467 | Mai 1986

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Werner Blendermann

Die Windkräfte am Schiff

TUHH
Technische Universität Hamburg-Harburg

Die Windkräfte am Schiff

Werner Blendermann, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1986

ISBN: 3-89220-467-5

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

http://www.tuhh.de/vss

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 467

DIE WINDKRÄFTE AM SCHIFF

Werner Blendermann

Mai 1986

Übersicht

Die Windkräfte und Windmomente am Schiff werden durch halbempirische Lastfunktionen beschrieben. Die Abschätzung der aerodynamischen Eigenschaften eines Schiffes wird dadurch reduziert auf die Bestimmung des Windwiderstandes in Längs- und Querrichtung und jeweils eines Koeffizienten für Windkraftablenkung, Querkraft, Giermoment und Rollmoment. Zahlenwerte für verschiedene Schiffe werden gegeben.

Abstract

The wind forces and wind moments on ships are described by semi-empirical loading functions. Thus the evaluation of the aerodynamic characteristics of a ship is reduced to the determination of the longitudinal and lateral wind resistance and one coefficient for, respectively, wind force deflection, transverse force, yawing moment and rolling moment. Data are given for different ships.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
2. Windkraftablenkung und Querkraft	2
3. Kraftellipse	9
4. Giermoment und Rollmoment	13
5. Modell und Wirklichkeit	16
6. Parameterwerte und Lastfunktionen	20
7. Anpassen von Windlastbeiwerten	25
8. Zusammenfassung	27
9. Bezeichnungen	28
10. Literatur	30
Tabellen 1 und 2	32
Bilder 1 bis 25	34
Anhang A : Windlastbeiwerte für sieben Schiffsmodelle	59
Anhang B : Beispiele	71

Beispiel 1 Marineschiff - Windlastparameter aus der kennzeichnenden Auftragung

Beispiel 2 Forschungsschiff - Schätzen von Windlastbeiwerten

Beispiel 3 Forschungsschiff - Mindestschub zum Drehen durch den Wind

Beispiel 4 Bohrschiff - Anpassen von Windlastbeiwerten

1. Einleitung

Windeffekte spielen heute im Schiffsbetrieb eine bedeutendere Rolle als noch vor wenigen Jahren. Durch die Zunahme der Größe bei Tankern, der Höhe bei Fährschiffen und der Ladungshöhe bei Containerschiffen bieten viele Schiffe dem Wind jetzt mehr Angriffsfläche. Dieses hat Auswirkungen auf das Manövrierverhalten und die Stabilität. Schiffe für besondere Aufgaben wie Forschungsschiffe, Bohrschiffe und Taucherbasisschiffe müssen auch bei starkem Wind präzis manövrieren oder positioniert werden. Ob Schiffsprobefahrt oder Schiffsrouting, immer ist nach dem Einfluß des Windes gefragt.

Daher wurden bereits für viele Schiffe die Windkräfte und Windmomente durch Messungen am Modell im Windkanal ermittelt. Auf solche Windlastdaten von Vergleichsschiffen wird auch vorrangig zurückgegriffen, wenn für ein Schiff keine Meßwerte vorliegen. Unter der Vielzahl veröffentlichter Daten verdienen die Meßwertsammlungen von Wagner (1967) und Aage (1971) besondere Erwähnung. Sie enthalten Windlastbeiwerte für sehr unterschiedliche Schiffe und sind für die Praxis immer noch und zu Recht eine wichtige Quelle, wenn sich die Schiffsformen zum Teil auch gewandelt haben.

Bisher gibt es keine formelmäßige Darstellung der Windwirkung am Schiff. Man hat sich vorwiegend auf die Wiedergabe von Meßwerten beschränkt. Dove und Ferris (1960) und Wagner (1967) machen erste Ansätze, die Windkräfte und -momente mit Schiffsparametern zu verknüpfen. Zwei weitere Zitate sollen für die Art bisheriger Schätzverfahren stehen.

Wilson und Roddy (1970) geht es um Annahmen für einen Teilaspekt der Windwirkung, den Windwiderstand von Frachtschiffen und Tankern vor allem zur Korrektur von Probefahrtsergebnissen. Sie geben den Beiwert der Längskraft durch eine Kurve an als Mittel von Meßwerten für mehrere Schiffe.

Isherwood (1973) wählt einen formalen mathematischen Ansatz. Er verknüpft die Kraft- und Momentenbeiwerte linear mit dimensionslosen Parametern des Schiffes, gebildet aus Schiffslänge und Schiffsbreite, Lateralfläche,Frontschattenfläche, Lateralfläche der Aufbauten, vom Wind umwehten Umfang des Lateralplans. Ferner berücksichtigt er Gruppen von Masten und Ladepfosten. Die Koeffizienten ermittelt er für feste Anströmwinkel aus Windkanalmessungen für ein Kollektiv von Schiffen aus der Forderung kleinster quadratischer Abweichungen.

Eine theoretische Berechnung der Windkräfte am Schiff ist heute nicht möglich. In vergleichbaren Fällen der Strömungsmechanik behilft man sich mit Prinzipien. Ein Beispiel ist das Querströmungsprinzip für die Kräfte am schräg angeströmten Zylinder. Ähnliches könnte auch hier weiterhelfen.

Bisher wurde nicht genutzt, daß die Windwirkung an allen Schiffen gleich ist, mit mehr oder weniger ausgeprägten Merkmalen für den jeweiligen Schiffstyp. Diese Eigenschaft wird in halbempirische Lastfunktionen für die Windkräfte und -momente eingebracht. Als nützlich erweist sich dabei die klassische mathematische Strömung an der ebenen Platte mit offenem Totwasser (Helmholtz, 1868; Kirchhoff, 1869). Sie liefert die Art Funktionen, mit denen dann auch die Identifikation von Windlastparametern gelingt.

Ergänzend wird gezeigt, wie man diese Funktionen ferner zur Approximation von Windlastbeiwerten verwenden kann, etwa als Eingabe der aerodynamischen Eigenschaften eines Schiffes für eine Manövrierautomatik.

2. Windkraftablenkung und Querkraft

Die Kraft am Schiff in Richtung des scheinbaren Windes ist der Widerstand D - nicht zu verwechseln mit dem Windwiderstand des Schiffes in Schiffslängsrichtung - und quer dazu die Querkraft C (Bild 1). Das schiffsfeste Koordinatensystem hat seinen Ursprung in der Wasserlinie auf Hauptspant. In diesen Koordinaten ist X die Längskraft, Y die Seitenkraft, N das Giermoment und K das Rollmoment. Mit T wird die Gesamtkraft des Windes (Windkraft) bezeichnet. Der Einfallswinkel ε des scheinbaren Windes wird von der Schiffslängsachse aus gemessen; $\varepsilon = 0$ bedeutet Wind von vorn.

Entsprechend erhält man die dimensionslosen Beiwerte

$$CD, CC, CX, CY, CT = \frac{D, C, X, Y, T}{q\, A_L}, \tag{1}$$

mit dem Staudruck der Anströmung, $q = \frac{\rho}{2}\, u^2$, und der Lateralfläche A_L; u Geschwindigkeit des scheinbaren Windes. Die Längskraft wird wahlweise auf die Frontschattenfläche A_F bezogen; ihr Beiwert ist dann mit CX_{AF} bezeichnet.

Das Giermoment wird zusätzlich auf die Länge des Schiffes, L_{OA}, bezogen,

$$CN = \frac{N}{q\, A_L\, L_{OA}}, \tag{2}$$

und das Rollmoment zusätzlich auf die mittlere Höhe des Lateralplans, $H_M = A_L/L_{OA}$,

$$CK = \frac{K}{q\, A_L\, H_M}. \tag{3}$$

Der Hebel des Giermoments ist

$$x_F = \frac{N}{Y}, \tag{4}$$

bzw.

$$\frac{x_F}{L_{OA}} = \frac{CN}{CY}. \tag{5}$$

Als Rollmomentenhebel wird vereinbart

$$z_F = \frac{K}{Y}, \tag{6}$$

bzw.

$$\frac{z_F}{H_M} = \frac{CK}{CY}. \tag{7}$$

Kennzeichnend für die Windwirkung am Schiff ist die Ablenkung der Windkraft gegenüber dem (scheinbaren) Wind um den Winkel $\Delta\varepsilon$ hin zur Schiffsquerrichtung (Bild 1). Die Abhängigkeit dieses Ablenkwinkels vom Anströmwinkel ist typisch für alle länglichen Objekte. Bild 2 zeigt den Verlauf für ein Containerschiff, ein Fährschiff und ein Offshore-Versorgungsschiff. Die Quadranten vorlichen und achterlichen Windes sind einander überlagert. Bei

Seiten- und Längssymmetrie ist $\Delta\varepsilon = 0$ in Längs- und Querströmung.

