0.250	-0.0113
10	0.060	0.254	-0.239	0.103	0.261	+0.0315
20	0.186	0.332	-0.248	0.288	0.380	+0.0760
30	0.278	0.441	-0.243	0.462	0.522	+0.1148
40	0.354	0.592	-0.226	0.652	0.690	+0.1492
45	0.365	0.656	-0.205	0.722	0.751	+0.1588
50	0.372	0.709	-0.170	0.782	0.800	+0.1604
60	0.327	0.791	-0.112	0.849	0.856	+0.1454
70	0.270	0.870	-0.043	0.910	0.911	+0.1263
80	0.192	0.905	0.032	0.925	0.925	+0.1148
90	0.101	0.878	0.101	0.878	0.884	+0.0986
100	-0.022	0.815	0.119	0.806	0.815	+0.0612
110	-0.146	0.779	0.129	0.782	0.793	+0.0470
120	-0.231	0.758	0.178	0.772	0.792	+0.0378
130	-0.321	0.658	0.177	0.710	0.732	+0.0199
135	-0.332	0.596	0.186	0.656	0.682	+0.0073
140	-0.372	0.535	0.171	0.629	0.652	+0.0047
150	-0.398	0.445	0.186	0.567	0.597	-0.0052
160	-0.305	0.358	0.232	0.409	0.470	-0.0081
170	-0.170	0.304	0.270	0.220	0.348	-0.0087
180	-0.051	0.282	0.282	0.051	0.286	-0.0010

**Tab. 14: Tragflächenboot Supramar PT50, auf CWL**

$$A_L = 0.2255 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.3950 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.2318 \quad L_{OA}/B = 4.81 \quad A_L/A_X = 3.72$$

$$R_n = 2.40 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.035$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$
0	0.000	0.100	-0.100	0.000	0.100	0.
10	0.086	0.115	-0.099	0.104	0.144	0.0345
20	0.204	0.178	-0.098	0.253	0.271	0.0660
30	0.329	0.314	-0.108	0.442	0.455	0.0835
40	0.458	0.501	-0.089	0.673	0.679	0.0977
45	0.514	0.593	-0.056	0.783	0.785	0.1054
50	0.546	0.731	-0.052	0.911	0.912	0.1244
60	0.473	0.808	0.005	0.937	0.937	0.0962
70	0.267	0.778	-0.015	0.822	0.822	0.0752
80	0.136	0.760	0.001	0.772	0.772	0.0378
90	-0.002	0.755	-0.002	0.755	0.755	0.0013
100	-0.188	0.722	-0.060	0.744	0.746	-0.0327
110	-0.304	0.704	-0.045	0.765	0.766	-0.0642
120	-0.394	0.657	-0.013	0.766	0.766	-0.0944
130	-0.461	0.583	0.021	0.743	0.743	-0.1082
135	-0.448	0.524	0.053	0.687	0.689	-0.1045
140	-0.429	0.470	0.084	0.631	0.637	-0.1004
150	-0.366	0.356	0.126	0.495	0.510	-0.0756
160	-0.240	0.235	0.139	0.306	0.336	-0.0524
170	-0.103	0.153	0.132	0.128	0.184	-0.0251
180	0.000	0.111	0.111	0.000	0.111	0.

**Tab. 11: Fährschiff 'Kronprinz Harald', 7000 BRT**

$$A_L = 0.1769 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.3210 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.2028 \quad L_{OA}/B = 7.70 \quad A_L/A_X = 5.76$$

$$R_n = 2.50 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.044$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$	$c_K$
0	0.000	0.045	-0.045	0.000	0.045	0.	—
10	0.114	0.077	-0.056	0.126	0.138	0.0385	<b>0.127</b>
20	0.278	0.154	-0.050	0.314	0.318	0.0738	<b>0.268</b>
30	0.423	0.299	-0.047	0.516	0.518	0.1073	<b>0.434</b>
40	0.544	0.492	-0.028	0.733	0.734	0.1418	<b>0.565</b>
45	0.575	0.592	-0.012	0.825	0.825	0.1552	<b>0.623</b>
50	0.575	0.666	0.012	0.880	0.880	0.1570	<b>0.665</b>
60	0.457	0.752	0.020	0.879	0.879	0.1362	<b>0.683</b>
70	0.298	0.766	0.018	0.821	0.821	0.0945	<b>0.711</b>
80	0.144	0.818	0.000	0.830	0.830	0.0620	<b>0.708</b>
90	-0.006	0.810	-0.006	0.810	0.810	0.0272	<b>0.715</b>
100	-0.161	0.801	-0.019	0.817	0.817	-0.0057	<b>0.714</b>
110	-0.290	0.752	-0.015	0.805	0.806	-0.0341	<b>0.722</b>
120	-0.454	0.744	-0.021	0.871	0.872	-0.0702	<b>0.728</b>
130	-0.552	0.644	-0.009	0.848	0.848	-0.0862	<b>0.723</b>
135	-0.576	0.572	-0.003	0.812	0.812	-0.0861	<b>0.710</b>
140	-0.562	0.489	0.013	0.744	0.745	-0.0818	<b>0.690</b>
150	-0.433	0.301	0.044	0.526	0.527	-0.0649	<b>0.570</b>
160	-0.266	0.172	0.071	0.309	0.317	-0.0441	<b>0.436</b>
170	-0.110	0.092	0.072	0.125	0.144	-0.0220	<b>0.258</b>
180	0.000	0.063	0.063	0.000	0.063	0.	—

**Tab. 12: Fahrgastschiff**

$$A_L = 0.1646 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.3210 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.1887 \quad L_{OA}/B = 7.70 \quad A_L/A_X = 5.69$$

$$R_n = 2.50 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.046$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$	$c_K$
0	0.000	0.055	-0.055	0.000	0.055	0.	—
10	0.131	0.078	-0.054	0.143	0.153	0.0389	<b>0.134</b>
20	0.286	0.158	-0.050	0.323	0.327	0.0717	<b>0.290</b>
30	0.411	0.310	-0.063	0.511	0.515	0.1077	<b>0.451</b>
40	0.529	0.491	-0.036	0.721	0.722	0.1343	<b>0.561</b>
45	0.546	0.568	-0.016	0.787	0.787	0.1396	<b>0.637</b>
50	0.539	0.640	0.002	0.837	0.837	0.1401	<b>0.671</b>
60	0.431	0.724	0.011	0.842	0.842	0.1184	<b>0.714</b>
70	0.286	0.753	0.011	0.806	0.806	0.0874	<b>0.731</b>
80	0.132	0.817	-0.012	0.828	0.828	0.0573	<b>0.750</b>
90	-0.001	0.819	-0.001	0.819	0.819	0.0255	<b>0.756</b>
100	-0.147	0.797	-0.007	0.810	0.810	-0.0059	<b>0.760</b>
110	-0.266	0.714	-0.006	0.762	0.762	-0.0359	<b>0.764</b>
120	-0.422	0.706	-0.012	0.822	0.822	-0.0610	<b>0.759</b>
130	-0.519	0.613	-0.003	0.804	0.804	-0.0788	<b>0.743</b>
135	-0.547	0.563	0.011	0.785	0.785	-0.0812	<b>0.718</b>
140	-0.558	0.485	0.013	0.740	0.740	-0.0738	<b>0.700</b>
150	-0.440	0.296	0.036	0.529	0.530	-0.0611	<b>0.595</b>
160	-0.280	0.153	0.048	0.315	0.319	-0.0439	<b>0.466</b>
170	-0.117	0.084	0.062	0.130	0.144	-0.0231	<b>0.258</b>
180	0.000	0.063	0.063	0.000	0.063	0.	—

**Tab. 9: Tanker 50 000 tdw, Aufb. hinten, beladen**

$$A_L = 0.0560 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.2200 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.0752 \quad L_{OA}/B = 7.24 \quad A_L/A_X = 3.37$$

$$R_N = 2.29 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.152$$

$c^{\circ}$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{PT}$	$c_N$
0	0.000	0.267	-0.267	0.000	0.267	0.
10	0.083	0.228	-0.210	0.121	0.243	0.0202
20	0.110	0.288	-0.233	0.202	0.308	0.0338
30	0.156	0.370	-0.242	0.320	0.401	0.0257
40	0.193	0.456	-0.226	0.441	0.495	0.0165
45	0.203	0.497	-0.208	0.495	0.537	0.0091
50	0.209	0.536	-0.185	0.545	0.575	0.0007
60	0.202	0.608	-0.130	0.628	0.641	-0.0130
70	0.157	0.651	-0.075	0.665	0.670	-0.0170
80	0.092	0.674	-0.026	0.680	0.680	-0.0223
90	-0.021	0.669	-0.021	0.669	0.669	-0.0366
100	-0.120	0.660	-0.004	0.671	0.671	-0.0486
110	-0.182	0.651	0.052	0.674	0.676	-0.0651
120	-0.264	0.644	0.094	0.689	0.696	-0.1000
130	-0.302	0.577	0.139	0.636	0.651	-0.1115
135	-0.294	0.541	0.175	0.590	0.616	-0.1139
140	-0.278	0.490	0.197	0.528	0.563	-0.1088
150	-0.226	0.380	0.216	0.386	0.443	-0.0944
160	-0.134	0.292	0.228	0.226	0.321	-0.0666
170	-0.027	0.248	0.239	0.069	0.249	-0.0331
180	0.000	0.232	0.232	0.000	0.232	0.

**Tab. 10: Tanker 50 000 tdw, Aufb. hinten, Ballast**

$$A_L = 0.0841 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.2200 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.1129 \quad L_{OA}/B = 7.24 \quad A_L/A_X = 4.06$$

$$R_N = 2.30 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.096$$

$c^{\circ}$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{PT}$	$c_N$
0	0.000	0.186	-0.186	0.000	0.186	0.
10	0.091	0.157	-0.139	0.117	0.181	0.0266
20	0.174	0.234	-0.161	0.244	0.292	0.0403
30	0.238	0.306	-0.146	0.359	0.388	0.0444
40	0.277	0.425	-0.148	0.485	0.507	0.0388
45	0.282	0.479	-0.140	0.538	0.556	0.0377
50	0.280	0.516	-0.117	0.575	0.587	0.0300
60	0.254	0.601	-0.080	0.648	0.652	0.0204
70	0.204	0.648	-0.030	0.679	0.679	0.0150
80	0.115	0.687	-0.006	0.696	0.696	0.0116
90	-0.049	0.730	-0.049	0.730	0.732	-0.0208
100	-0.155	0.699	-0.032	0.715	0.716	-0.0479
110	-0.226	0.657	0.012	0.695	0.695	-0.0722
120	-0.266	0.598	0.069	0.651	0.655	-0.0945
130	-0.289	0.516	0.111	0.581	0.591	-0.0994
135	-0.290	0.470	0.127	0.537	0.552	-0.1005
140	-0.289	0.419	0.136	0.491	0.509	-0.1016
150	-0.264	0.312	0.138	0.385	0.409	-0.0929
160	-0.167	0.216	0.145	0.231	0.273	-0.0660
170	-0.053	0.159	0.147	0.080	0.168	-0.0330
180	0.000	0.147	0.147	0.000	0.147	0.

**Tab. 7: Tanker 50 000 tdw, mit Brücke, beladen**

$$\begin{aligned}
 A_L &= 0.0560 \text{ m}^2 & L_{OA} &= 1.2200 \text{ m} \\
 2A_L/L_{OA}^2 &= 0.0752 & L_{OA}/B &= 7.24 & A_L/A_X &= 3.98 \\
 R_n &= 2.29 \cdot 10^6 & q/q_n &= 1.152
 \end{aligned}$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{PT}$	$c_N$
0	0.000	0.228	-0.228	0.000	0.228	0.
10	0.076	0.248	-0.231	0.118	0.259	0.0258
20	0.147	0.318	-0.249	0.247	0.351	0.0307
30	0.173	0.416	-0.273	0.358	0.450	0.0369
40	0.202	0.515	-0.265	0.485	0.553	0.0289
45	0.212	0.570	-0.253	0.553	0.608	0.0282
50	0.205	0.603	-0.231	0.594	0.637	0.0252
60	0.180	0.663	-0.175	0.665	0.687	0.0235
70	0.136	0.690	-0.108	0.695	0.703	0.0116
80	0.081	0.669	-0.036	0.673	0.674	-0.0016
90	0.018	0.626	0.018	0.626	0.626	-0.0150
100	-0.076	0.605	0.030	0.609	0.610	-0.0283
110	-0.166	0.614	0.054	0.634	0.636	-0.0424
120	-0.251	0.601	0.083	0.646	0.652	-0.0654
130	-0.271	0.552	0.147	0.597	0.615	-0.0658
135	-0.258	0.513	0.180	0.545	0.574	-0.0748
140	-0.230	0.476	0.217	0.482	0.529	-0.0762
150	-0.188	0.387	0.242	0.356	0.430	-0.0659
160	-0.131	0.283	0.221	0.220	0.312	-0.0547
170	-0.041	0.241	0.230	0.082	0.244	-0.0288
180	0.000	0.212	0.212	0.000	0.212	0.

**Tab. 8: Tanker 50 000 tdw, mit Brücke, Ballast**

$$\begin{aligned}
 A_L &= 0.0840 \text{ m}^2 & L_{OA} &= 1.2200 \text{ m} \\
 2A_L/L_{OA}^2 &= 0.1129 & L_{OA}/B &= 7.24 & A_L/A_X &= 4.63 \\
 R_n &= 2.30 \cdot 10^6 & q/q_n &= 1.096
 \end{aligned}$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{PT}$	$c_N$
0	0.000	0.152	-0.152	0.000	0.152	0.
10	0.104	0.163	-0.142	0.130	0.193	0.0288
20	0.187	0.233	-0.155	0.256	0.299	0.0439
30	0.243	0.337	-0.170	0.379	0.415	0.0592
40	0.273	0.449	-0.168	0.498	0.526	0.0593
45	0.276	0.502	-0.160	0.550	0.573	0.0662
50	0.269	0.548	-0.146	0.592	0.610	0.0644
60	0.252	0.627	-0.095	0.669	0.676	0.0570
70	0.212	0.674	-0.031	0.706	0.706	0.0428
80	0.125	0.693	0.003	0.704	0.704	0.0284
90	-0.016	0.686	-0.017	0.686	0.686	-0.0051
100	-0.143	0.660	-0.026	0.674	0.675	-0.0329
110	-0.221	0.633	0.008	0.670	0.670	-0.0513
120	-0.266	0.587	0.063	0.641	0.644	-0.0669
130	-0.291	0.510	0.105	0.578	0.587	-0.0711
135	-0.290	0.470	0.127	0.537	0.552	-0.0743
140	-0.280	0.418	0.140	0.484	0.504	-0.0747
150	-0.245	0.315	0.150	0.370	0.399	-0.0726
160	-0.163	0.214	0.145	0.226	0.269	-0.0602
170	-0.058	0.147	0.135	0.082	0.158	-0.0316
180	0.000	0.120	0.120	0.000	0.120	0.