Setzt man die Kraftkomponenten X und Y und die entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten u_x und u_y längs und quer zum Schiff zueinander ins Verhältnis,

$$\frac{X}{Y} = (1-a)\,\frac{u_x}{u_y}\,, \tag{8}$$

wobei a ein noch näher zu betrachtender Parameter ist, so erhält man

$$\Delta\varepsilon = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}\varepsilon}{1-a}\right) - \varepsilon\ . \tag{9}$$

Wenn $a = 0$, liegt keine Ablenkung vor (reiner Widerstand); wenn $a = 1$, steht die Kraft für alle Anströmwinkel quer zum Objekt (reine Seitenkraft). Bild 3 zeigt die Kurvenschar für $a = \text{const}$ in den Grenzen $0 \leq a \leq 1$. Für den maximalen Ablenkwinkel gilt

$$\Delta\varepsilon_{max} = \frac{\pi}{2} - 2\varepsilon\ . \tag{10}$$

Dafür erhält man aus Gl. (9)

$$a = \frac{2\sin\Delta\varepsilon_{max}}{1+\sin\Delta\varepsilon_{max}}\ . \tag{11}$$

Dieser Wert, folgend Ablenkparameter genannt, ist ein Maß für die Windkraftablenkung am Schiff. Man kann ihn auch als Impulsverlustgröße betrachten. Deutlich wird das an einer Platte, auf die ein Flüssigkeitsstrahl mit der Geschwindigkeit u und dem Massenstrom Q unter dem Winkel ε auftrifft.

Für den Strahldruck an der Platte erhält man nach dem Impulssatz das bekannte Ergebnis

$$Y = Q\,u\,\sin\varepsilon\ . \tag{12}$$

Parallel zur Platte herrscht Kräftegleichgewicht,

$$Q_2 - Q_1 = Q\cos\varepsilon\ , \tag{13}$$

wobei Q_1 und Q_2 die plattenparallelen Massenströme sind. Mit der Kontinuitätsbedingung

$$Q_1 + Q_2 = Q \tag{14}$$

wird

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{1-\cos\varepsilon}{2} \; , \; \frac{Q_2}{Q} = \frac{1+\cos\varepsilon}{2} \; . \tag{15}$$

Die Strömung erfahre nun einen Impulsverlust entlang der Platte und fließe mit $u' < u$ parallel zur Platte ab, wobei die Aufteilung der Massenströme, Gl. (15), erhalten bleibe. Die auf die Platte wirkende Kraft ist dann zur Platte geneigt um den Winkel $\varepsilon' = \varepsilon + \Delta\varepsilon$. Man erhält

$$\operatorname{tg}\varepsilon' = \frac{Qu\sin\varepsilon}{Qu\cos\varepsilon - (Q_2 - Q_1)\,u'} \; , \tag{16}$$

so daß mit Gl. (15)

$$\Delta\varepsilon = \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{\operatorname{tg}\varepsilon}{1 - u'/u}\right) - \varepsilon \; . \tag{17}$$

Das aber ist mit $u'/u = a$ Gl. (9).

Es besteht eine Analogie zwischen Kraftablenkung und Ablenkung der Strömung bei schrägem Durchfluß durch Siebe.

Aus Gl. (9) erhält man den Ablenkparameter

$$a = 1 - \frac{\operatorname{tg}\varepsilon}{\operatorname{tg}(\varepsilon + \Delta\varepsilon)} \; . \tag{18}$$

Bild 2 zeigt dessen Verlauf für die drei genannten Schiffe. Das Ergebnis ist ein Wert, der im allgemeinen wenig vom Anströmwinkel abhängt und im Falle des Containerschiffes praktisch konstant ist.

Eine Ausnahme machen Schiffe mit starker Unsymmetrie um Hauptspant wie Offshore-Versorgungsschiffe. An diesen Schiffen herrscht auch bei Querströmung eine Längskraft, so daß a nach Gl. (9) über alle Grenzen wächst. Aber auch trotz verschwindender Längskraft bei Querströmung stellt sich eine besondere Abhängigkeit dann ein, wenn ein Schiff noch durch vorlichen Wind zu segeln beginnt und durch achterlichen Wind bereits gebremst wird. Das ist der Fall bei den heutigen Fährschiffen und Autotransportern von ausgeprägter Quaderform, aber auch bei den schnittigeren Fahrgast- und Kreuzfahrtschiffen. Mit dem Vorzeichenwechsel der Längskraft innerhalb eines Quadranten des Windeinfalls steigt der Ablenkparameter über Eins.

Der Ablenkwinkel wird in Bild 4 nun selbst zur unabhängigen Variablen für die Querkraft CC, bezogen auf den Widerstand bei Querströmung (Beiwert CD_q). Als gestrichelte Linie hinzugefügt ist die Querkraft an der ebenen Platte mit offenem Totwasser (Helmholtz, 1868; Kirchhoff, 1869), im folgenden Helmholtz-Kirchhoff-Platte (HK-Platte) genannt. Rayleigh (1876) hat dafür Druckkraft und Moment angegeben.

Die Druckkraft an der Platte entspricht der Seitenkraft am Schiff. Ihr Beiwert ist (siehe auch Lamb, 1952)

$$CY_{HKP} = \frac{2\pi \sin\varepsilon}{4+\pi\sin\varepsilon} . \tag{19}$$

Der Beiwert der Querkraft lautet dann

$$CC_{HKP} = \frac{\pi \sin 2\varepsilon}{4+\pi \sin\varepsilon} \tag{20}$$

oder, als Funktion des Ablenkwinkels $\Delta\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \varepsilon$ und bezogen auf die Druckkraft bei Querströmung, $CD_{q,HKP} = \frac{2\pi}{4+\pi}$,

$$\left(\frac{CC}{CD_q}\right)_{HKP} = \frac{1}{2} \frac{\sin 2\Delta\varepsilon}{\frac{4}{4+\pi} + \frac{\pi}{4+\pi}\cos\Delta\varepsilon} . \tag{21}$$

Über eine Reihenentwicklung um $\Delta\varepsilon = 0$,

$$\left(\frac{CC}{CD_q}\right)_{HKP} \simeq \Delta\varepsilon \left[1 - \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{2}\frac{\pi}{4+\pi}\right)\Delta\varepsilon^2\right] , \tag{22}$$

gewinnt man den Ansatz

$$\frac{CC}{CD_q} = \Delta\varepsilon\,(1 - \lambda\,\Delta\varepsilon^2) . \tag{23}$$

Bild 5 zeigt die Kurvenschar für λ = const.

Dieser Funktion folgt die Querkraft an Schiffen von quereinfallendem Wind (CC = 0) bis zum Querkraftmaximum. Eine obere Grenze ist

$$\frac{CC}{CD_q} = \mathrm{tg}\,\Delta\varepsilon , \tag{24}$$

entsprechend $\lambda \simeq -0{,}45$. Der Koeffizient λ hängt vom Schiffstyp ab.

Für die Helmholtz-Kirchhoff-Platte ist $\lambda = 0{,}45$.

Das Querkraftmaximum liegt bei einem Anströmwinkel $\varepsilon = \varepsilon_{CC_{max}}$ um 45° (Bild 6). Je nachdem, ob der Ablenkparameter mit ε zunimmt oder abnimmt, wird das Maximum von CC zu einem etwas höheren oder niedrigeren Winkel verschoben.

Das Querkraftmaximum ist selbst Punkt der Kurvenschar Gl. (23). Es läßt sich noch mit dem Ablenkparameter verknüpfen. Unter Verwendung von Gl. (9) erhält man mit $\varepsilon = \varepsilon_{CC_{max}} = \frac{\pi}{4}$

$$\frac{CC_{max}}{CD_q} = \operatorname{arctg} \frac{a}{2-a} \left[1 - \lambda \left(\operatorname{arctg} \frac{a}{2-a}\right)^2\right] . \qquad (25)$$

Man kann erwarten und findet in Bild 5 bestätigt, daß gemessene Querkraftmaxima in einem Bereich liegen, der begrenzt ist durch $\operatorname{tg} \Delta\varepsilon$ und die Verbindungslinie aller Maxima der Kurvenschar Gl. (23),

$$\left(\frac{CC}{CD_q}\right)_{max} = \frac{2}{3}\, \Delta\varepsilon \ , \qquad (26)$$

für $\Delta\varepsilon < \frac{\pi}{4}$, sonst $\Delta\varepsilon = \frac{\pi}{4}$, wegen $a \leq 1$.

Deutlich tritt das Querkraftmaximum neben dem Ablenkparameter als weiterer kennzeichnender Parameter hervor; damit stehen zwei Kennwerte, als Ausdruck für Betrag und Richtung der Windkraft am Schiff, zur Verfügung. Im nächsten Schritt geht es um ihre Identifikation und die formelmäßige Darstellung der Windkräfte. Zuvor aber kehren wir noch einmal zur Kraftablenkung zurück.

Ablenkung der Strömungskraft durch Auftriebs- oder Querkräfte ist kennzeichnend für viele Objekte. An Flügeln und Segeln wird sie genutzt, am Automobil ist sie unerwünscht. Der Ablenkwinkel ist gleichsam natürliche Koordinate der Strömungskräfte.

Den gleichen Verlauf der Kraftablenkung wie am Schiff - über und unter Wasser - beobachtet man an allen länglichen Objekten. Trossen zählen ebenso dazu wie die Fäden in einem Netz. Bild 7 zeigt in Beispielen den Verlauf des Ablenkparameters für diese Objekte. Allen gemeinsam sind vom Anströmwinkel weitgehend unabhängige Parameterwerte a .

Für gedrungene Quader scheint dagegen eine lineare Abnahme des Ablenkparameters typisch zu sein. Das gilt auch für die Ablenkung der Windkraft an einem rechteckförmigen Halbtaucher (Bild 7). Kraftablenkung an schräg angeströmten Quadern läßt an Automobile im Seitenwind denken. Je kleiner der Ablenkparameter bei unverändertem Widerstandsbeiwert ist, um so weniger empfindlich ist ein Auto gegen Wind. Vom Ablenkparameter ließe sich also schließen auf die Seitenwindempfindlichkeit eines Automobils.

Ein besonders anschauliches Bild vermittelt der Ablenkwinkel vom Windantrieb. Bild 8 zeigt eine vollständige Ansicht der Kraftablenkung gegenüber der Strömung ($-\frac{\pi}{2} \leq \Delta\varepsilon \leq \frac{\pi}{2}$). Eingefügt sind Kurven $\Delta\varepsilon(\varepsilon)$ für a = const (Gl. (9)), wenn sie auch außerhalb $0 \leq (\frac{a}{a'}) < 1$ (Bild 3) kaum praktische Bedeutung haben. Zahlenwerte des Ablenkparameters gehen in Punkten, gespiegelt an der Linie a = 0 und an der Verbindungslinie maximaler Ablenkwinkel für a = const, durch

$$a' = \frac{1}{1 - \frac{1}{a}} \qquad (27)$$

ineinander über.

Bei reinem Widerstand ist $\Delta\varepsilon = 0$ (a = 0). Im Grenzfall $\Delta\varepsilon = \pm\frac{\pi}{2}$, wirkt die Kraft quer zur Strömung (reine Querkraft), wie am rotierenden Zylinder in idealer Flüssigkeit. Bei $\Delta\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \varepsilon$ steht die Strömungskraft quer zum Objekt (reine Seitenkraft). Ferner bedeutet $\Delta\varepsilon = -\varepsilon$ (a' = 1) reinen Längswiderstand. Es ist $\Delta\varepsilon > \frac{\pi}{2} - \varepsilon$ das Gebiet der Vordrift (Segeln) und $\Delta\varepsilon < \frac{\pi}{2} - \varepsilon$ das Gebiet der Abdrift.

Bild 9a zeigt den Verlauf des Ablenkwinkels für ein Frachtschiff mit Zusatzantrieb durch Flettner-Rotoren bzw. Segel. In Bild 9b ist die Querkraft über dem Ablenkwinkel aufgetragen. Schiff mit Rotoren, Rotoren stillstehend: Ablenkwinkel und Querkraft zeigen den von Schiffen her bekannten Verlauf. Rotoren mit gleicher Drehzahl, Umfangsgeschwindigkeit/Anströmgeschwindigkeit = 3: Geringe Abhängigkeit des Ablenkwinkels vom Anströmwinkel, vergleichsweise geringe Änderung auch der Querkraft; das heißt, die Windkräfte am Schiff werden von den Rotoren beherrscht. Schiff mit Segeln, optimale Segelstellung: Auch hier beherrschen die Segel die Windkräfte am Schiff, kenntlich am linearen Verlauf des Ablenkwinkels. Bis zum Schnittpunkt des Ablenkwinkels mit der Linie a = 1 kann an den Wind gegangen werden, in diesem Fall mit Rotoren wie mit Segeln bis etwa $\varepsilon = 30°$.

3. Kraftellipse

Einen wichtigen Hinweis zur Identifikation der beiden Windkraftkennwerte Ablenkparameter und Querkraftmaximum gibt bereits Gl. (8). Aus der naheliegenden Annahme, daß sich Längskraft und Seitenkraft zueinander verhalten wie die entsprechenden Komponenten der Windgeschwindigkeit, folgt

$$a = 1 - \frac{CD_l}{CD_q}, \qquad (28)$$

wobei CD_l, CD_q der Beiwert des Längs- bzw. Querwiderstandes ist. Diesen grundlegenden Zusammenhang von Kraftablenkung und Kräften, folgend Deflektionsbeziehung genannt, findet man in Bild 10 aus Meßdaten grob bestätigt. Aufgetragen ist der Ablenkparameter der mittleren Ablenkung, kurz: mittlerer Ablenkparameter $\bar{a}$.

Ferner wird das Querkraftmaximum auf $\varepsilon = \frac{\pi}{4}$

$$\frac{CC_{max}}{CD_q} = \frac{a}{2}. \qquad (29)$$

Bild 11 zeigt gemessene Werte, aufgetragen über dem mittleren Ablenkparameter. Sie liegen über Gl. (29). Der Grund liegt in der, deutlich konischen, Wirbelströmung an Schiffen bei schrägeinfallendem Wind. Der Wirbel ist um so kräftiger, je kompakter und höher ein Schiff ist, jedoch ohne tiefe Lücken wie bei Containerstapeln üblich. Daher findet man auch die höchsten Werte CC_{max}/CD_q an Fährschiffen und ähnlichen Schiffen. Aber Gl. (24), die auch für das Querkraftmaximum gilt, wird nicht überschritten. Dies ergibt

$$\frac{CC_{max}}{CD_q} \leq \frac{a}{2-a}. \qquad (30)$$

Die Gleichungen (29) und (30) kann man verallgemeinern zu

$$\frac{CC_{max}}{CD_q} = \frac{\bar{a}}{2-\delta\bar{a}}, \qquad (31)$$

mit $0 \leq \delta \leq 1$. Der Wert δ , im folgenden Querkraftkoeffizient genannt, hängt vom Schiffstyp ab.

Einem späteren Ergebnis vorgreifend, wird die Deflektionsbeziehung Gl. (28) erweitert zu

$$\bar{a} = 1 - \alpha \frac{CD_l}{CD_q} , \qquad (32)$$

mit $\alpha < 2$, folgend Deflektionskoeffizient genannt. Auch dieser Koeffizient hängt vom Schiffstyp ab.

Damit sind die kennzeichnenden Windkraftparameter $\bar{a}$ und CC_{max} bzw. α und δ auf das Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand, CD_l/CD_q, zurückgeführt.

Für den mittleren Ablenkparameter kann man nach Gl. (11) den maximalen Ablenkwinkel

$$\Delta\varepsilon_{max} = \arcsin \frac{\bar{a}}{2 - \bar{a}} \qquad (33)$$

setzen. Der maximale Ablenkwinkel ist senkrechte Tangente und das bezogene Querkraftmaximum horizontale Tangente an die Querkraftschleife in Bild 4. Mit den Gln. (31) und (32) folgt aus Gl. (11)

$$\alpha = \frac{1}{CD_l/CD_q} \; \frac{1 - \sin\Delta\varepsilon_{max}}{1 + \sin\Delta\varepsilon_{max}} , \qquad (34a)$$

$$\delta = \frac{1 + \sin\Delta\varepsilon_{max}}{\sin\Delta\varepsilon_{max}} - \frac{1}{CC_{max}/CD_q} . \qquad (34b)$$

In Anhang B wird in einem Beispiel gezeigt, wie man in einfacher Weise Windlastparameter aus der kennzeichnenden Auftragung gewinnt (Beispiel 1). Alle Zahlenwerte dieser Untersuchung zu Windlastparametern wurden durch Regression ermittelt.

Als ein Prinzip nutzbar ist, daß sich die Strömungskräfte an länglichen Objekten durch die Gleichung einer Ellipse, vergleichbar der Polaren,

$$\left(\frac{CD - CD_l \cos^2\varepsilon}{CY}\right)^2 + \frac{1}{\left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right)^2} \left(\frac{CC}{CY}\right)^2 = 1 \qquad (35)$$

annähern lassen, folgend Ellipsenprinzip genannt. Bild 12 zeigt eine Auftragung für drei Schiffe. Auch hier ist das Containerschiff

Musterfall. Ein gewisser Mangel des Ansatzes ist, daß eine allen Komponenten gemeinsame Winkelabhängigkeit verlorengeht. Sie wird später empirisch ersetzt.