**Tab. 5: Frachtschiff 10 000 tdw, Var.4 (Aufb. hinten), Ballast**

$$A_L = 0.1249 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.2870 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.1508 \quad L_{OA}/B = 8.03 \quad A_L/A_X = 4.43$$

$$R_B = 2.42 \cdot 10^6 \quad q/q_B = 1.067$$

$c^{\circ}$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$	$c_K$
0	0.000	0.124	-0.124	0.000	0.124	0.	0.075
10	0.090	0.147	-0.129	0.115	0.173	0.0316	0.221
20	0.206	0.254	-0.168	0.280	0.327	0.0426	0.387
30	0.317	0.384	-0.174	0.466	0.498	0.0491	0.483
40	0.388	0.525	-0.152	0.635	0.653	0.0575	0.575
45	0.386	0.598	-0.150	0.695	0.711	0.0626	0.619
50	0.367	0.653	-0.139	0.736	0.749	0.0621	0.681
60	0.295	0.708	-0.099	0.760	0.767	0.0648	0.696
70	0.212	0.769	-0.063	0.795	0.798	0.0397	0.705
80	0.105	0.800	-0.036	0.806	0.806	0.0283	0.725
90	0.000	0.838	-0.000	0.838	0.838	-0.0118	0.731
100	-0.126	0.825	0.019	0.834	0.835	-0.0522	0.773
110	-0.201	0.760	0.071	0.783	0.786	-0.0591	0.761
120	-0.285	0.677	0.092	0.728	0.734	-0.0787	0.696
130	-0.357	0.605	0.115	0.694	0.703	-0.0969	0.656
135	-0.365	0.542	0.126	0.641	0.653	-0.0964	0.614
140	-0.353	0.472	0.134	0.574	0.589	-0.0918	0.504
150	-0.285	0.334	0.147	0.414	0.440	-0.0802	0.368
160	-0.232	0.231	0.137	0.297	0.327	-0.0740	0.214
170	-0.082	0.139	0.123	0.105	0.162	-0.0398	
180	0.000	0.107	0.107	0.000	0.107	0.	

**Tab. 6: Frachtschiff 10 000 tdw, Var.7 (Aufb. hinten, Brücke mittschiffs), beladen**

$$A_L = 0.0872 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.2870 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.1053 \quad L_{OA}/B = 8.03 \quad A_L/A_X = 4.50$$

$$R_B = 2.46 \cdot 10^6 \quad q/q_B = 1.097$$

$c^{\circ}$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$
0	0.000	0.164	-0.164	0.000	0.164	0.
10	0.098	0.175	-0.155	0.127	0.200	0.0305
20	0.193	0.266	-0.184	0.272	0.328	0.0391
30	0.241	0.401	-0.227	0.409	0.468	0.0579
40	0.310	0.527	-0.204	0.576	0.611	0.0608
45	0.315	0.588	-0.194	0.638	0.667	0.0666
50	0.288	0.638	-0.189	0.674	0.700	0.0682
60	0.261	0.713	-0.130	0.748	0.759	0.0581
70	0.192	0.754	-0.078	0.774	0.778	0.0398
80	0.102	0.765	-0.032	0.771	0.772	0.0147
90	-0.016	0.759	-0.016	0.759	0.759	-0.0080
100	-0.118	0.727	0.010	0.736	0.736	-0.0401
110	-0.218	0.719	0.041	0.751	0.752	-0.0621
120	-0.286	0.646	0.075	0.703	0.707	-0.0719
130	-0.310	0.544	0.112	0.616	0.626	-0.0819
135	-0.320	0.513	0.136	0.589	0.605	-0.0761
140	-0.302	0.446	0.148	0.518	0.539	-0.0799
150	-0.253	0.334	0.162	0.386	0.419	-0.0734
160	-0.149	0.217	0.153	0.214	0.263	-0.0563
170	-0.052	0.126	0.115	0.073	0.136	-0.0330
180	0.000	0.120	0.120	0.000	0.120	0.

**Tab. 3: Frachtschiff 10 000 tdw, Var.1 (Aufb. mittschiffs), Ballast**

$$A_L = 0.1234 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.287 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.1490 \quad L_{OA}/B = 8.03 \quad A_L/A_X = 4.48$$

$$R_R = 2.47 \cdot 10^6 \quad q/q_R = 1.064$$

$\epsilon^\circ$	$c_G$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$	$c_K$
0	0.000	0.128	-0.128	0.000	0.128	0.	—
10	0.108	0.132	-0.112	0.129	0.171	0.0380	0.082
20	0.220	0.234	-0.145	0.287	0.321	0.0674	0.219
30	0.326	0.373	-0.160	0.469	0.495	0.0941	0.349
40	0.394	0.509	-0.137	0.629	0.644	0.1064	0.472
45	0.401	0.577	-0.124	0.692	0.703	0.1097	0.530
50	0.382	0.619	-0.106	0.720	0.728	0.1076	0.608
60	0.302	0.696	-0.087	0.754	0.759	0.0950	0.688
70	0.225	0.745	-0.044	0.777	0.778	0.0747	0.702
80	0.122	0.795	-0.018	0.804	0.804	0.0577	0.670
90	-0.029	0.823	-0.029	0.823	0.824	0.0180	0.683
100	-0.122	0.807	0.020	0.816	0.816	-0.0141	0.723
110	-0.244	0.788	0.040	0.824	0.825	-0.0349	0.756
120	-0.342	0.721	0.064	0.795	0.797	-0.0522	0.742
130	-0.408	0.630	0.092	0.745	0.751	-0.0618	0.695
135	-0.425	0.573	0.104	0.706	0.713	-0.0655	0.633
140	-0.416	0.503	0.118	0.642	0.653	-0.0608	0.593
150	-0.355	0.359	0.134	0.487	0.505	-0.0538	0.500
160	-0.238	0.229	0.133	0.302	0.330	-0.0421	0.351
170	-0.083	0.143	0.126	0.106	0.165	-0.0253	0.194
180	0.000	0.113	0.113	0.000	0.113	0.	—

**Tab. 4: Frachtschiff 10 000 tdw, Var.4 (Aufb. hinten), beladen**

$$A_L = 0.0936 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.287 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.1131 \quad L_{OA}/B = 8.03 \quad A_L/A_X = 3.92$$

$$R_R = 2.46 \cdot 10^6 \quad q/q_R = 1.090$$

$\epsilon^\circ$	$c_G$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$
0	0.000	0.156	-0.156	0.000	0.156	0.
10	0.082	0.168	-0.151	0.110	0.187	0.0241
20	0.183	0.281	-0.202	0.268	0.335	0.0341
30	0.260	0.385	-0.203	0.418	0.464	0.0386
40	0.309	0.514	-0.195	0.567	0.599	0.0358
45	0.318	0.569	-0.177	0.627	0.652	0.0386
50	0.310	0.634	-0.170	0.685	0.706	0.0354
60	0.273	0.723	-0.125	0.763	0.773	0.0273
70	0.201	0.751	-0.068	0.774	0.777	0.0090
80	0.110	0.756	-0.023	0.764	0.764	0.0034
90	-0.013	0.794	-0.013	0.794	0.794	-0.0309
100	-0.093	0.780	0.044	0.785	0.786	-0.0601
110	-0.153	0.758	0.115	0.765	0.773	-0.0720
120	-0.246	0.672	0.123	0.705	0.716	-0.0906
130	-0.287	0.573	0.149	0.623	0.641	-0.0987
135	-0.307	0.510	0.144	0.577	0.595	-0.1028
140	-0.324	0.465	0.148	0.547	0.567	-0.1106
150	-0.309	0.353	0.151	0.444	0.469	-0.0977
160	-0.211	0.240	0.153	0.281	0.320	-0.0756
170	-0.071	0.145	0.130	0.095	0.161	-0.0417
180	0.000	0.113	0.113	0.000	0.113	0.

**Tab. 1: Küstenmotorschiff 600 tdw, beladen**

$$A_L = 0.0713 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.000 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.1427 \quad L_{OA}/B = 5.98 \quad A_L/A_X = 2.97$$

$$R_n = 1.91 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.091$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$
0	0.000	0.333	-0.333	0.000	0.333	0.
10	0.140	0.289	-0.260	0.188	0.321	0.0298
20	0.178	0.371	-0.287	0.294	0.411	0.0546
30	0.243	0.477	-0.292	0.449	0.536	0.0482
40	0.230	0.582	-0.297	0.550	0.626	0.0397
45	0.230	0.641	-0.291	0.616	0.681	0.0288
50	0.226	0.669	-0.257	0.658	0.706	0.0207
60	0.218	0.730	-0.176	0.741	0.762	-0.0081
70	0.182	0.805	-0.104	0.819	0.825	-0.0178
80	0.101	0.862	-0.050	0.866	0.868	-0.0184
90	0.000	0.880	-0.000	0.880	0.880	-0.0360
100	-0.192	0.879	-0.036	0.899	0.899	-0.0642
110	-0.279	0.822	0.019	0.868	0.868	-0.0929
120	-0.343	0.765	0.085	0.834	0.838	-0.1238
130	-0.404	0.683	0.130	0.783	0.793	-0.1360
135	-0.403	0.622	0.155	0.724	0.741	-0.1386
140	-0.428	0.568	0.160	0.692	0.711	-0.1318
150	-0.426	0.426	0.156	0.582	0.603	-0.1373
160	-0.291	0.296	0.178	0.375	0.415	-0.1154
170	-0.124	0.223	0.199	0.160	0.255	-0.0617
180	0.000	0.203	0.203	0.000	0.203	0.

**Tab. 2: Frachtschiff 10 000 tdw, Var. 1 (Aufb. mittschiffs), beladen**

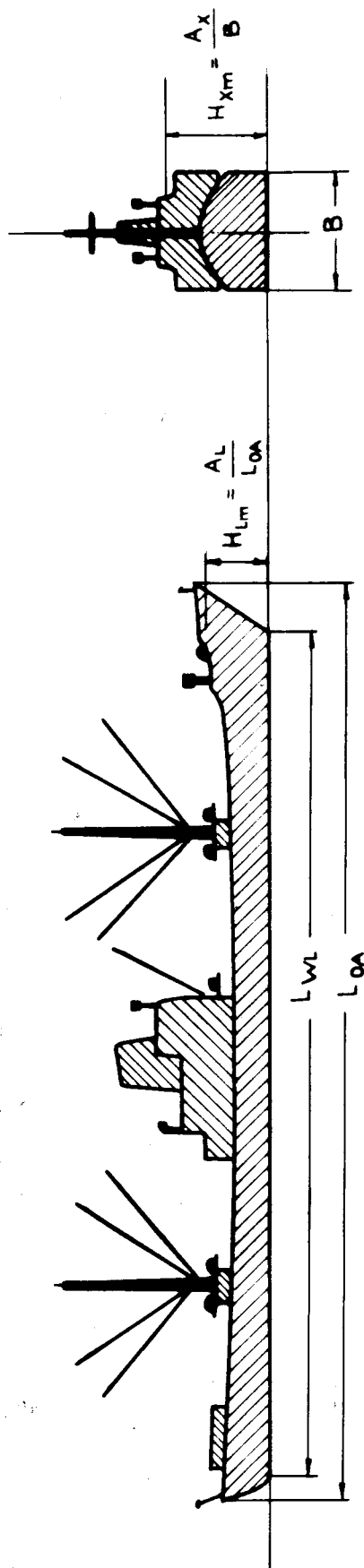
$$A_L = 0.0921 \text{ m}^2 \quad L_{OA} = 1.287 \text{ m}$$

$$2A_L/L_{OA}^2 = 0.1112 \quad L_{OA}/B = 8.03 \quad A_L/A_X = 3.96$$

$$R_n = 2.49 \cdot 10^6 \quad q/q_m = 1.090$$

$\epsilon^\circ$	$c_C$	$c_D$	$c_X$	$c_Y$	$c_{FT}$	$c_N$
0	0.000	0.164	-0.164	0.000	0.164	0.
10	0.107	0.160	-0.139	0.134	0.193	0.0382
20	0.174	0.267	-0.191	0.255	0.318	0.0610
30	0.260	0.404	-0.220	0.427	0.481	0.0795
40	0.331	0.542	-0.202	0.602	0.635	0.0931
45	0.337	0.606	-0.190	0.667	0.694	0.0973
50	0.329	0.661	-0.173	0.718	0.738	0.0983
60	0.289	0.738	-0.119	0.784	0.793	0.0938
70	0.212	0.772	-0.065	0.798	0.800	0.0746
80	0.129	0.773	-0.007	0.783	0.783	0.0589
90	0.002	0.791	0.002	0.791	0.791	0.0332
100	-0.086	0.770	0.049	0.773	0.774	0.0029
110	-0.200	0.743	0.066	0.766	0.769	-0.0143
120	-0.303	0.665	0.070	0.728	0.731	-0.0287
130	-0.336	0.567	0.107	0.651	0.660	-0.0438
135	-0.331	0.503	0.122	0.590	0.602	-0.0493
140	-0.322	0.446	0.134	0.534	0.550	-0.0440
150	-0.279	0.343	0.157	0.413	0.442	-0.0423
160	-0.179	0.228	0.153	0.247	0.290	-0.0361
170	-0.054	0.150	0.139	0.079	0.160	-0.0191
180	0.000	0.112	0.112	0.000	0.112	0.