Mit

$$CD = CT\cos\Delta\varepsilon\,,\quad CC = CT\sin\Delta\varepsilon\,,$$
$$CX = CT\cos(\varepsilon+\Delta\varepsilon)\,,\quad CY = \sin(\varepsilon+\Delta\varepsilon) \tag{36}$$

erhält man aus Gl. (35) als Basislösung, gekennzeichnet durch einen Strich,

$$CT' = CD_l \frac{\cos^2\varepsilon}{\cos\Delta\varepsilon - \left[\sin^2(\varepsilon+\Delta\varepsilon) - \dfrac{\sin^2\Delta\varepsilon}{\left(1-\dfrac{CD_l}{CD_q}\right)^2}\right]^{1/2}} \,. \tag{37}$$

Aus $CT/CD_q = 1$ für $\varepsilon \to \frac{\pi}{2}$ folgt mit Gl. (9)

$$\bar{a}_{1,2} = \left(1-\frac{CD_l}{CD_q}\right)^2 \left(1 \pm \frac{\dfrac{CD_l}{CD_q}}{1-\dfrac{CD_l}{CD_q}}\right) \,. \tag{38}$$

Die erste Lösung ist die Deflektionsbeziehung Gl. (28); die zweite,

$$\bar{a}_2 = \left(1-\frac{CD_l}{CD_q}\right)\left(1-2\,\frac{CD_l}{CD_q}\right) \,, \tag{39}$$

eignet sich für Trossen und Netze. In beiden Fällen liegt die Ablenkung mit dem Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand fest.

Dieses Ergebnis deckt sich nicht ganz mit Versuchswerten (siehe Bild 10). Um auch Parameterpaare ($\bar{a}$, CC_{max}/CD_q) zuzulassen, wird in Gl. (35) die kleine Halbachse der Ellipse um einen Faktor (β) erweitert. Entsprechend lautet die erweiterte Basislösung

$$CT' = CD_l \frac{\cos^2\varepsilon}{\cos\Delta\varepsilon - \left[\sin^2(\varepsilon+\Delta\varepsilon) - \dfrac{\sin^2\Delta\varepsilon}{\beta^2\left(1-\dfrac{CD_l}{CD_q}\right)^2}\right]^{1/2}} \tag{40}$$

Aus $CT/CD_q = 1$ für $\varepsilon \to \frac{\pi}{2}$ folgt

$$\frac{1}{2} - \bar{a} + \frac{1}{2}\,\frac{\bar{a}^2}{\beta^2\left(1-\dfrac{CD_l}{CD_q}\right)^2} = \frac{CD_l}{CD_q} \,. \tag{41}$$

Mit $\Delta\bar{a} = \bar{a} - \bar{a}_{1,2}$, $\bar{a}_{1,2}$ nach Gl. (38), erhält man

$$\beta = \frac{1+\dfrac{\Delta\bar{a}}{\bar{a}_1}}{\sqrt{1+2\Delta\bar{a}}} \tag{42}$$

für

$$(1-2\frac{CD_l}{CD_q}) < \bar{a} \leq (1-\frac{CD_l}{CD_q}) , \tag{43}$$

das heißt $1 \leq \alpha < 2$, und

$$\beta = \frac{1+\frac{\Delta\bar{a}}{\bar{a}_2}}{\left[1+\frac{8\Delta\bar{a}}{(\sqrt{8\bar{a}_2+1}-1)^2}\right]^{1/2}} \tag{44}$$

für

$$(\frac{1}{2}-\frac{CD_l}{CD_q}) \leq \bar{a} < (1-2\frac{CD_l}{CD_q}) . \tag{45}$$

Bild 13 zeigt Grenzkurven des Ablenkparameters und Kurven ß = const.

Gleichung (43) führt zur erweiterten Deflektionsbeziehung Gl. (32). Sie wird durch Messungen bestätigt (Bild 10). Unterhalb der unteren Grenze findet man bei Schiffen keine Werte $\bar{a}$. Es ist das Gebiet der Trossen und Netze. Die obere Grenze wird in Einzelfällen überschritten. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Schiffe, für die die Voraussetzung eines konstanten Ablenkparameters allenfalls grob angenähert gilt. Im Gültigkeitsbereich von Gl. (32) ist $ß \leq 1$.

Ein geeigneter Ansatz für die in Gl. (35) verlorene Winkelabhängigkeit ist, in Anlehnung an die Helmholtz-Kirchhoff-Platte,

$$\frac{CT}{CT'} = \frac{1}{1+B\sin^m\varepsilon\cos^n\varepsilon} , \tag{46}$$

wobei für Schiffe m = n = 2. Man erhält

$$\frac{CT}{CT'} = \frac{1}{1+(\frac{CC'_{max}}{CC_{max}}-1)\sin^2 2\varepsilon} , \tag{47}$$

mit dem Querkraftmaximum für die Basislösung, CC'_{max} , und dem tatsächlichen Wert CC_{max} .

Die Gleichungen (40) und (47) ergeben zusammen

$$CT = CD_l \frac{\dfrac{\cos^2\varepsilon}{1+(\frac{CC'_{max}}{CC_{max}}-1)\sin^2 2\varepsilon}}{\cos\Delta\varepsilon - \left[\sin^2(\varepsilon+\Delta\varepsilon) - \dfrac{\sin^2\Delta\varepsilon}{\beta^2(1-\frac{CD_l}{CD_q})^2}\right]^{1/2}} , \tag{48}$$

mit ß nach Gl. (42) und $\Delta\varepsilon$ nach Gl. (9). Fügt man für den

Basiswert CC'_{max} Gl. (29) ein, als Näherung für praktisch alle Werte β, so wird

$$CT = CD_l \frac{\dfrac{\cos^2 \varepsilon}{1 - \dfrac{\delta}{2}\left(1 - \alpha \dfrac{CD_l}{CD_q}\right) \sin^2 2\varepsilon}}{\cos \Delta\varepsilon - \left[\sin^2(\varepsilon + \Delta\varepsilon) - \dfrac{1 + 2(1-\alpha)\dfrac{CD_l}{CD_q}}{\left(1 - \alpha \dfrac{CD_l}{CD_q}\right)^2} \sin^2 \Delta\varepsilon\right]^{1/2}} , \tag{49}$$

mit

$$\Delta\varepsilon = \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{\operatorname{tg}\varepsilon}{\alpha \dfrac{CD_l}{CD_q}}\right) - \varepsilon . \tag{50}$$

Dieser Ansatz eignet sich gleichermaßen zum Schätzen der Windkräfte wie, unter Verwendung der Gln. (34), zur Approximation von Meßdaten.

4. Giermoment und Rollmoment

Die Hebel der Windmomente am Schiff, nach den Gln. (4) und (6) gebildet mit der Seitenkraft, sind in gewissem Grade formale Größen. Denn zum Rollmoment tragen auch vertikale Druckkräfte am Schiff bei, und das Giermoment enthält, wenn auch in geringerem Maße, kraftfreie Anteile, Munksches Moment genannt.

Ein anschauliches Beispiel dazu ist die ebene Platte. Bei offenem Totwasser beträgt das Giermoment, als Beiwert nach Gl. (2), (siehe Lamb, 1952),

$$CN_{HKP} = \frac{\frac{3}{4}\pi \sin 2\varepsilon}{(4 + \pi \sin \varepsilon)^2} . \tag{51}$$

Es hat keinen kraftfreien Anteil. Ohne Ablösung lautet das nun rein Munksche Moment

$$CN_{Munk} = \frac{\pi}{4} \sin 2\varepsilon . \tag{52}$$

Das Verhältnis der beiden Momente ist

$$\frac{CN_{HKP}}{CN_{Munk}} = \frac{3}{(4+\pi \sin \varepsilon)^2} , \tag{53}$$

Dies ergibt für $\varepsilon = 0°, 30°, 60°, 90°$ Werte von 20, 10, 7 und 6 %.

Die Windmomente hängen im allgemeinen stärker von Besonderheiten der Schiffe ab als die Windkräfte. Zusammenhänge sind daher weniger ausgeprägt und die Identifikation von Momentenparametern ist weniger scharf.

Ein deutlicher Zusammenhang aber besteht zwischen dem Hebel des Giermoments bei Querströmung und der horizontalen Lage des Lateralschwerpunktes S_1. In guter Annäherung gilt, daß die Seitenkraft auf der Höhe des Schwerpunktes angreift (Bild 14).

Das verbleibende Giermoment um die Momentenachse bei Querströmung ist

$$\Delta N = N - x_{F,q}\, Y , \tag{54}$$

bzw. dimensionslos

$$\Delta CN = CN - \frac{x_{F,q}}{L_{OA}}\, CY , \tag{55}$$

mit $x_{F,q}$ Hebel bei Querströmung. Entsprechend Gl. (5) lautet der Hebel

$$\frac{\Delta x_F}{L_{OA}} = \frac{N}{Y L_{OA}} - \frac{x_{F,q}}{L_{OA}} = \frac{CN}{CY} - \frac{x_{F,q}}{L_{OA}} . \tag{56}$$

Bild 15 zeigt den Hebel für ein Containerschiff, ein Fährschiff und ein Offshore-Versorgungsschiff.

Zwei Eigenschaften von Δx_F fallen auf: Die Änderung mit dem Anströmwinkel bei quereinfallendem Wind, $(dx_F/d\varepsilon)_q = (dx_F/d\varepsilon)_{\varepsilon=\pi/2}$, ist für alle untersuchten Schiffe, Bohrschiffe ausgenommen, in etwa gleich. Signifikante Unterschiede lassen sich nicht erkennen. Im Mittel ist

$$\frac{1}{L_{OA}} \left(\frac{dx_F}{d\varepsilon} \right)_q = -0{,}18 \ . \tag{57}$$

Für die Helmholtz-Kirchhoff-Platte erhält man -0,105. Dieser Wert scheint auch für Platten in realer Strömung zuzutreffen (Bild 16). Von ähnlicher Größe ist der Wert für Bohrschiffe und am Schiffsrumpf.

Die zweite Eigenschaft betrifft den Verlauf des Hebels über dem Windeinfallswinkel. Im allgemeinen ist Δx_F bei vorlichem Wind größer als bei achterlichem Wind immer dann, wenn der Schwerpunkt der Lateralfläche vor Hauptspant liegt, und umgekehrt. Zu einem geeigneten Parameter führt die Helmholtz-Kirchhoff-Platte. Hierfür erhält man aus den Gln. (19) und (51)

$$\left(\frac{x_F}{B}\right)_{HKP} = \frac{3}{16} \ \frac{\cos\varepsilon}{1+\frac{\pi}{4}\sin\varepsilon} \ , \tag{58}$$

mit B Breite der Platte. Entsprechend wird für Schiffe angesetzt

$$\Delta x_F = \Delta x_{F,l} \ \frac{\cos\varepsilon}{1+\gamma\sin\varepsilon} \ . \tag{59}$$

Es ist $\Delta x_{F,l} = \lim\limits_{\varepsilon \to 0,\pi} \Delta x_F$ der Hebel bei Längsströmung. Dieser Grenzhebel läßt sich nicht messen, aber aus Messungen ermitteln. Der Koeffizient γ , folgend Giermomentenkoeffizient genannt, kennzeichnet den Giermomentenverlauf. Für $\gamma = 0{,}618$ ändert sich der Hebel praktisch linear. Wenn $\gamma > 0{,}618$, wächst Δx_F überproportional, und umgekehrt. An der Helmholtz-Kirchhoff-Platte ist $\gamma = \frac{\pi}{4} = 0{,}785$. Es gilt

$$\gamma = \left| \frac{\Delta x_{F,l}}{\left(\frac{dx_F}{d\varepsilon}\right)_q} \right| - 1 \ . \tag{60}$$

Bild 17 enthält aus Messungen gewonnene Werte für den Grenzhebel $\Delta x_{F,l}$, aufgetragen über der Lage des Lateralschwerpunktes gegenüber Hauptspant.

Bild 15 zeigt in Beispielen den Verlauf des Rollmomentenhebels, Gl. (7), am aufrecht schwimmenden Schiff über dem Windeinfallswinkel. Kennzeichnend dafür ist das Verhältnis des Hebels bei quereinfallendem Wind, $z_{F,q}$, zur Höhe des Lateralschwerpunktes über der Schwimmwasserlinie, s_h

$$\varkappa = \frac{z_{F,q}}{s_h} , \qquad (61)$$

folgend Rollmomentenkoeffizient genannt.

Im Mittel nimmt κ mit dem Verhältnis von Schiffsbreite zur (mittleren) Schiffshöhe, B/H_M , zu (Bild 18). Einzelheiten der Schiffsüberbauung haben einen starken Einfluß. Das bestätigen auch Messungen an einem Quader mit Schiffsabmessungen ($B/L = 0{,}15$) mit und ohne Schanzkleid. Sie sind in Bild 18 hinzugefügt. An Platten mit Bodenplatte liegt der Druckpunkt der Strömung unter dem Flächenschwerpunkt ($\kappa < 1$), (Bild 16).

5. Modell und Wirklichkeit

Schiffe sind über Wasser überwiegend kantig. Daher spielt die Reynoldszahl der Umströmung nur eine untergeordnete Rolle, und Windkanalversuche können an relativ kleinen Modellen mit mäßigen Windgeschwindigkeiten durchgeführt werden bei Reynoldszahlen um rund zwei Zehnerpotenzen unter dem Wert für die Großausführung. Diese Messungen erfolgen überwiegend in turbulenzarmer Strömung ohne Gradienten. Man kann erwarten, daß die am Modell gemessenen Windlastbeiwerte dann auch für die Großausführung gelten, wenn außerdem die Windkanalströmung die Eigenschaften der Luftströmung hat.

Für schnelle Schiffe bei mäßigem Wind trifft das zu. Der Fahrtwind beherrscht die Kräfte am Schiff. Bei langsamen Schiffen und besonders am Schiff ohne Fahrt ist dagegen der natürliche Wind entscheidend. Der Wind aber ist durch Turbulenz und Gradienten verschieden von der Strömung in normalen Windkanälen. Turbulenz und Windgradient haben einen deutlichen Einfluß auf die Windkräfte an einem Objekt.

Man kann die Eigenschaften des Windes im Windkanal nachbilden und so seine Wirkung auf das Schiff im Modell unmittelbar messen. Wie aber läßt sich der Einfluß des Windes in Beiwerten berücksichtigen, die in einer Strömung ohne Gradienten gewonnen worden sind ?

Das kann, wie Wieghardt (1952) für Oberflächenstörungen in turbulenter Reibungsschicht gezeigt hat, durch einen mittleren Staudruck im Bereich des Objektes geschehen. An Schiffen lassen sich mittlere Staudrücke eindeutig über die mittlere Höhe und, etwas aufwendig, über die Schattenfläche bilden. Mit dem Potenzgesetz für das Profil des natürlichen Windes

$$\frac{u}{u_h} = \left(\frac{z}{z_h}\right)^{1/n} \tag{62}$$

lautet der bezogene mittlere Staudruck über die mittlere Höhe H_M

$$\frac{\bar{q}_H}{q_h} = \frac{n}{n+2} \left(\frac{H_M}{z_h}\right)^{2/n} . \tag{63}$$

Es ist u die mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe z und u_h der Mittelwind, der für die Bezugshöhe $z_h = 10$ m angegeben wird. Entsprechend ist $q_h = \frac{\rho}{2} u_h^2$ der Staudruck des Mittelwindes. Für starken Wind über See ($u_h = u_{10} >$ etwa 6 $\frac{m}{s}$) liegt n zwischen 8 und 12 (Davies und Miller, 1982), ein geeigneter Mittelwert ist $n = 10$ (Wieghardt, 1972).

Da die Windkräfte am Schiff wesentlich durch die Seitenkraft geprägt sind, wenn man von Wind unmittelbar von vorn und von achtern absieht, wird über die mittlere Höhe der Lateralfläche integriert. Der flächengemittelte Staudruck $\bar{q}_A$ wird entsprechend über die Lateralfläche gebildet. Es ist $\bar{q}_A \geq \bar{q}_H$ ($\bar{q}_A = \bar{q}_H$ bei rechteckigem Lateralplan).

Der flächengemittelte Staudruck scheint die Kräfte im Wind besser zu treffen als der Staudruck über die mittlere Höhe. Welche Rolle die Windkanalturbulenz spielt, wird noch gezeigt. Folgerichtig und in der Tendenz zutreffend ist die Umrechnung des

Rollmomentenhebels mit dem Hebel des gemittelten Staudrucks.

Am fahrenden Schiff ist das Profil des scheinbaren Windes verwunden. Hier wählt man (so Blume, 1975) als Strömungsprofil eine koplanare Überlagerung von Fahrtwind und Windprofil mit der Richtung des scheinbaren Windes in der mittleren Höhe des Lateralplans.

Windturbulenz und Windgradient sind insofern untrennbar, als Turbulenz das Windprofil erzeugt. Ihre Wirkung am Modell aber ist, mit Blick auf die Umrechnung von Windlastbeiwerten, sehr wohl zu unterscheiden.

Aus Messungen an einfachen Körperformen (z.B. Roberson et al., 1972) ist bekannt, daß Turbulenz auf den Widerstand scharfkantiger Objekte, die gemeinhin als kennzahlunempfindlich gelten, einen beträchtlichen Einfluß haben kann. Zurückzuführen ist dieses Verhalten auf den mit der Turbulenz der Strömung veränderten Impulsaustausch im gestörten Strömungsbereich am Objekt.