Definitionsskizze : Hauptabmessungen und Bezugsflächen  
 von Modell bzw. Schiff

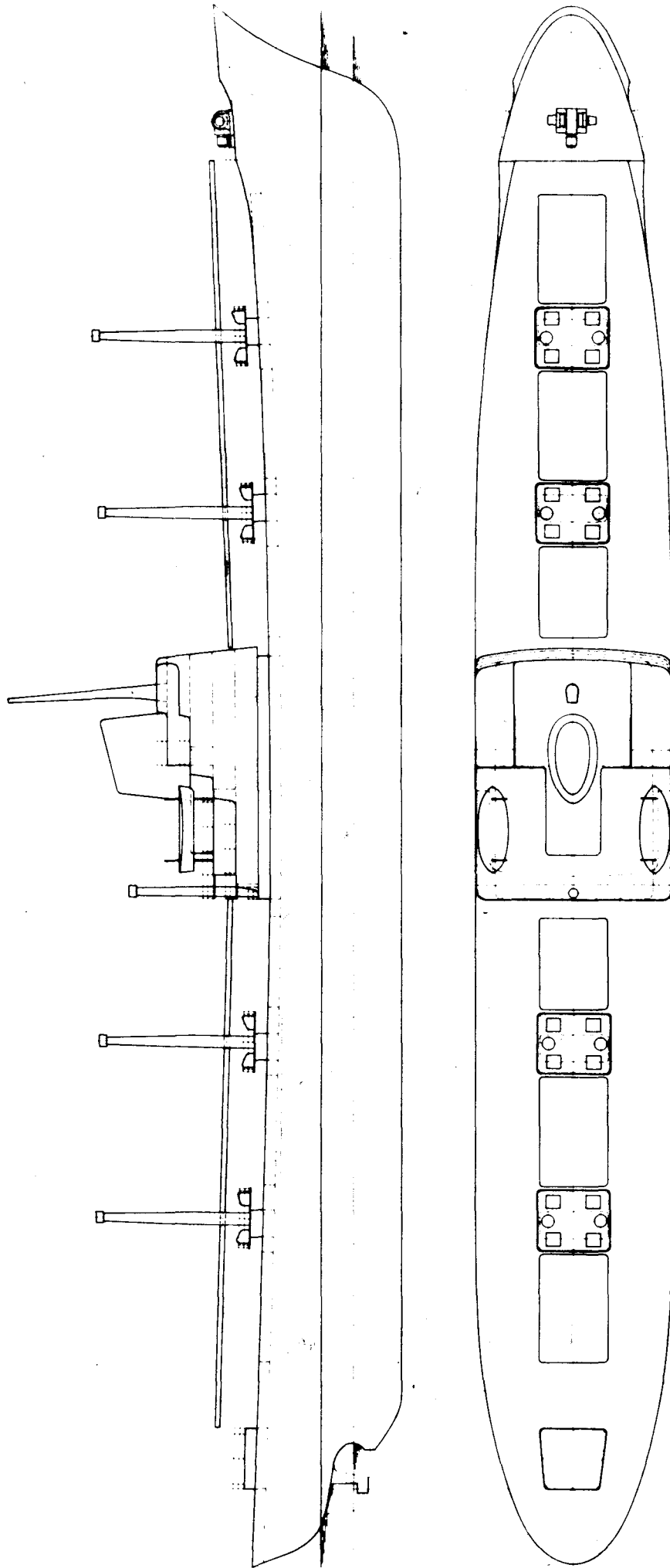


Überwasserlateralfäche  $A_L$

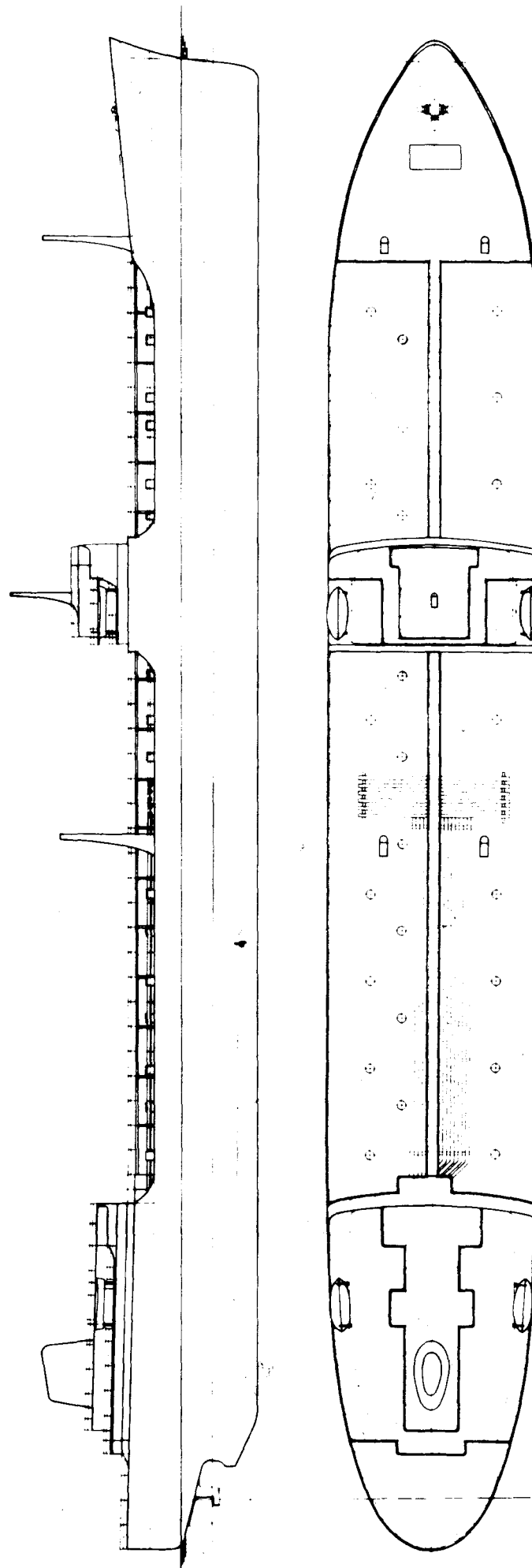
Lufthauptspartfläche  $A_x$

-  Teilflächen Rumpf und langgestreckte Körper
-  Teilflächen gedrungene Körper
-  Teilflächen Masten und reine Widerstandskörper

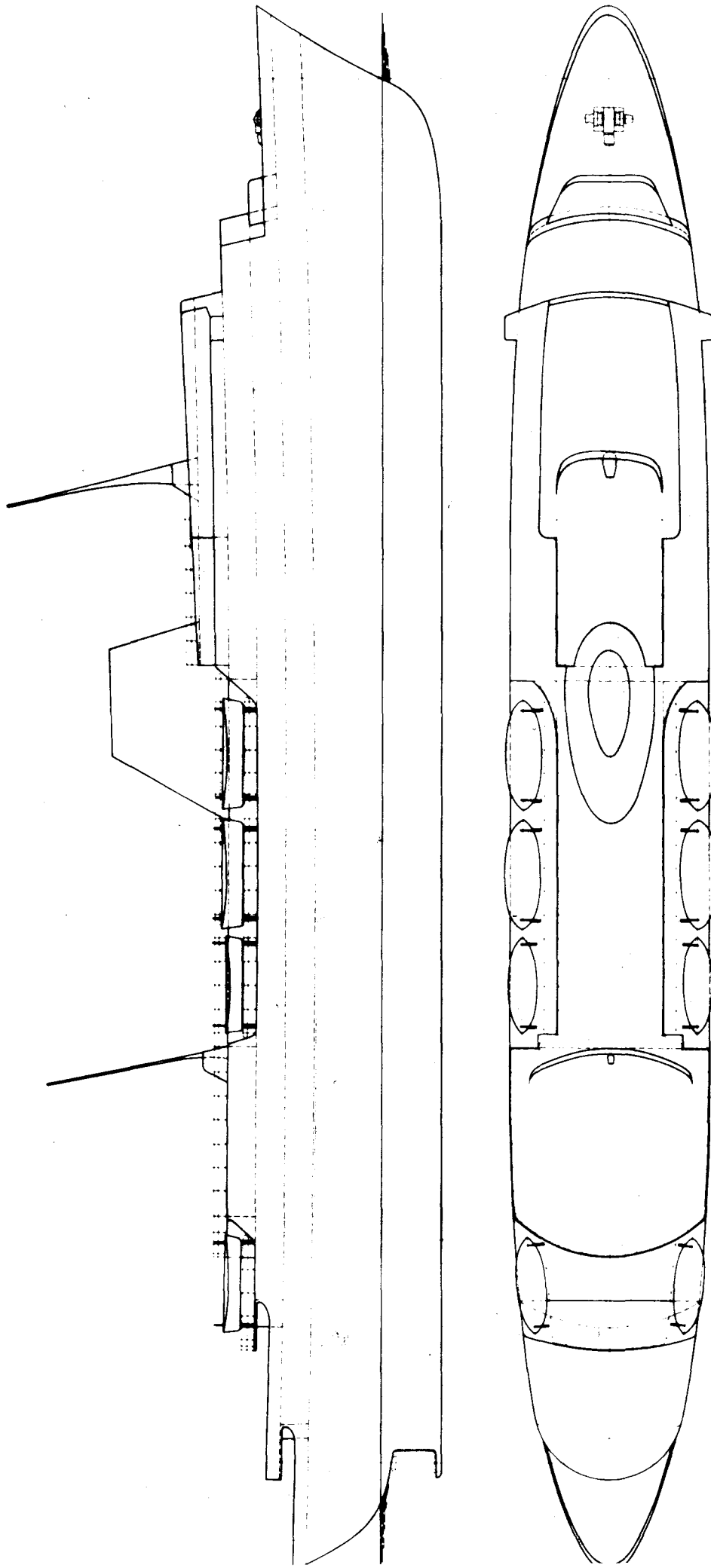
Abb. 1



Frochtschiff 10000 tdw, Variante 1 (Modellzeichnung)



Tanker 50000tdw, Variante 1 (Modellzeichnung)



Fährschiff 7000 BRT (Modellzeichnung)

Abb. 19

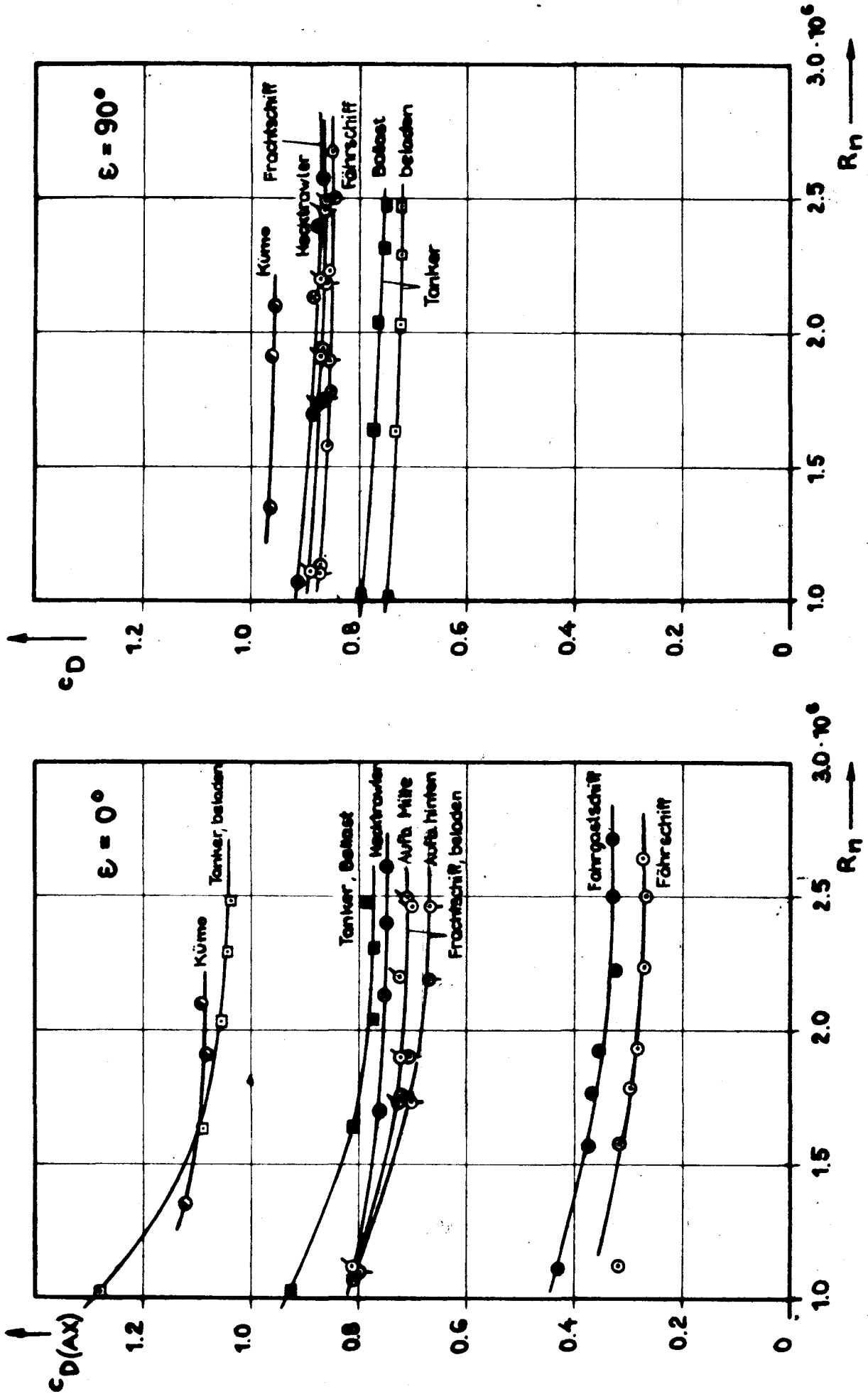
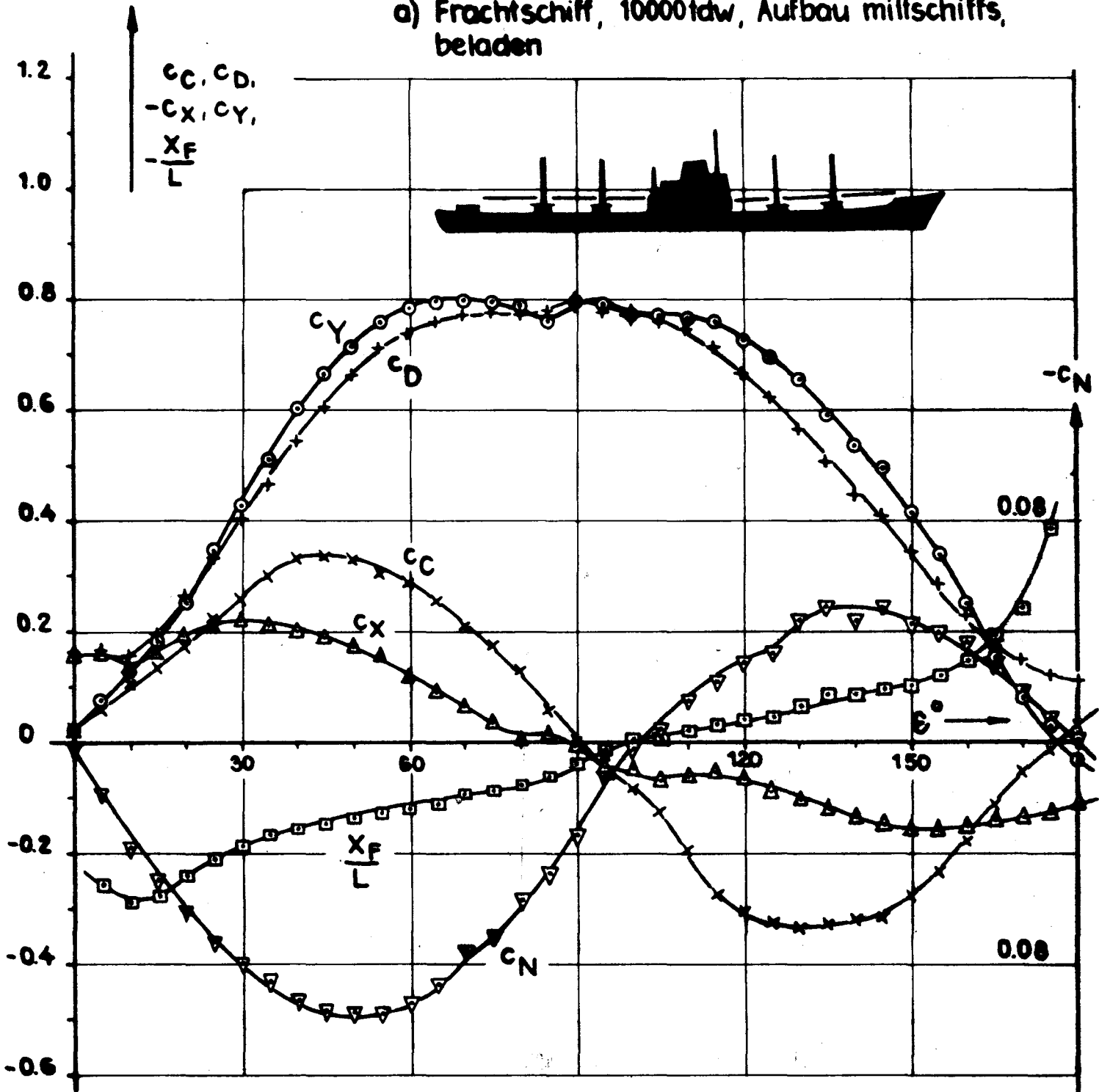


Abb. 18

Reynoldszahlabhängigkeit der Widerstandsbeiwerte  
(korrigiert für Anlaufgeschicht)