An verschiedenen Schiffsmodellen ist bei Reynoldszahlen um $2 \cdot 10^6$ generell eine Erhöhung des Windwiderstandes mit zunehmender Turbulenz der Strömung gemessen worden. Bild 19 zeigt Messungen am Modell eines Fährschiffes aus turbulenzarmer Strömung (Turbulenzintensität 0,5 %) und turbulenter Strömung (Turbulenzintensität 4 %), erzeugt durch ein Gitter mit horizontalen Stäben in gleichem Abstand.

Reduziert man Windkraftbeiwerte aus der Strömung mit Gradienten auf gleichförmige Strömung ohne Gradienten, so kommen diese Werte im allgemeinen den Meßwerten aus turbulenter Windkanalströmung näher als aus turbulenzarmer Strömung.

Ein Anstieg des Windwiderstandes mit zunehmender Turbulenz bei quereinfallendem Wind scheint im Gegensatz zu stehen zu Meßergebnissen für Leisten mit Rechteckquerschnitt in unbegrenzter Strömung (Roberson et al.,(1972). In der Tat ist der Widerstandsanstieg am Schiffsmodell schwer zu erklären. Zu vermuten ist ein noch unbekannter Einfluß der Reynoldszahl. Bei Reynoldszahlen um 10^4, gebildet mit der Querschnittsbreite, bemerkten Roberson et al. ein deutliches Sinken des Widerstandes mit zunehmender Turbulenz. Aber um 10^5 wurde für eine quadratische Leiste so gut wie kein Einfluß mehr festgestellt (entsprechende Reynoldszahl für das Schiffsmodell, gebildet mit der Schiffsbreite, etwa $2 \cdot 10^5$).

Eine weitere Frage ist der Einfluß eines Windgradienten auf den Verlauf der Kräfte am Schiff. Bild 20 belegt am Beispiel eines Containerschiffes, daß Kraftablenkung und bezogene Querkraft in Strömung mit und ohne Gradienten praktisch übereinstimmen.

Schiffe verhalten sich aerodynamisch wie ein rauhes längliches Objekt. Zwar machen sich einzelne Deckshäuser, Kräne und Gruppen von Containern in den Windkräften durchaus bemerkbar; sie ändern aber nicht deren regulären Verlauf über dem Windeinfallswinkel, solange solche 'Einzelrauhigkeiten' nicht von der Größenordnung des Schiffes selbst sind, wie der Bohrturm auf einem Bohrschiff. Keineswegs läßt sich, wegen Interferenz und Abschirmeffekten, die Wirkung einzelner Bauteile als Bilanz einfach Posten für Posten addieren, wie es für Offshoreplattformen nach Regeln zum Teil üblich ist. Eher ist an einen Einfluß im statistischen Sinne zu denken. Dieses kommt auch darin zum Ausdruck, daß Fläche und Flächenschwerpunktslage, als 0. und 1. Moment der Lateralfläche, für die Windkräfte und Windmomente am Schiff wichtige Bezugsgrößen sind.

Die Erfahrung zeigt, daß man bei Schiffsmodellen für Windkanalmessungen auf Feinheiten verzichten kann. Wichtig ist die getreue Nachbildung von vor allem Volumina und deren Eigenschaften (Körperform, abgerundete, scharfkantige Form).

Eine Frage von grundsätzlicher Bedeutung ist, wie weit man in der Vereinfachung gehen kann, und dennoch den für den Schiffstyp kennzeichnenden Verlauf der Windlastbeiwerte erhält. Dies soll durch zwei Beispiele beantwortet werden.

Heutige Fähr- und Fahrgastschiffe sind ausgeprägt quaderförmig. Der Quader als geräumiges Behältnis ist gewissermaßen Grundform dieses Schiffstyps. Tatsächlich stimmt der Verlauf der Kräfte und Momente am Quader, wie der Vergleich in Bild 21 zeigt, mit dem Verlauf an einem Fährschiff überein, bei achterlichem Wind sogar in Feinheiten, obwohl Quader und Schiff in den Abmessungen nicht aufeinander abgestimmt sind.

Gleiches gilt für das zweite Beispiel. Die Aufbauten von Marineschiffen sind stufenförmig angeordnet. Hier könnte man an ein Prisma denken. Bild 22 gibt dem recht. Der Vergleich läßt deutlich die gleiche Winkelabhängigkeit der Kräfte für ein solches Objekt und für einen Tender erkennen. Für beide Objekte ist der Ablenkparameter praktisch unabhängig vom Anströmwinkel und gleich groß.

6. Parameterwerte und Lastfunktionen

Drei Ansätze für die Windkräfte werden vorgestellt. Sie enthalten folgende Parameter: Widerstandsverhältnis CD_l/CD_q, Ablenkparameter a, bezogenes Querkraftmaximum CC_{max}/CD_q und Winkel des Querkraftmaximums, $\varepsilon_{CC_{max}}$.

Anhaltswerte für den Windwiderstand verschiedener Schiffstypen gibt Tabelle 1. Sie gelten für übliche Bauweise ohne besondere Maßnahmen zur Widerstandsverminderung und - wenn vorhanden - normale Decksladung. Meßwerte für verschiedene Schiffsmodelle enthält Anhang A. Weitere Daten: mittlerer Ablenkparameter in Bild 10, bzw. Deflektionskoeffizient α in Tabelle 2, Querkraftmaximum in Bild 11 bzw. Querkraftkoeffizient δ in Tabelle 2, $\varepsilon_{CC_{max}} \simeq 45°$ (Bild 6).

Favorit ist der Ansatz nach dem Ellipsenprinzip Gl. (48). Die Grenzen für den Ablenkparameter sind durch Gl. (43) gegeben. Mit der vereinfachenden Annahme $\bar{a} = 1 - CD_l/CD_q$ aus Gl. (32) mit $\alpha = 1$ lauten Längs- und Seitenkraft unter Verwendung der Gln. (29) und (47):

$$CX = -CD_l \frac{\cos\varepsilon}{1 + \left(\frac{1}{2}\,\frac{1 - CD_l/CD_q}{CC_{max}/CD_q} - 1\right)\sin^2 2\varepsilon}\,, \qquad (64)$$

$$CY = CD_q \frac{\sin\varepsilon}{1 + \left(\frac{1}{2}\,\frac{1 - CD_l/CD_q}{CC_{max}/CD_q} - 1\right)\sin^2 2\varepsilon}\,, \tag{65}$$

mit

$$\frac{CC_{max}}{CD_q} = \frac{1 - CD_l/CD_q}{2 - \delta(1 - CD_l/CD_q)}\,, \tag{66}$$

und man erhält nach Elimination von CC_{max}, als Näherung für alle Schiffe, die zweiparametrigen Lastfunktionen (Parameter CD_l/CD_q und δ)

$$CX = -CD_l \frac{\cos\varepsilon}{1 - \frac{\delta}{2}\left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right)\sin^2 2\varepsilon}\,, \tag{67}$$

$$CY = CD_q \frac{\sin\varepsilon}{1 - \frac{\delta}{2}\left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right)\sin^2 2\varepsilon}\,. \tag{68}$$

Der zweite Ansatz, folgend Querkraftmethode genannt, ist eine Erweiterung von Gl. (20):

$$CC = CC_{max} \frac{\sin 2\varepsilon}{A + B\sin^m\varepsilon + C\cos^n\varepsilon + D\sin 2\varepsilon\cos 4\varepsilon}\,. \tag{69}$$

Die Werte des Ablenkparameters für Längs- und Querströmung, a_l und a_q, brauchen hierfür nicht übereinzustimmen; jedoch muß $a < 1$ sein. Der Ansatz ermöglicht daher eine feinere Wiedergabe der Ablenkung.

Die Koeffizienten folgen aus der Forderung, daß

1. $\lim\limits_{\varepsilon\to 0} CD = CD_l$, somit

$$A + C = 2\,\frac{CC_{max}}{CD_l}\,\frac{1 - a_l}{a_l} \qquad \text{(abkürzend } \tau\text{)}, \tag{70}$$

2. $\lim\limits_{\varepsilon\to\frac{\pi}{2}} CD = CD_q$, somit

$$A + B = 2\,\frac{CC_{max}}{CD_q}\,\frac{1}{a_q} \qquad \text{(abkürzend } \sigma\text{)}, \tag{71}$$

$\lim\limits_{\varepsilon\to 0} a = a_l$, $\lim\limits_{\varepsilon\to\frac{\pi}{2}} a = a_q$, falls $a(\varepsilon)$, sonst $a_l = a_q = a$,

3. $CC(\varepsilon = \varepsilon_{CC_{max}}) = CC_{max}$, somit

$$A = \frac{\sigma s^m + \tau c^n - sII(1 - D\,s\,IV)}{s^m + c^n - 1} , \tag{72}$$

mit $s^m + c^n - 1 > 0$,

4. $\left(\frac{dCC}{d\varepsilon}\right)_{\varepsilon = \varepsilon_{CC_{max}}} = 0$, somit

$$D = \frac{2(A + Bs^m + Cc^n)\,cII - (mBs^{m-1}c - nCc^{n-1}s)\,sII}{4s^2\,II\,c\,IV} . \tag{73}$$

Abkürzend wurde geschrieben

$$\begin{aligned} s &= \sin \varepsilon_{CC\,max} , \quad c = \cos \varepsilon_{CC\,max} , \\ sII &= \sin 2\varepsilon_{CC\,max} , \quad cII = \cos 2\varepsilon_{CC\,max} , \\ sIV &= \sin 4\varepsilon_{CC\,max} , \quad cIV = \cos 4\varepsilon_{CC\,max} . \end{aligned} \tag{74}$$

Zahlenwerte für die Exponenten m und n findet man durch folgende Überlegung. Für kleine Anströmwinkel um die Schiffslängsachse gilt angenähert

$$CC \propto (CD - CD_l)^{1/m} \tag{75}$$

An der Helmholtz-Kirchhoff-Platte ist $m=2$. Dieselbe Abhängigkeit trifft für Tragflügel zu und für das Flugzeug insgesamt. Für Schiffe ist im Mittel $m = \frac{4}{3}$.

Am quer angeströmten Schiff wird

$$\left(\frac{dCD}{d\varepsilon}\right)_{\varepsilon = \frac{\pi}{2}} = 0 \tag{76}$$

angenommen. Bei Symmetrie um Hauptspant gilt das exakt. Dies erfordert $n > 1$. Ferner muß $\sin^m\varepsilon + \cos^n\varepsilon > 1$ für $0 \le \varepsilon \le \frac{\pi}{2}$ erfüllt sein. Ein geeigneter Wert ist $n=2$.

Der Koeffizient D in Gl. (69) bewirkt, daß das vorgegebene Maximum der Querkraft im vorgegebenen Anströmwinkel $\varepsilon_{CC_{max}}$ zu liegen kommt. In der Regel ist D ein kleiner Wert. Setzt man ihn gleich Null und verzichtet damit auf die genaue Wiedergabe des Querkraftmaximums, so lautet Gl. (72)

$$A = \frac{6s^m + \tau c^n - sII}{s^m + c^n - 1} \quad . \tag{77}$$

Der dritte Ansatz, hier Helmholtz-Kirchhoff-Ansatz genannt, weil er auf den Querkraftverlauf an der Helmholtz-Kirchhoff-Platte, Gl. (22), gründet, ist eine grobe Annäherung. Benötigt werden Längs- und Querwiderstand, CD_l und CD_q, und ein Koeffizient λ für das Querkraftmaximum in Gl. (23).

Die Lastfunktionen der Windkraft werden durch Ablenkung (Gl. (9)) und Querkraft gebildet. Dem Ansatz angemessen, aber nicht notwendig, ist die Annahme $\bar{a} = 1 - CD_l/CD_q$ Der Querkraftverlauf besteht aus zwei Kurvenzügen, die in $\varepsilon = \frac{\pi}{4}$ den gemeinsamen Wert CC_{max} annehmen. Ein Knick im Kraftverlauf an dieser Stelle ist die Folge.

Im Winkelbereich $\frac{\pi}{4} \leq \varepsilon \leq \frac{\pi}{2}$ gilt Gl. (23). Für $0 \leq \varepsilon \leq \frac{\pi}{4}$ wird

$$\frac{CC}{CD_q} = \frac{CC_{max}}{CD_q} \; \frac{\sin^2 \varepsilon}{A + B \sin^{4/3} \varepsilon} \tag{78}$$

angesetzt, wobei

$$\frac{CC_{max}}{CD_q} = \operatorname{arctg} \frac{1 - CD_l/CD_q}{1 + CD_l/CD_q} \left(1 - \lambda \left(\operatorname{arctg} \frac{1 - CD_l/CD_q}{1 + CD_l/CD_q} \right)^2 \right) \tag{79}$$

aus Gl. (23). Für λ kann angenommen werden (Bild 5):
0,15 für Autotransporter, Fährschiffe, Passagierschiffe; 0,30 für Zerstörer, Tender; 0,45 für Containerschiffe, Taucherbasisschiffe, Frachtschiffe, Forschungsschiffe, Offshore-Versorgungsschiffe; 0,60 für Fischkutter, Tanker; 1,5 für Bohrschiffe.

Wegen $\lim\limits_{\varepsilon \to 0} CD = CD_l$ und $CC(\varepsilon = \frac{\pi}{4}) = CC_{max}$ wird in Gl. (78)

$$A = 2 \, \frac{CC_{max}}{CD_q} \; \frac{1}{1 - CD_l/CD_q} \tag{80}$$

und damit

$$B = 2^{3/2} \, (1 - A) \; . \tag{81}$$

Bild 23 zeigt einen Vergleich der Wind-Lastfunktionen für Widerstand und Querkraft mit Meßwerten für ein Containerschiff.

Für den Hebel des Windgiermoments um Hauptspant wird der Ansatz gemacht

$$x_F = S_l + \Delta x_{F,l} \frac{\cos \varepsilon}{1+\gamma \sin \varepsilon} , \tag{82}$$

wobei der Giermomentenkoeffizient

$$\gamma = \left| \frac{\Delta x_{F,l}}{\left(\frac{dx_F}{d\varepsilon}\right)_q} \right| - 1 . \tag{83}$$

Es ist S_l der horizontale Abstand des Lateralschwerpunktes von Hauptspant. Im Mittel gilt $\left(\frac{dx_F}{d\varepsilon}\right)_q = -0{,}18\ L_{OA}$ (für Bohrschiffe $-0{,}10\ L_{OA}$). $\Delta x_{F,l}$ ist der Grenzwert des Hebels für Längsströmung. Zahlenwerte dafür können aus Bild 17 gewonnen werden. Zur ungefähren Eingrenzung ist die empirische Funktion

$$\frac{|\Delta x_{F,l}|}{L_{OA}} = 0{,}25 \pm (\operatorname{sign} S_l)\, 0{,}15 \left[1 - \exp\left(-20 \left|\frac{S_l}{L_{OA}}\right|\right)\right] \tag{84}$$

eingetragen worden.

Der Hebel des Windrollmoments um die Schwimmwasserlinie wird

$$z_F = z_{F,q} = \varkappa S_h , \tag{85}$$

mit S_h Höhe des Lateralschwerpunktes und Rollmomentenkoeffizient κ . Zahlenwerte dafür können Bild 18 entnommen werden.

Ein Anwendungsbeispiel zur Schätzung von Windlastbeiwerten wird in Anhang B gegeben (Beispiel 2). Ein weiterer Anwendungsfall (Beispiel 3) nutzt das Ellipsenprinzip mit $\bar{a} = 1 - CD_l/CD_q$ sowohl für die Windwirkung als auch für die resultierenden Driftkräfte, um den nötigen Schub eines Bugstrahlapparates zum Drehen des Schiffes durch den Wind zu berechnen.

7. Anpassen von Windlastbeiwerten

Mit den Gln. (49) ist bereits ein Ansatz vorgestellt worden, um Meßdaten anzunähern, wobei die Koeffizienten über die Gln. (34) unmittelbar aus der kennzeichnenden Auftragung gewonnen werden. Eine Approximation auch in Feinheiten des Verlaufs ermöglichen die im Folgenden gegebenen Funktionen.

Schiffe können für vorlichen und achterlichen Wind als völlig verschiedene Objekte betrachtet werden; die Kräfte und Momente bei quereinfallendem Wind müssen nur stetig sein. Entsprechend erhält man getrennte Koeffizientensätze für vorliche und achterliche Anströmung. Sie ergeben sich aus der Forderung kleinster quadratischer Abweichungen in den beiden Quadranten des Windeinfalls. Handelt es sich um ein Schiff mit ausgeprägter Seitenunsymmetrie, so wird man die Anpassung auf alle vier Quadranten ausdehnen. Die Koeffizienten sind nun formaler Art.

Der Windkraftvektor wird durch Betrag und Ablenkung gegenüber dem Wind formuliert. Der Betrag, Beiwert CT, wird erzeugt durch Approximation der Projektionen von Seiten- und Längskraft, CY $\sin(\varepsilon+\Delta\varepsilon)$ und CX $\cos(\varepsilon+\Delta\varepsilon)$:

$$CT = CD_q \frac{\sin^{\mu}\varepsilon}{1+A_{CT}\sin^{m}\varepsilon\cos^{p}\varepsilon} + CD_l \frac{\cos^{\nu}\varepsilon}{1+B_{CT}\sin^{n}\varepsilon\cos^{q}\varepsilon} , \tag{86}$$

mit den Beiwerten von Quer- und Längswiderstand, CD_q und CD_l .