Beispiele für den Verlauf der Kraft- und Momentenbeiwerte

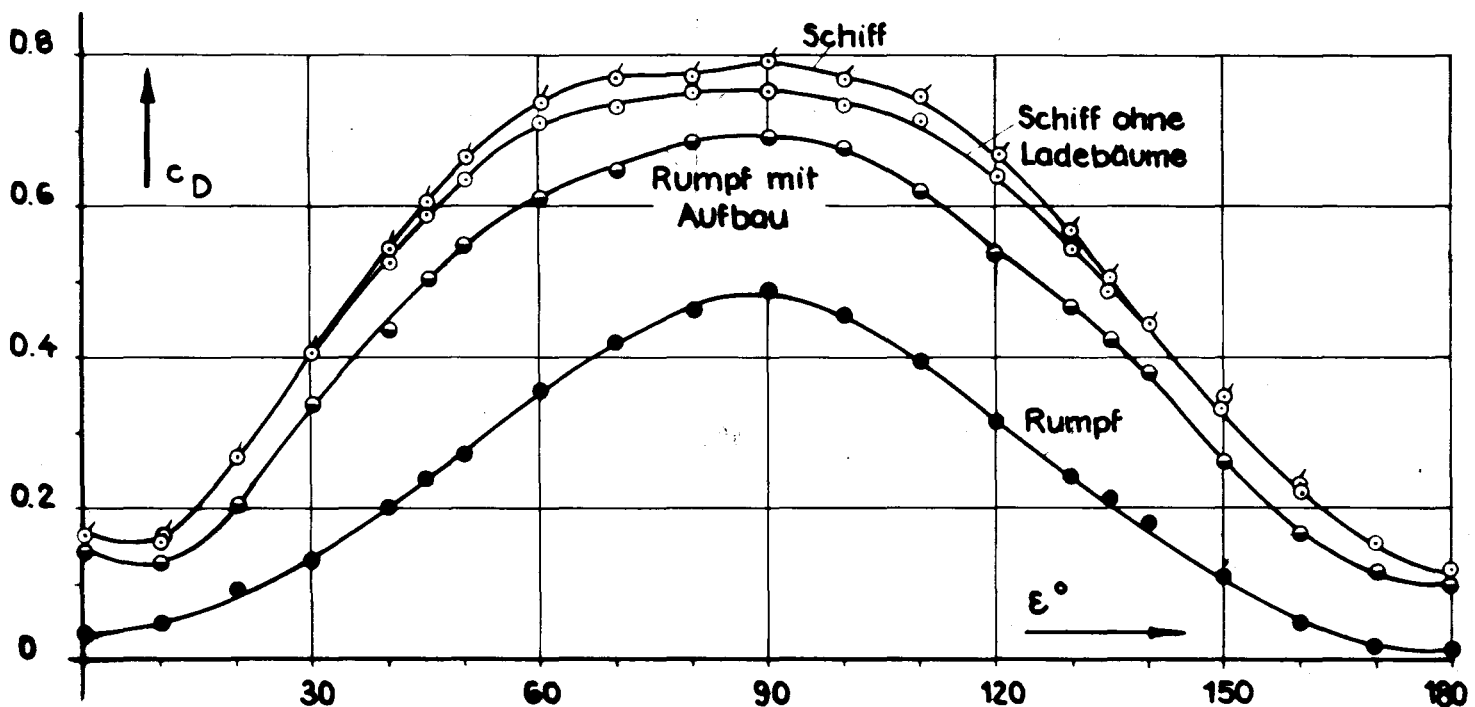
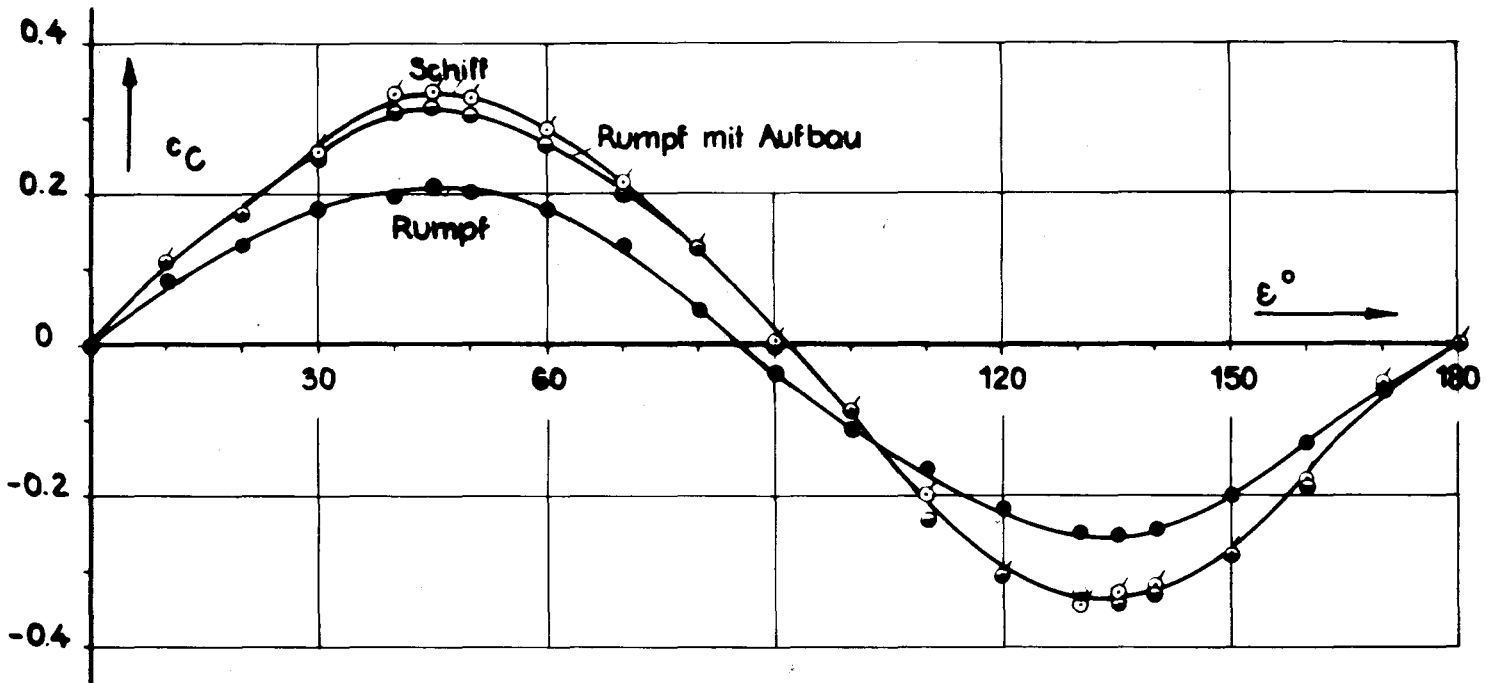
a) Frachtschiff, 10000tdw, Aufbau millschiffs, beladen





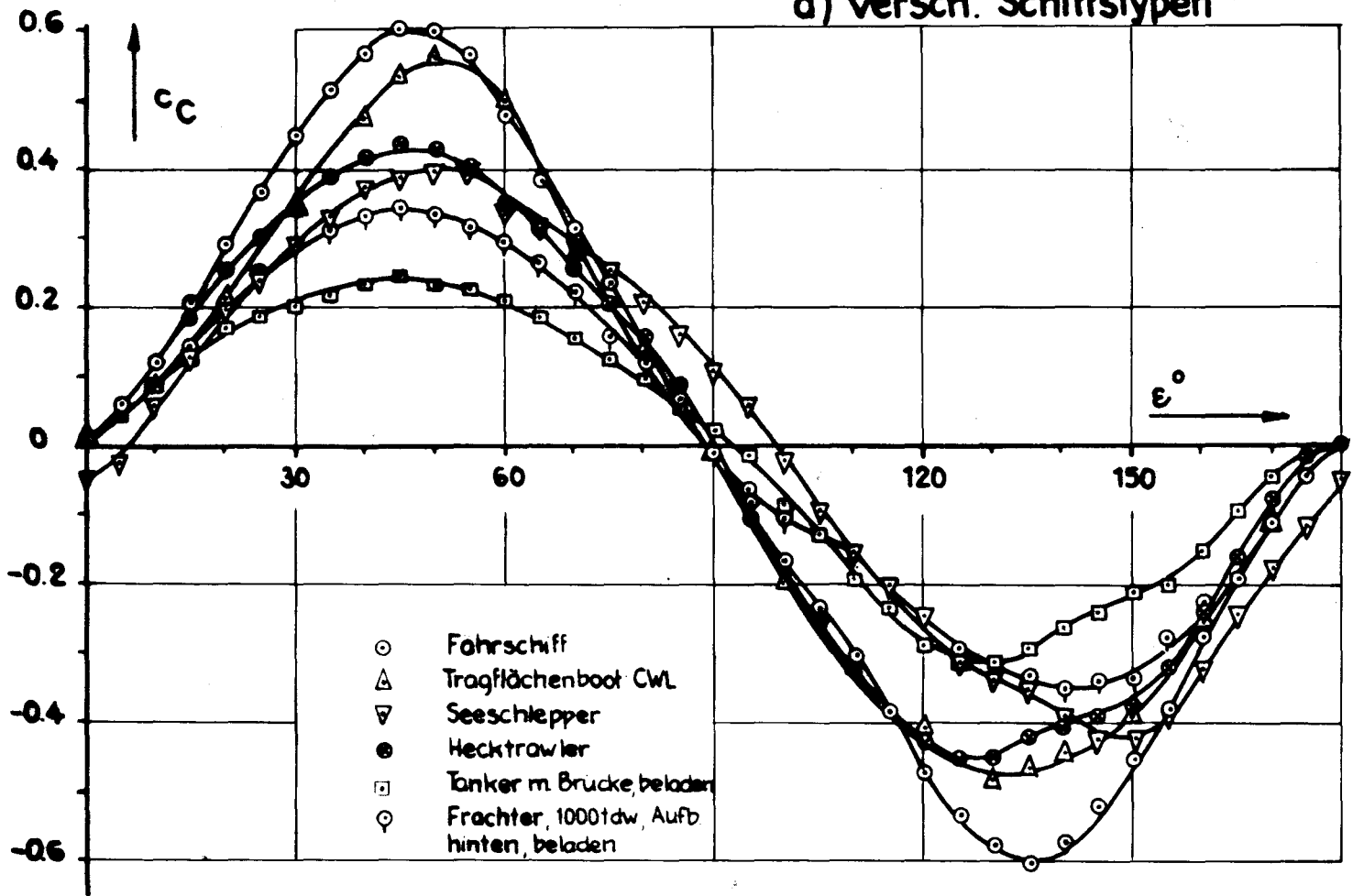
### Einfluß von Rumpf, Aufbau und Ladegerisrr auf die Querkraft und Widerstandsbeiwerte

(Frachtschiff 10000 taw, Aufbau mittschiffs, beladen, alle Beizahlen auf  $A_L$  des vollständigen Schiffes bezogen.)

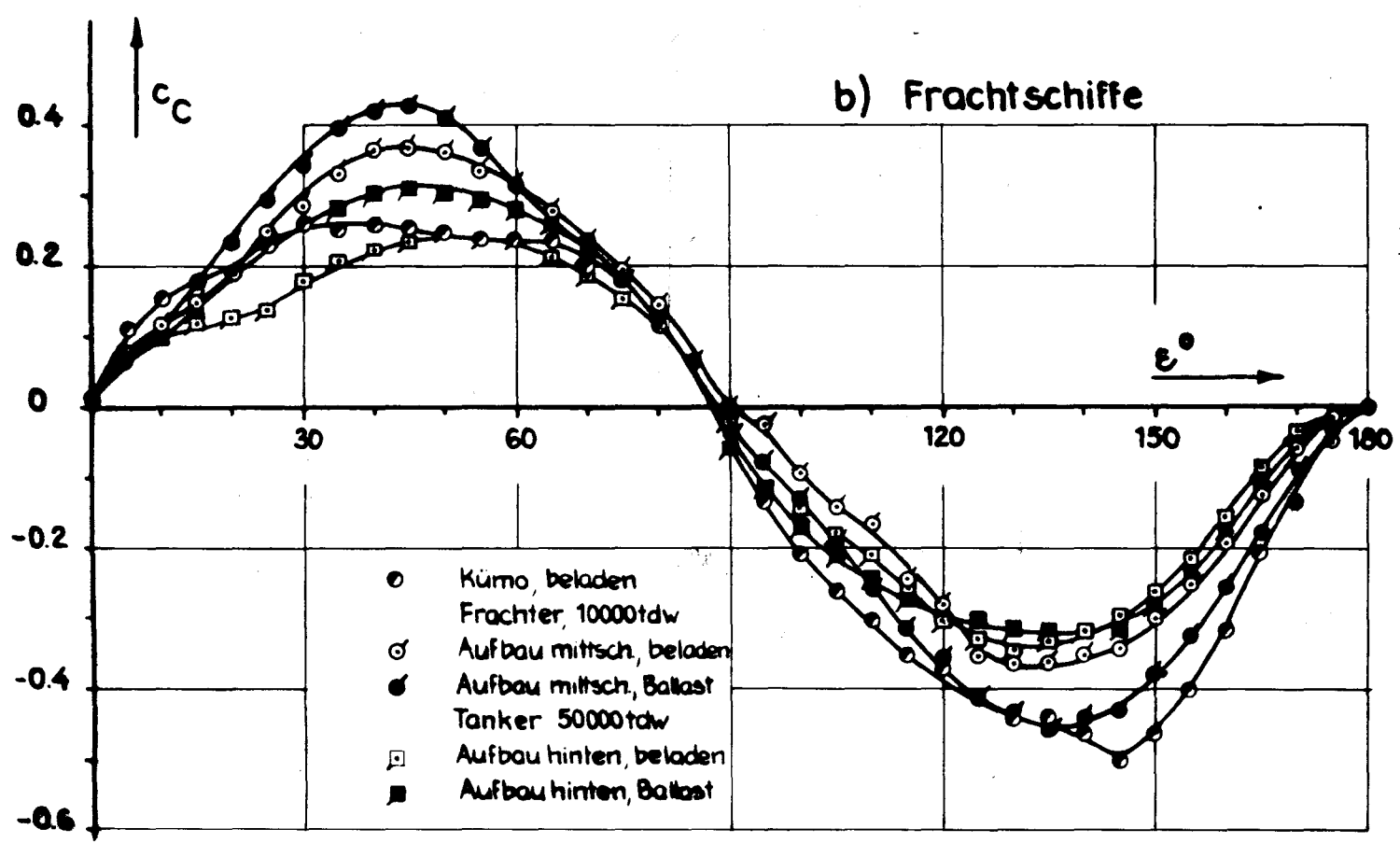


Beispiele für den Verlauf der Querkraftbeiwerte  $c_C = f(\epsilon)$  (korrigiert für Anlaufgrenzschicht)

a) versch. Schiffstypen

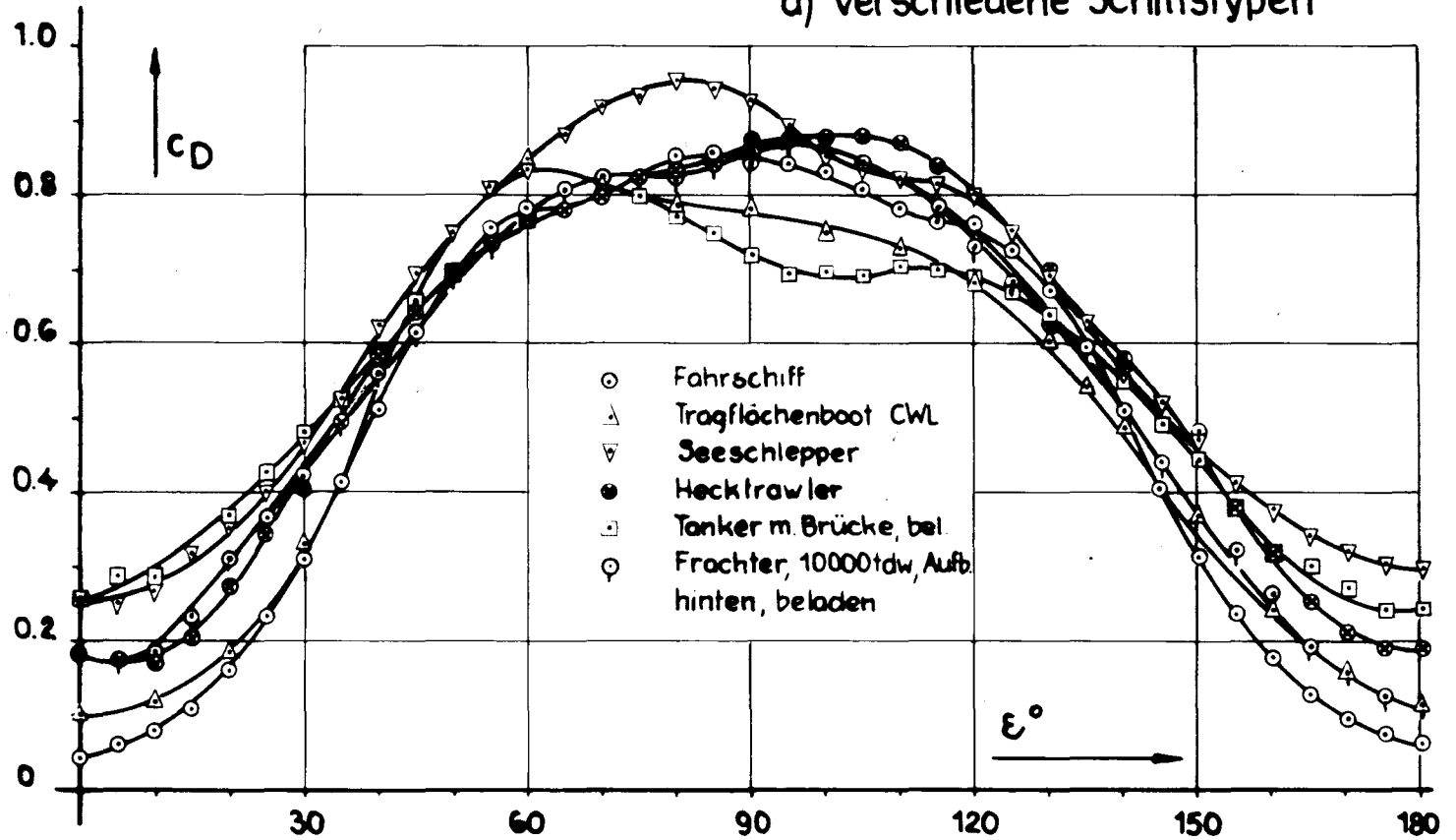


b) Frachtschiffe

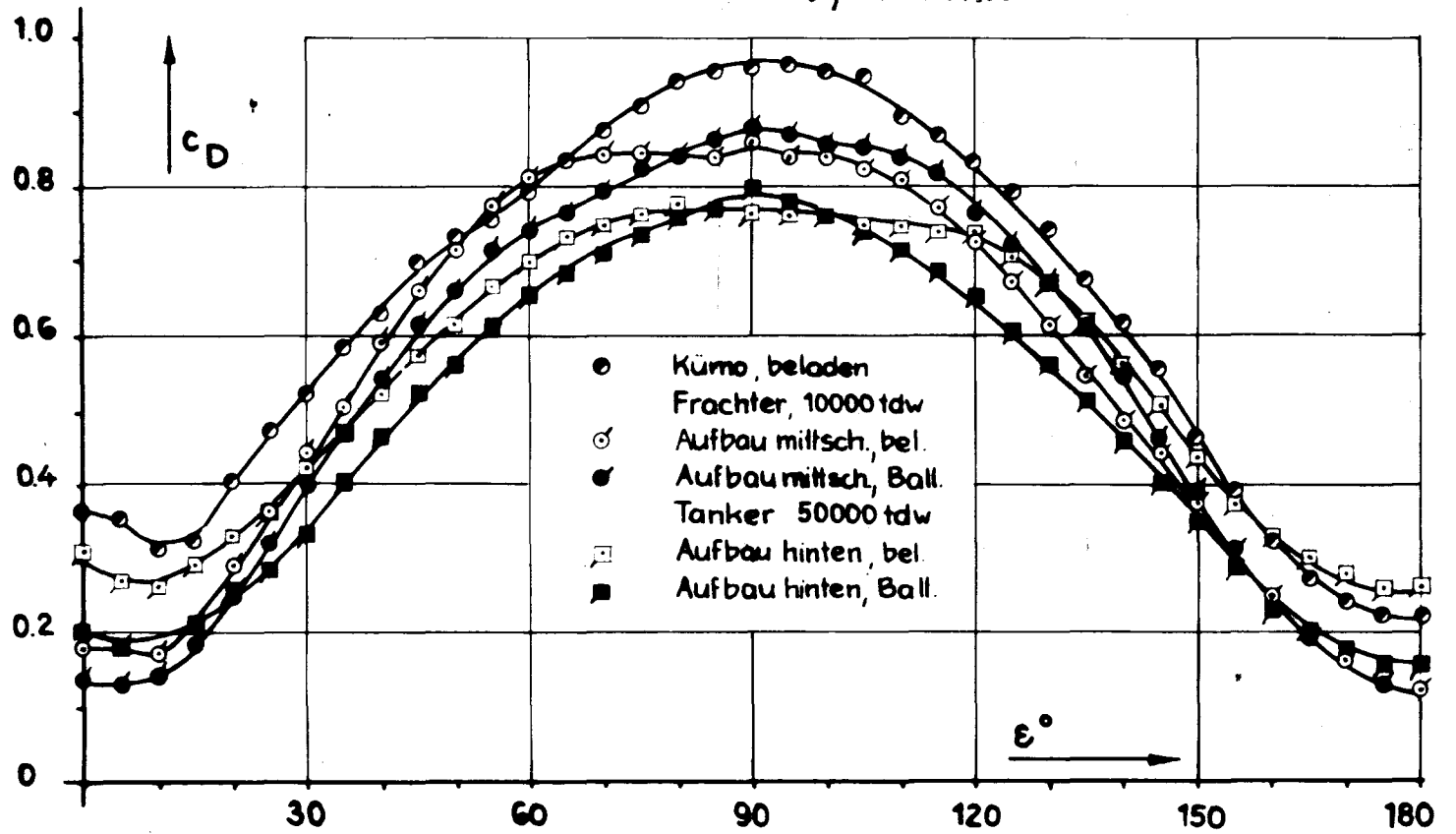


Beispiele für den Verlauf der Widerstandsbeiwerte  $c_D = f(\epsilon)$   
(korrigiert für Anlaufgrenzschicht)

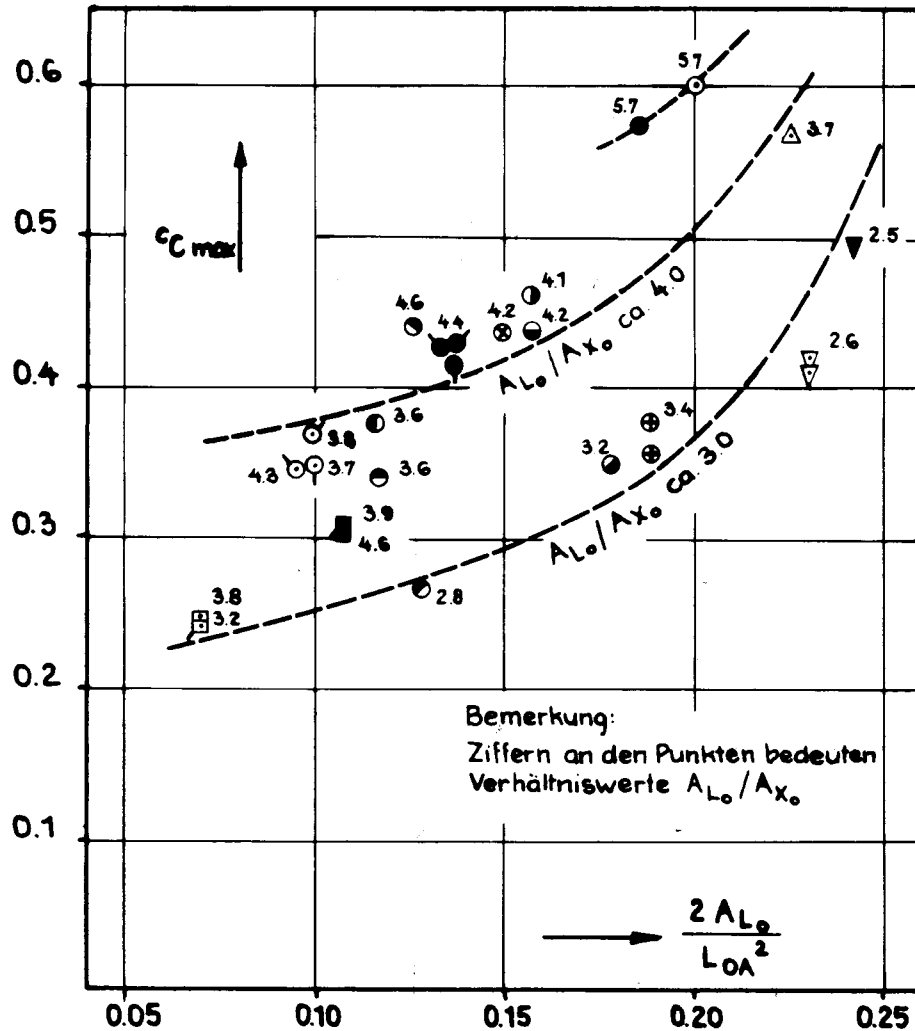
a) verschiedene Schiffstypen



b) Frachtschiffe



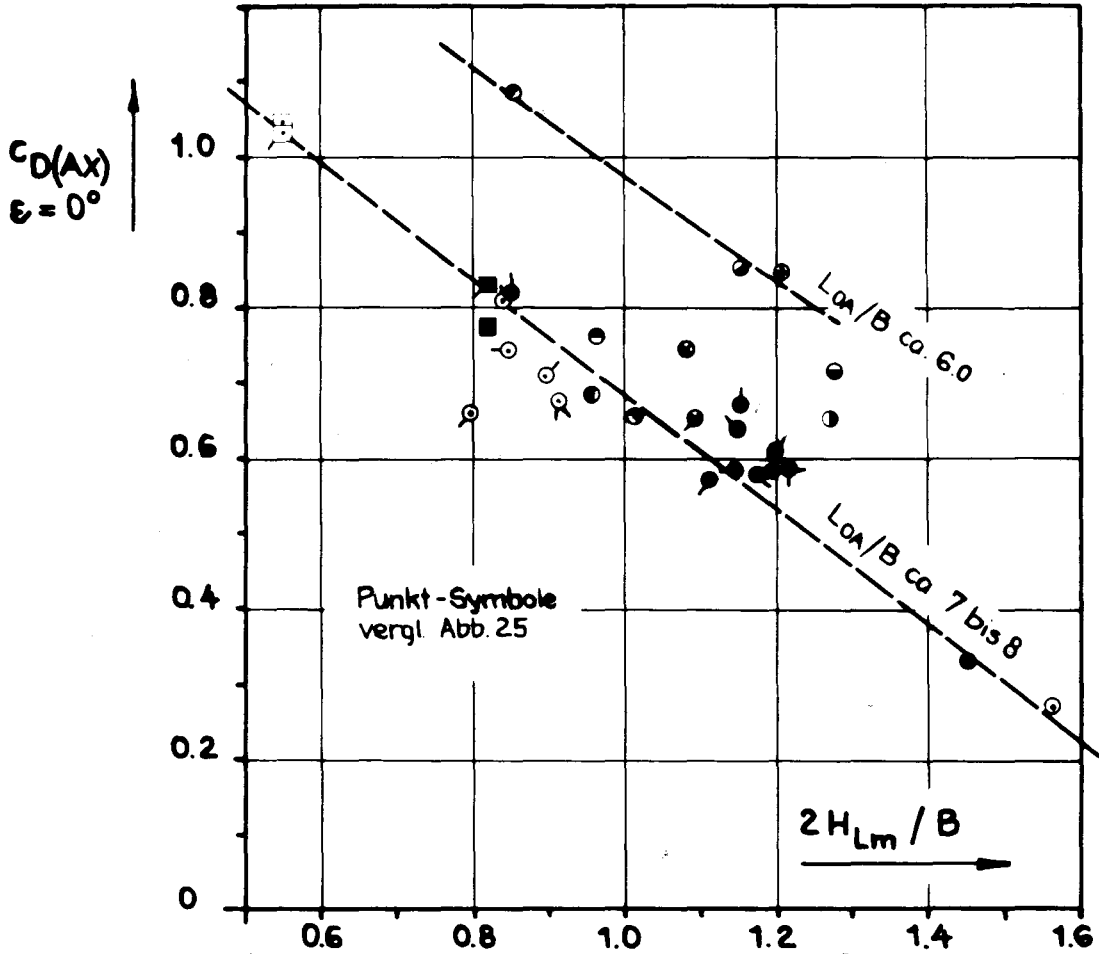
Maximale Querkraftbeiwerte im Bereich  $0^\circ < \epsilon < 90^\circ$   
(Anlaufgrenzschicht korrigiert)



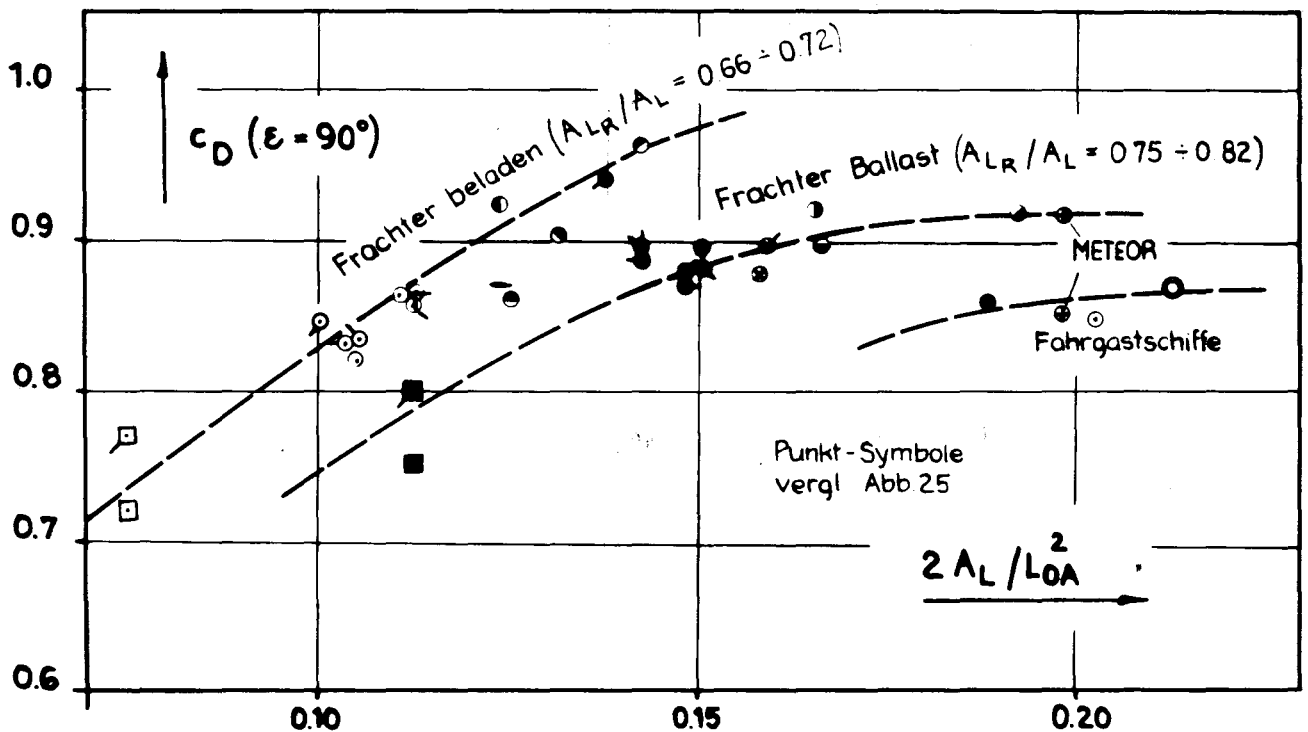
Punktsymbole	beladen	Ballast
Fährschiff	⊙	
Fahrgastschiff	●	
Kumo 600 tdw	⊙	●
Frachter 4500 tdw Aufbau mittschiffs	●	●
Frachter 4500 tdw Aufbau hinten	●	●
Frachter 10000 tdw Variante 1 ÷ 5	⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙	● ● ● ● ●
Frachter 10000 tdw Variante 6 ÷ 8	⊙ ⊙ ⊙	● ● ● ●
Tanker 50000 tdw mit Brücke	□	■
Tanker 50000 tdw Aufbau hinten	◻	◼
Forschungsschiff „METEOR“	⊕	
Seeschlepper	▽	
Hafenschlepper	▼	
Hecktrawler	⊗ ⊘	
Kühlschiff	●	

Abhängigkeit der Widerstandsbeiwerte für  $\epsilon = 0^\circ$  und  $90^\circ$  von Abmessungsverhältnissen des Schiffes.  
(korrigiert für Anlaufgrenzschicht)

a)  $c_{D(AX)} \epsilon = 0^\circ = f(2H_{Lm}/B)$

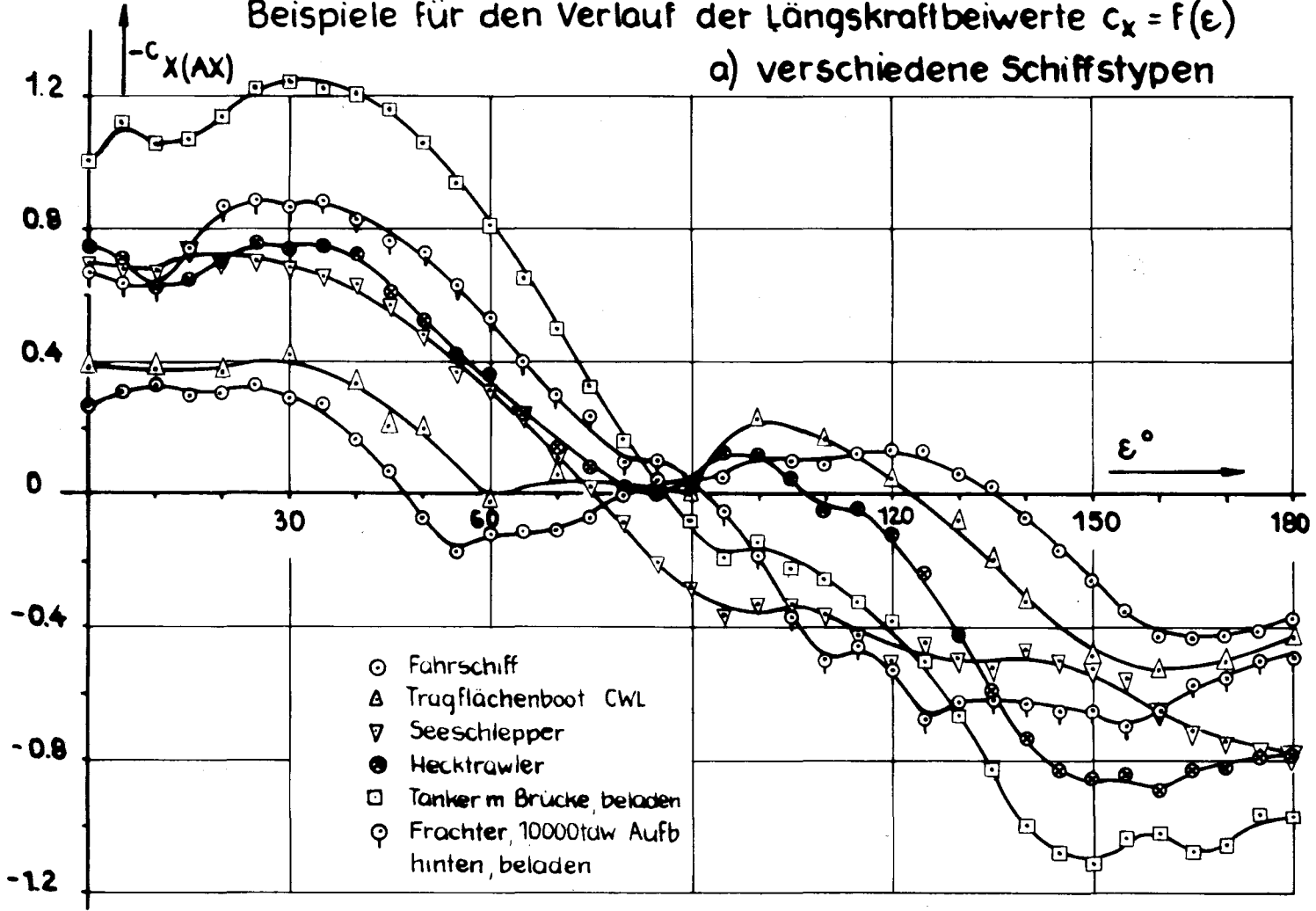


b)  $c_D \epsilon = 90^\circ = f(2A_L/LoA^2)$

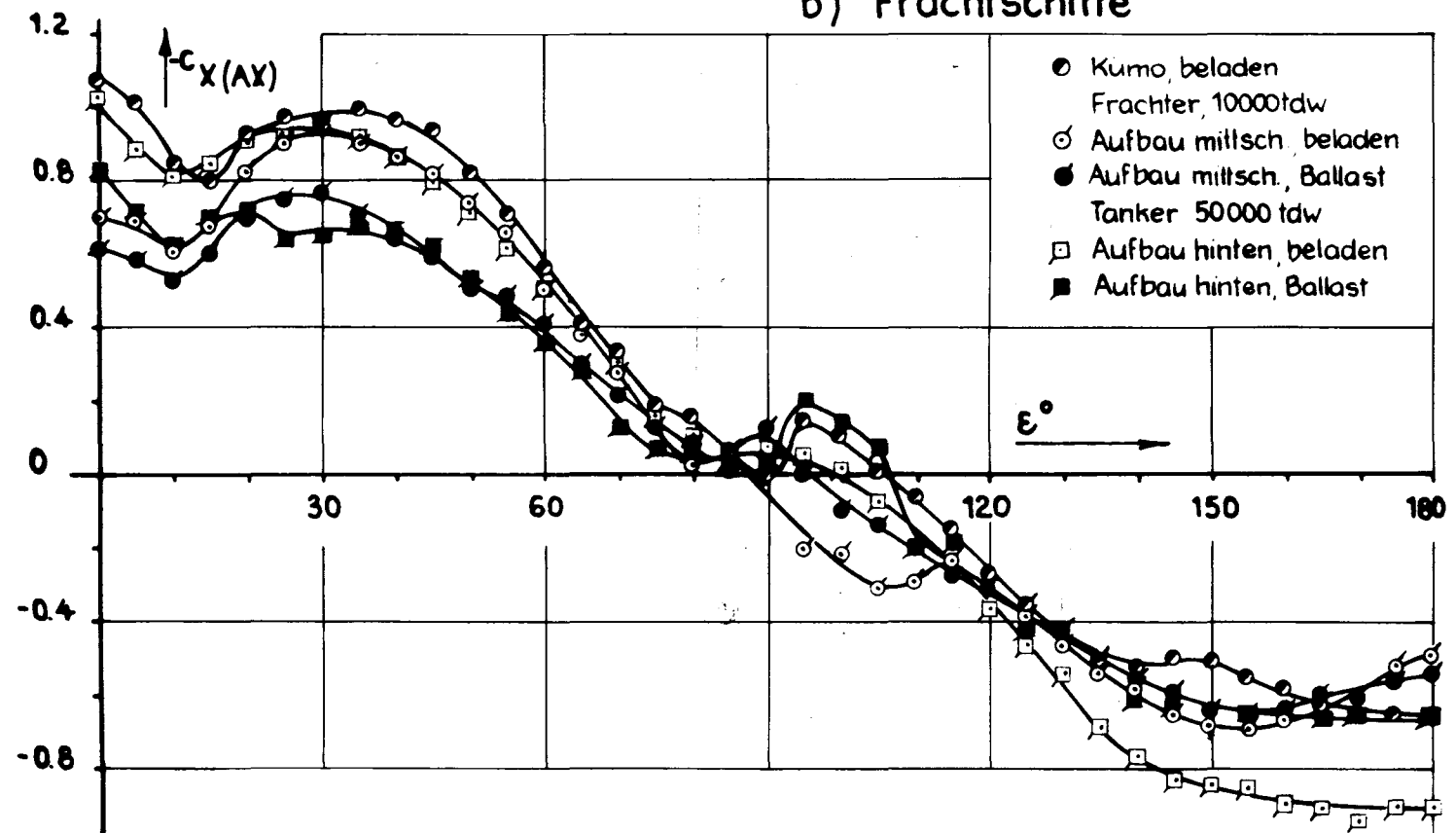


Beispiele für den Verlauf der Längskraftbeiwerte  $c_x = f(\epsilon)$

a) verschiedene Schiffstypen



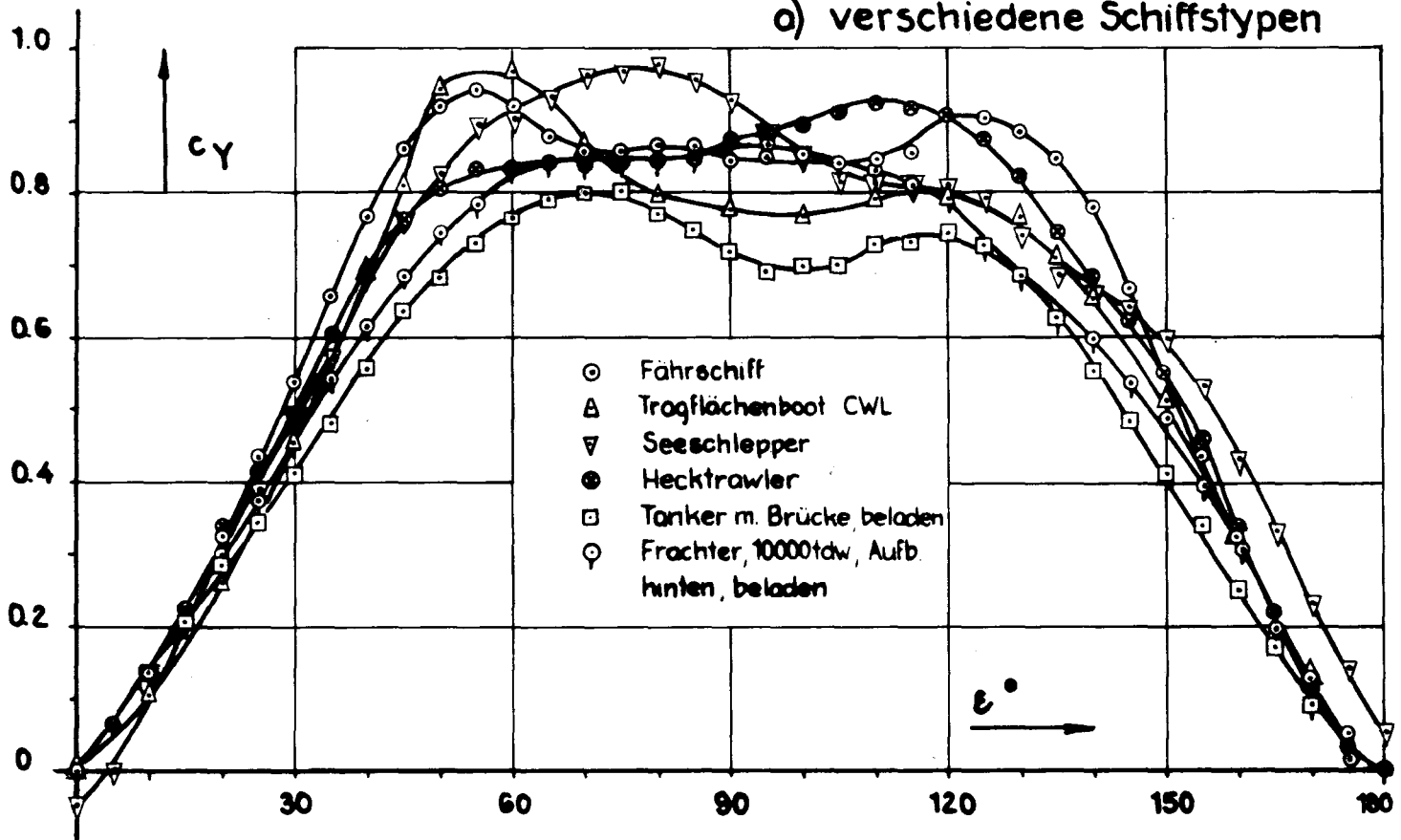
b) Frachtschiffe



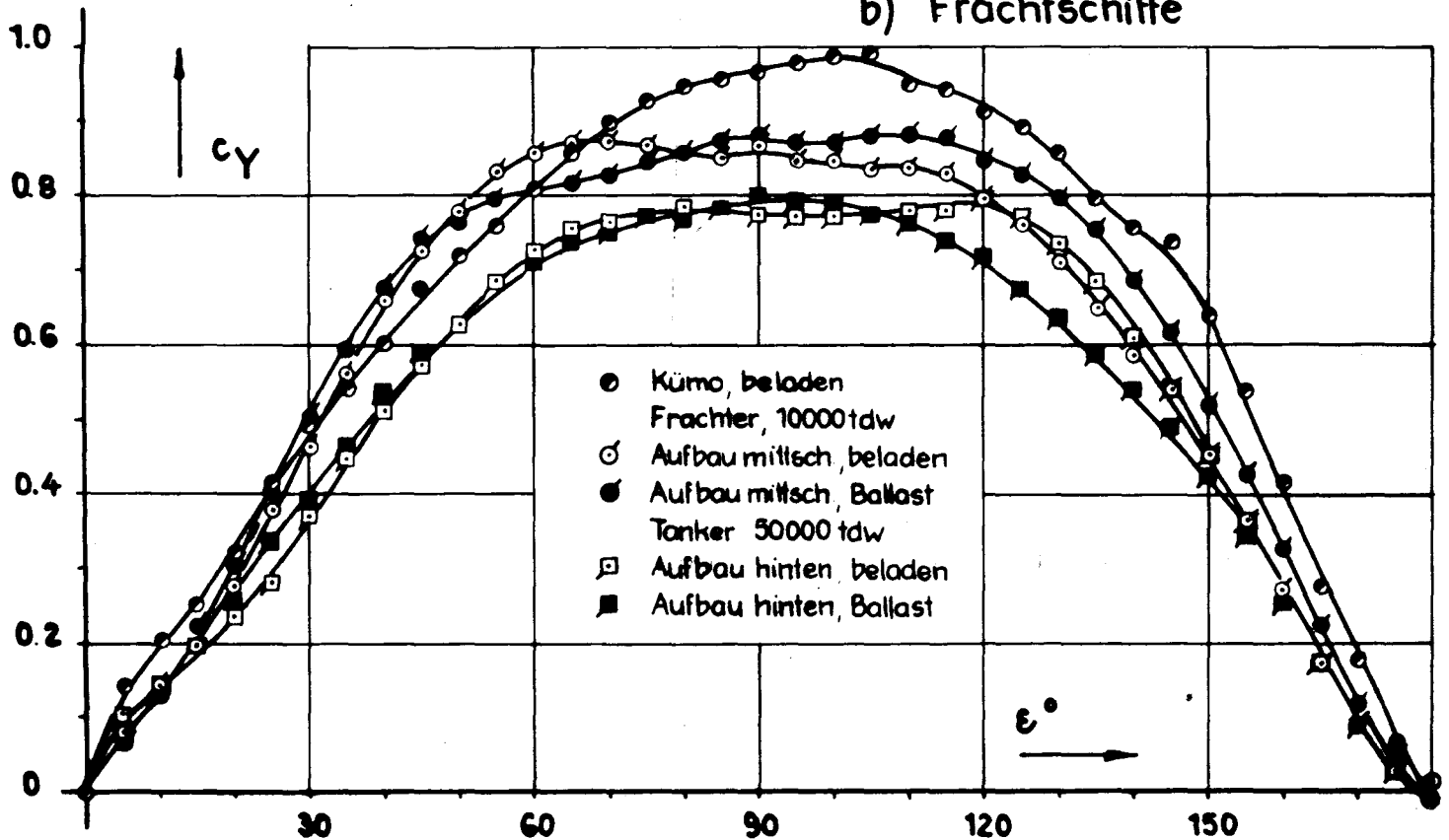
(Werte korrigiert für Anlaufgrenzschicht)

Beispiele für den Verlauf der Seitenkraftbeiwerte  $c_y = F(\epsilon)$   
(korrigiert für Anlaufgrenzschicht)

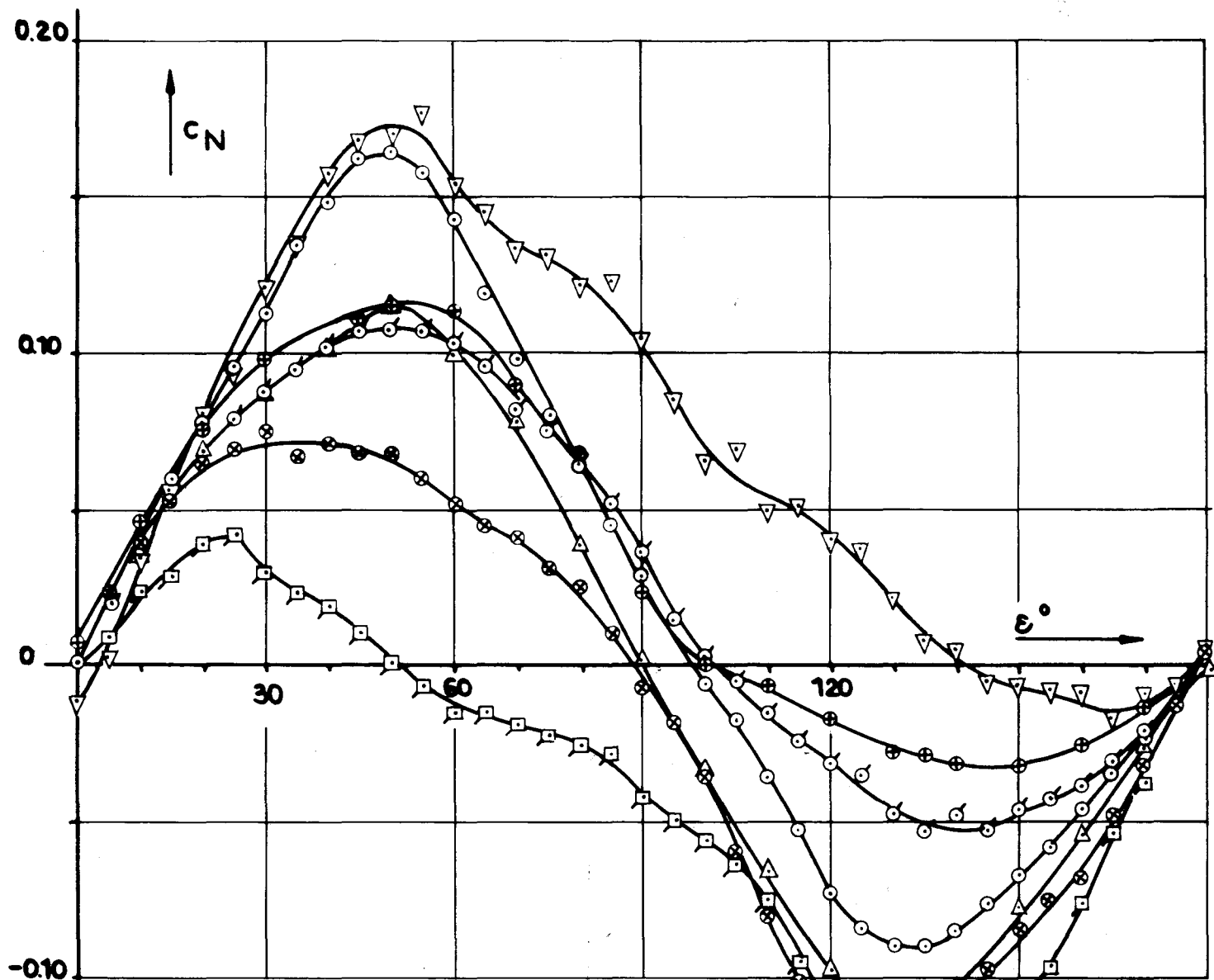
a) verschiedene Schiffstypen



b) Frachtschiffe



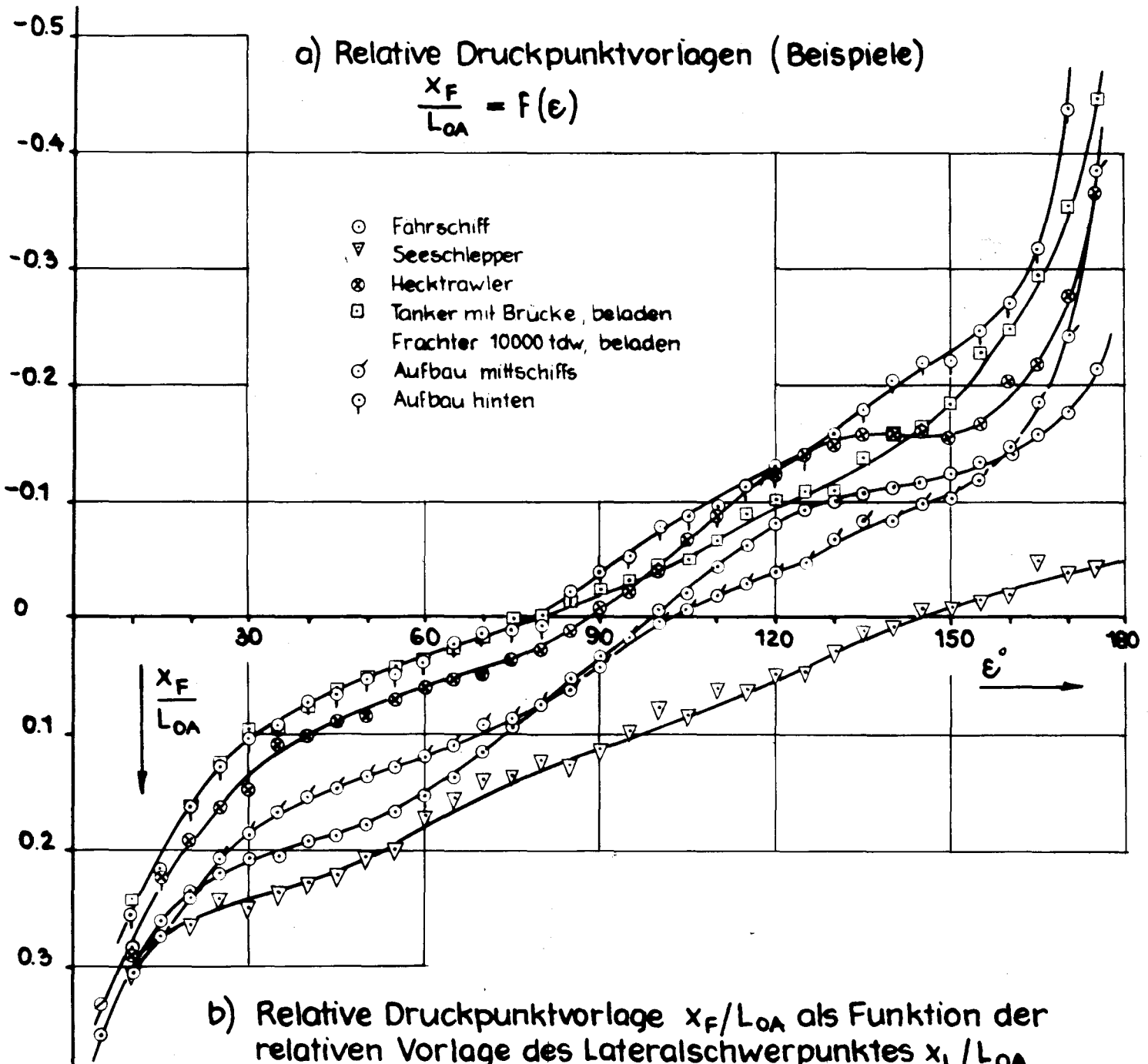
Beispiele für den Verlauf der Giermomentenbeiwerte  
 $c_N = f(\epsilon)$



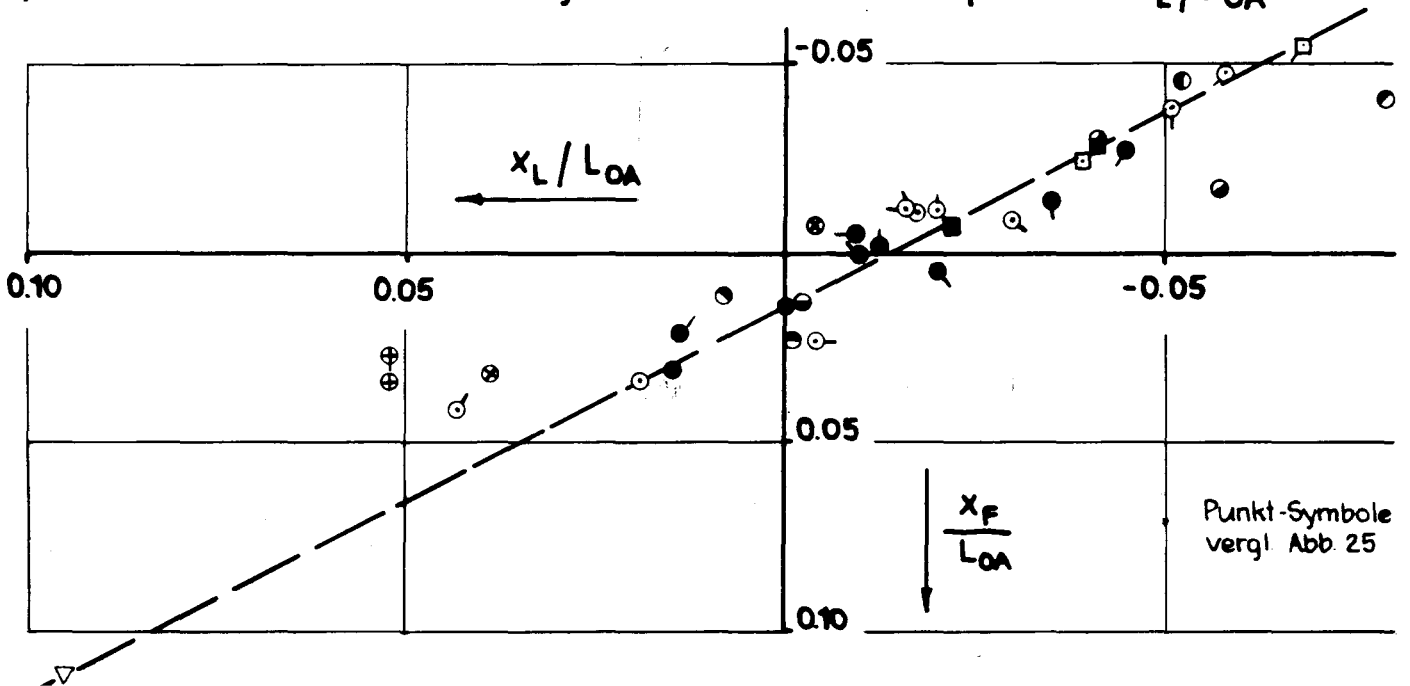
- Fährschiff
- ▽ Seeschlepper Bb-Anströmung
- ⊗ Hecktrawler
- △ Tragflächenboot CWL
- ⊕ Forschungsschiff „METEOR“  
(Stb.-Anströmung,  $-c_N$ )
- ⊙ 10000tdw-Frachter, Var. 1, beladen
- Tanker, Aufbau hinten, beladen

a) Relative Druckpunktvorlagen (Beispiele)

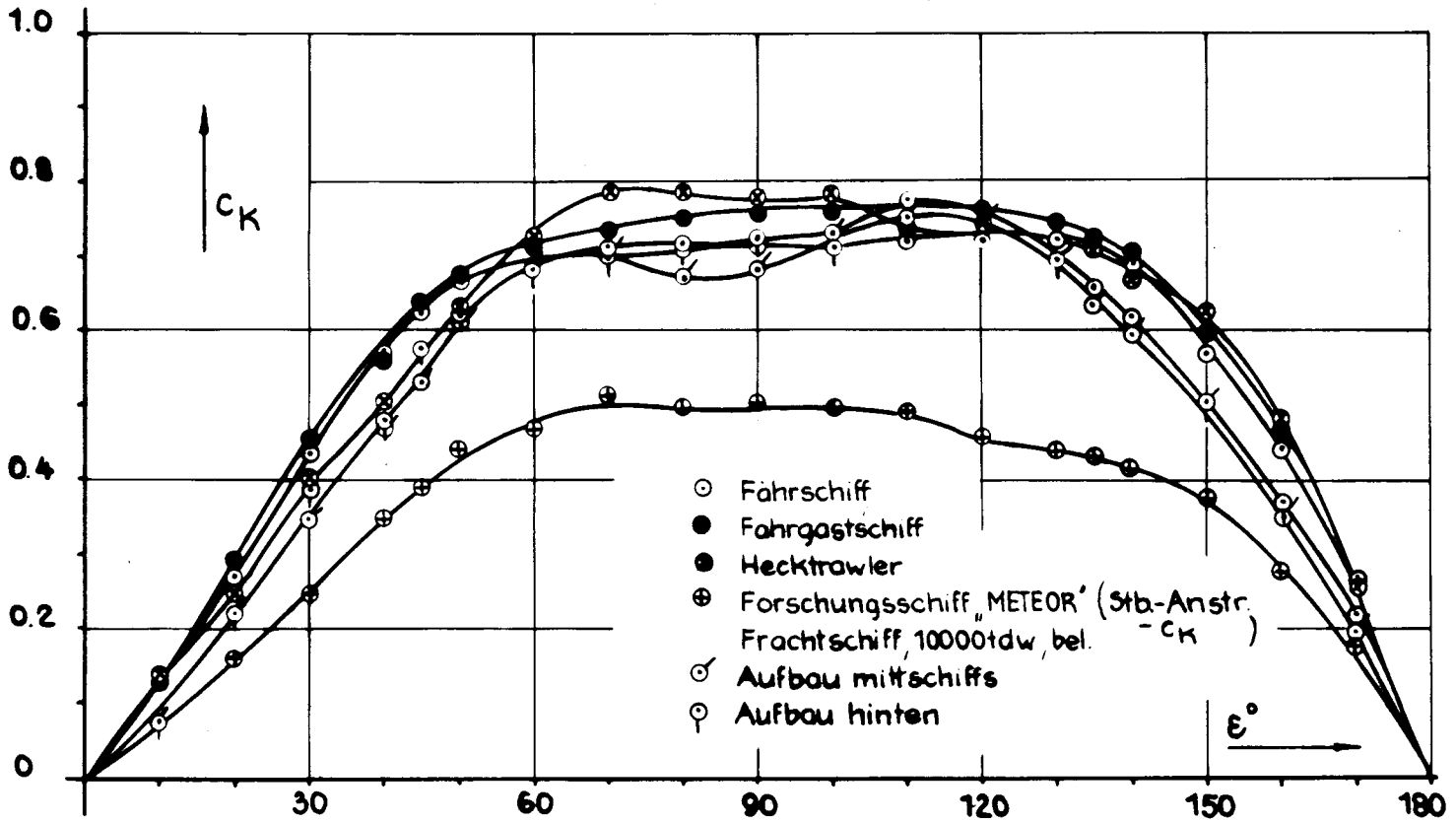
$$\frac{x_F}{L_{OA}} = f(\epsilon)$$



b) Relative Druckpunktvorlage  $x_F/L_{OA}$  als Funktion der relativen Vorlage des Lateralschwerpunktes  $x_L/L_{OA}$



Rollmomentenbeiwerte  $c_K = f(\epsilon)$



Relative Druckpunkthochlagen  $-\frac{z_F}{H_{Lm}} = f(\epsilon)$

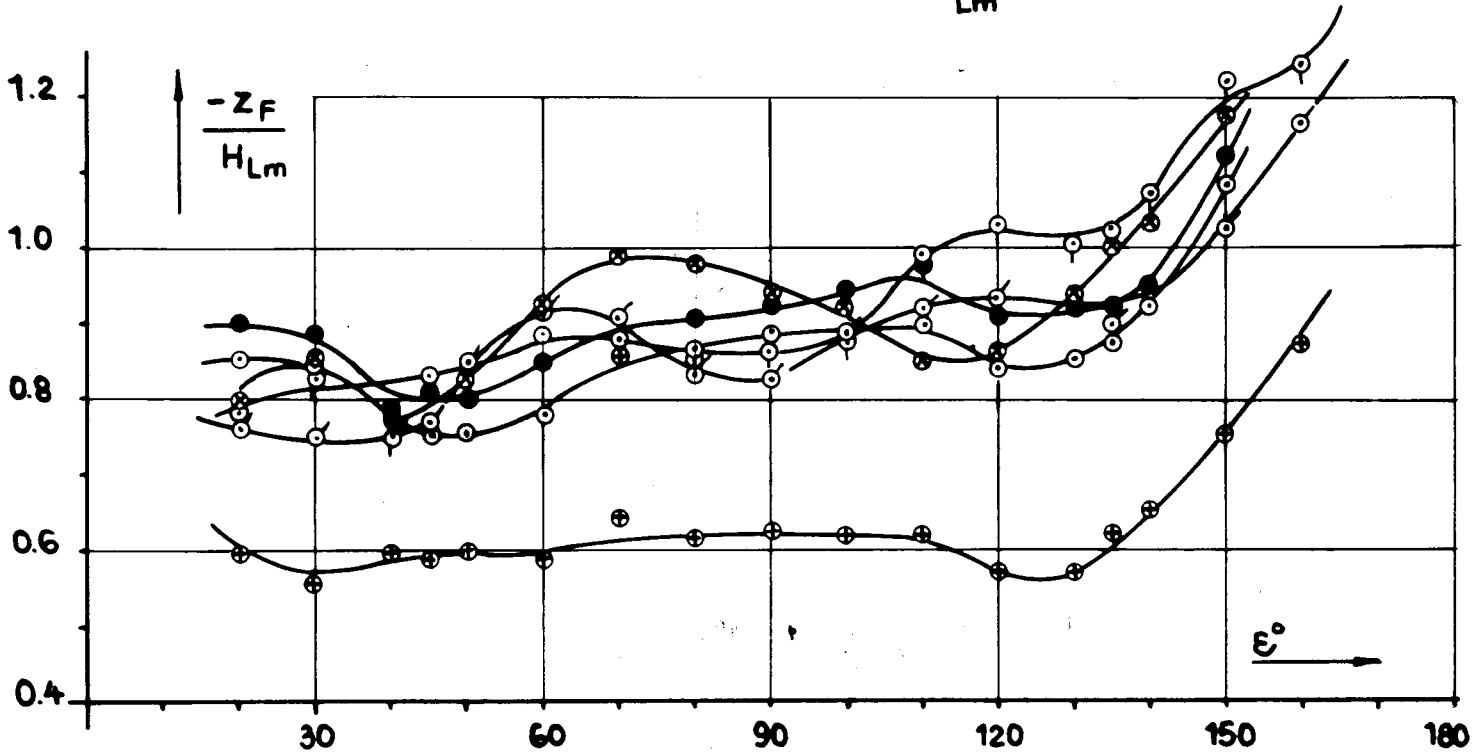
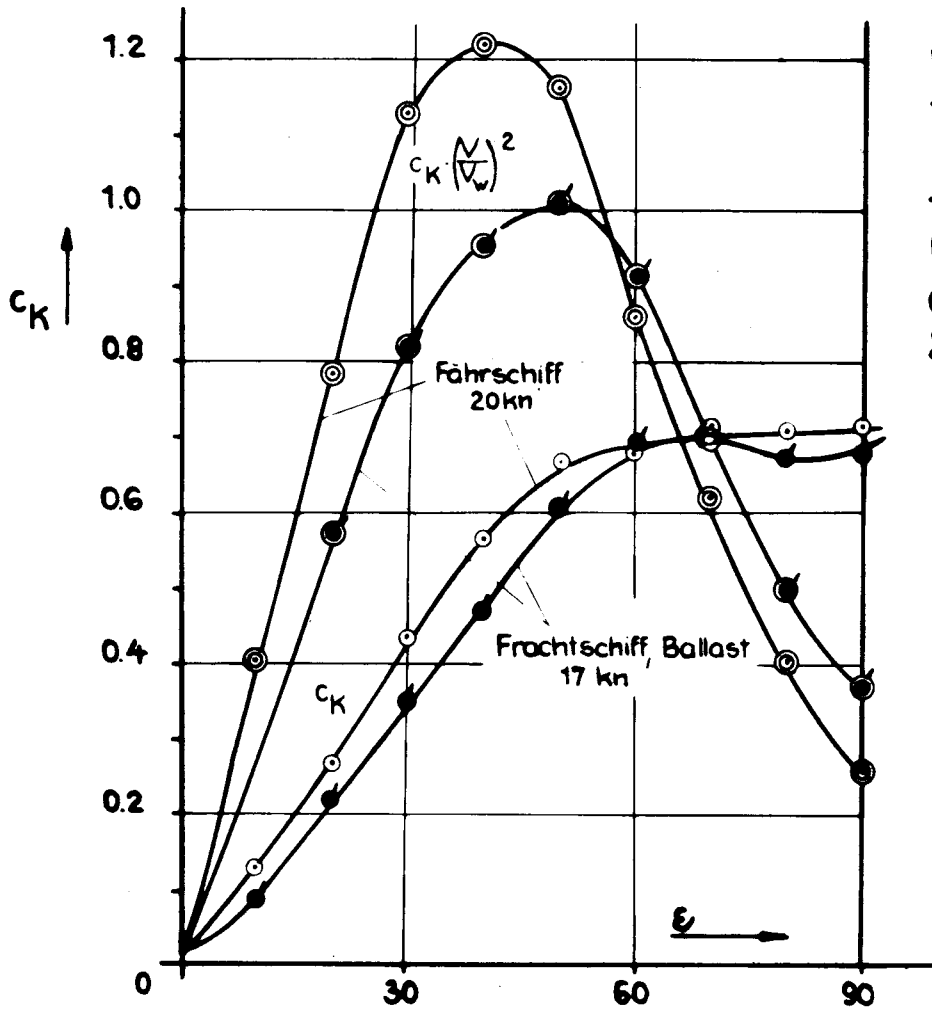
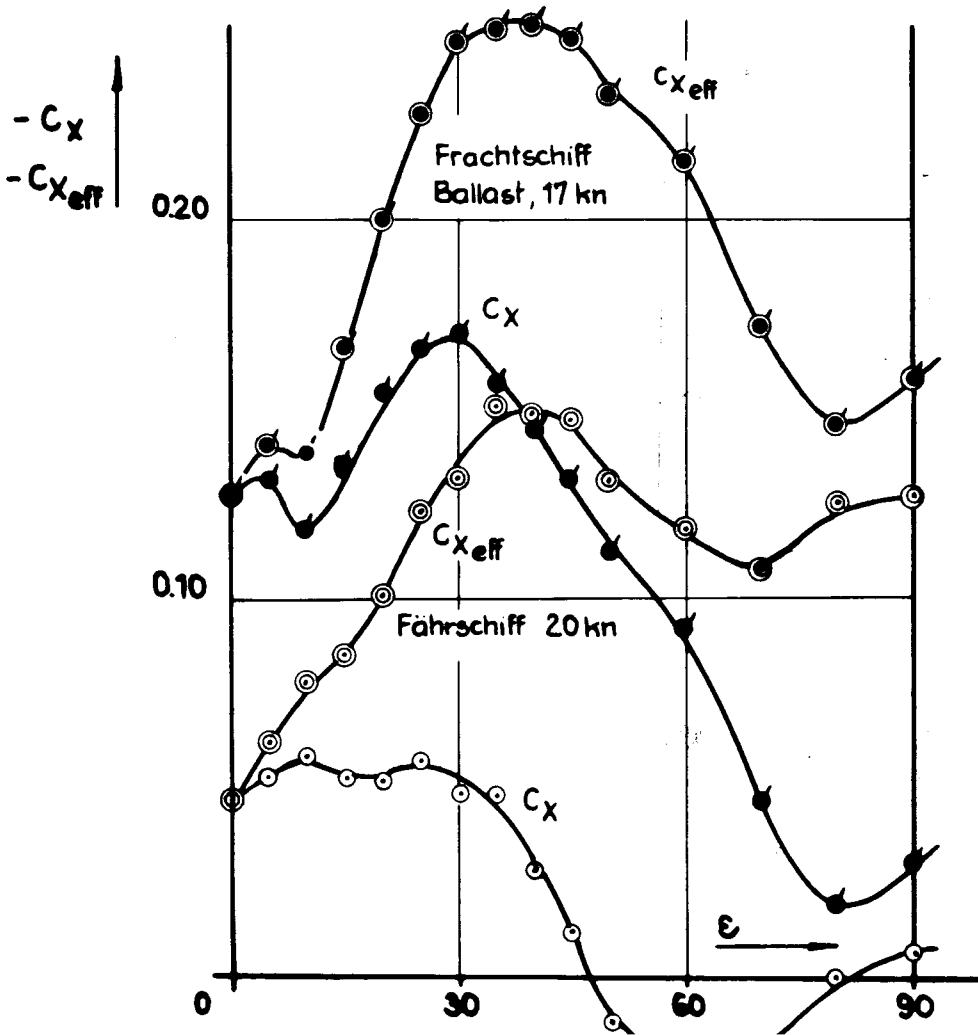


Abb. 33



Vergleich der Rollmomentenbeiwerte  $c_K$  und der wirksamen Rollmomentenbeiwerte  $c_K \cdot \left(\frac{V}{V_w}\right)^2$  für ein Fährschiff und ein Frachtschiff bei  $V_w = 25$  kn.

Abb. 34

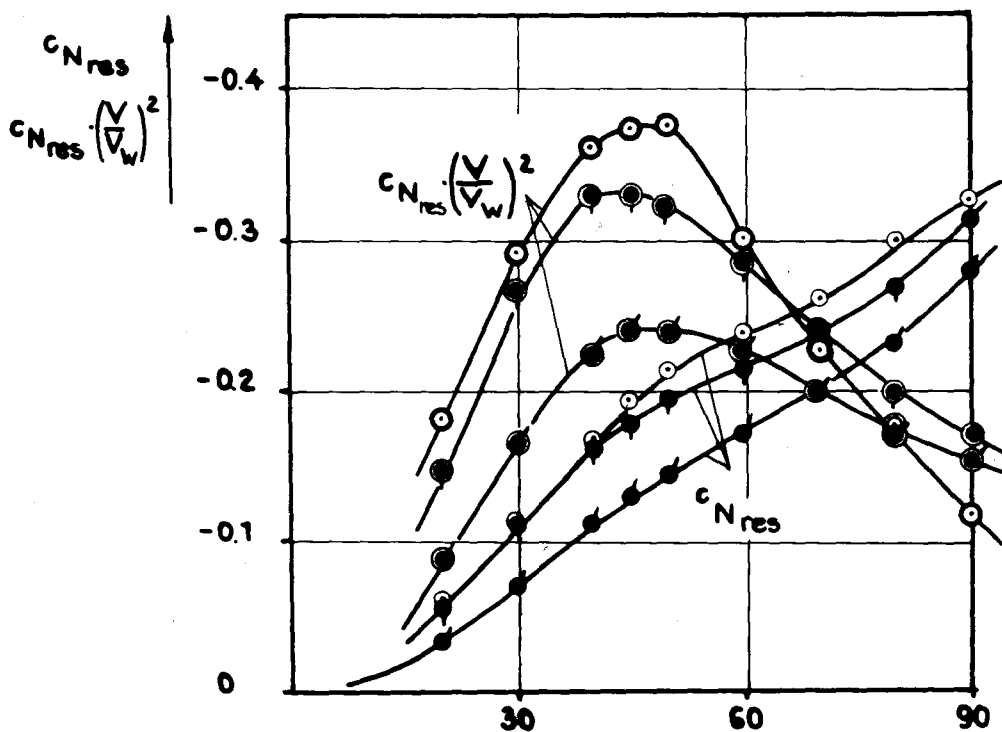


Beiwerte der Längskraft  $c_x$  und der effektiven Längskraft  $c_{x_{eff}}$  für ein Fährschiff und ein Frachtschiff in Ballast bei einer Windgeschwindigkeit von  $V_w = 25$  kn

Beiwerte des resultierenden Gierrmomentes

$$C_{N_{res}} = C_N + C_{NH} \cdot \frac{L \cdot T}{A_L} \cdot \frac{g_H}{g} \cdot \frac{V_H^2}{V^2}$$

für Fährschiff ( $V_H = 20 \text{ kn}$ ) und Frachtschiffe ( $V_H = 17 \text{ kn}$ ) bei Windgeschwindigkeit  $V_W = 25 \text{ kn}$



- ● Fährschiff
- ● Frachtschiff
- ● Ballast, Aufbau mittschiffs
- ● Ballast, Aufbau hinten