Der Ansatz für den Ablenkwinkel ist gleichlautend mit Gl. (9),

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_q \sin\varepsilon + \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}\varepsilon}{1-a}\right) - \varepsilon & \text{für } a < 1 \\ \frac{\pi}{2} - \varepsilon & \text{für } a = 1 \\ \pi + \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}\varepsilon}{1-a}\right) - \varepsilon & \text{für } a > 1 \end{cases} \tag{87}$$

mit der Erweiterung $a \geq 1$, das heißt, es ist auch Längsschub zulässig bei vorlichem Wind und Längswiderstand bei achterlichem

Wind. Für den Ablenkparameter hat sich der Ansatz

$$a = A_{\Delta\varepsilon} + B_{\Delta\varepsilon} \sin^2\varepsilon + C_{\Delta\varepsilon} \sin^2 2\varepsilon \tag{88}$$

bewährt. Die Koeffizienten werden aus der Forderung bestimmt, daß die mittlere quadratische Abweichung für die Näherungsfunktion des Ablenkwinkels, Gl. (87), zum Minimum wird.

Für den Giermomentenhebel wird Gl. (82) erweitert zu

$$x_F = x_{F,q} + L_{OA} \frac{A_{XF} \cos\varepsilon}{1 + B_{XF} \sin\varepsilon + C_{XF} \cos\varepsilon} , \tag{89}$$

wobei, wie bisher, $x_{F,q}$ der Hebel bei Querströmung ist für das Moment um Hauptspant.

Für den Rollmomentenhebel wird ähnlich angesetzt

$$z_F = z_{F,q} + H_M \frac{A_{ZF} \cos\varepsilon}{1 + B_{ZF} \sin\varepsilon} , \tag{90}$$

aber linearer Verlauf angenommen: B_{ZF} = 0,618, mit $z_{F,q}$ Rollmomentenhebel bei quereinfallendem Wind.

Bild 24 zeigt approximierte Windkraft, Ablenkung und Hebel der Windmomente und zugehörige Koeffizienten für ein Fährschiff. In Bild 25 wird mit den gemessenen Windlastbeiwerten verglichen. Ein Anwendungsbeispiel ist in Anhang B enthalten (Beispiel 4).

8. Zusammenfassung

Zwischen den Windkräften und Windmomenten für verschiedene Schiffe besteht kein grundlegender Unterschied. Es ist die gleiche, an allen länglichen Objekten zu beobachtende Abhängigkeit vom Anströmwinkel. Typisch dafür ist die Ablenkung der Strömungskraft gegenüber der Strömung. Dies wird für die formelmäßige Darstellung der Windwirkung am Schiff genutzt. Als erweiterungsfähiger Ansatz erweist sich dabei die klassische mathematische Strömung an der ebenen Platte mit offenem Totwasser.

Diese Strömung auch ermöglicht die Identifikation von Windkraftparametern. Besondere Bedeutung hat dabei das Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand. Ablenkparameter und Querkraftmaximum als kennzeichnende Parameter des Windkraftverlaufs lassen sich darauf zurückführen. Für die Hebel der Windmomente und die sie kennzeichnenden Parameter ist die Schwerpunktslage der Lateralfläche eine wichtige Größe.

Die Abschätzung der aerodynamischen Eigenschaften eines Schiffes wird auf die Bestimmung von sechs Zahlenwerten zurückgeführt. Das sind außer den Beiwerten für Längs- und Querwiderstand vier Koeffizienten für: Windkraftablenkung, Querkraft, Giermoment und Rollmoment. Lastfunktionen liefern dann die Kräfte und Momente am Schiff. Sie lassen sich auch für die Strömungskräfte am Schiffsrumpf verwenden. Eine weitere Nutzanwendung ist die Approximation gemessener Windlastbeiwerte.

Die typische Winkelabhängigkeit der Windkräfte im Windkanalversuch am Modell in Strömung ohne Gradienten gilt auch für das Schiff im natürlichen Wind. Der Einfluß des Windgradienten auf die Windkräfte wird durch einen mittleren Staudruck erfaßt. Noch nicht hinreichend geklärt ist der Einfluß der Windturbulenz.

Ein herzlicher Dank gilt den Mitarbeitern des Instituts, die durch ihre Mithilfe zu diesem Bericht beigetragen haben, insbesondere Frau Liselotte v. Maydell, Frau Ingeborg Jurschek und Frau Ute Schmidt für Schreib- bzw. Zeichenarbeit und Herrn Eberhard Schuckert und Herrn Holger Methner für Messung bzw. Datenverarbeitung.

9. Bezeichnungen

A_F	Frontschattenfläche
A_L	Lateralfläche
a	Ablenkparameter
$\bar{a}$	mittlerer Ablenkparameter
B	Breite, Breite in der Wasserlinie
C	Querkraft
CC	Beiwert der Querkraft
CC_{max}	Beiwert des Querkraftmaximums
CD	Beiwert des Widerstandes
CK	Beiwert des Rollmoments
CD_l	Beiwert des Längswiderstandes
CN	Beiwert des Giermoments
ΔCN	Beiwert des Giermoments um Momentenachse bei Querströmung
CD_q	Beiwert des Querwiderstandes
CT	Beiwert der Windkraft
CX	Beiwert der Längskraft bezüglich A_L
CX_{AF}	Beiwert der Längskraft bezüglich A_F
CY	Beiwert der Seitenkraft
D	Widerstand
H_M	mittlere Höhe der Lateralfläche
K	Rollmoment um die Schwimmwasserlinie
L	Länge
L_{OA}	Länge über alles
N	Giermoment um Hauptspant
ΔN	Giermoment um Momentenachse bei Querströmung
q	Staudruck
q_h	Staudruck in Anemometerhöhe z_h
$\bar{q}_A$	über A_L gemittelter Staudruck
$\bar{q}_H$	über H_M gemittelter Staudruck
S_h	Lateralschwerpunkt über der Schwimmwasserlinie
S_l	horizontaler Abstand des Lateralschwerpunktes von Hauptspant
T	Windkraft
u	Windgeschwindigkeit
u_h	Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe z_h

X	Längskraft
x_F	Hebel des Giermoments N
$x_{F,q}$	Hebel des Giermoments bei Querströmung
Δx_F	Hebel des Giermoments um Momentenachse
$\Delta x_{F,l}$	Grenzhebel des Giermoments bei Längsströmung
Y	Seitenkraft
z_F	Hebel des Rollmoments K
$z_{F,q}$	Hebel des Rollmoments bei Querströmung
α	Deflektionskoeffizient
β	Faktor in der Gleichung der Kraftellipse
γ	Giermomentenkoeffizient
δ	Querkraftkoeffizient
ε	Anströmwinkel, Einfallswinkel des (scheinbaren) Windes
$\Delta\varepsilon$	Ablenkwinkel
κ	Rollmomentenkoeffizient
λ	Koeffizient im Helmholtz-Kirchhoff-Ansatz
ρ	Dichte

Abkürzungen

CAR	Autotransporter
CON	Containerschiff
DES	Zerstörer
DIV	Taucherbasisschiff
DRI	Bohrschiff
FER	Fährschiff
FIS	Fischkutter
FRE	Frachtschiff
PAS	Passagierschiff
RES	Forschungsschiff
SUP	Offshore-Versorgungsschiff
TAN	Tanker
TEN	Tender

10. Literatur

Aage, C. 1971. Wind coefficients for nine ship models. Bericht Nr. A-3, Hydro- and Aerodynamik Laboratory, Lyngby, DK, 14 S.

Blume, P. 1975. Korrektur von Probefahrtsmessungen für Seegangs- und Windeinfluß. Bericht Nr. 328, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Hamburg, D, 35 S.

Davies, M.E., und B.L. Miller. 1982. Wind effects on offshore platforms. Bericht Nr. NMI R 140, National Maritime Institute, Feltham, G.B., 55 S.

Dove, H.L., und G.S. Ferris. 1960. Development of anchors. Transactions, The Royal Institution of Naval Architects, Bd. 102: 535-546.

Helmholtz, H. von. 1868. Über diskontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen. Monatsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, April: 215-228.

Isherwood, R.M. 1973. Wind resistance of merchant ships. Transactions, The Royal Institution of Naval Architects, Bd. 115: 327-338.

Kirchhoff, G. 1869. Zur Theorie freier Flüssigkeitsstrahlen. Journal für die Reine und Angewandte Mathematik, 70: 289-298.

Lamb, H. 1952. Hydrodynamics. Cambridge University Press, London, G.B., 738 S.

Rayleigh, J.W. 1876. On the resistance of fluids. Philosophical Magazine, 1, Dezember.

Roberson, J.A., C.Y. Lin, G.S. Rutherford und M.D. Stine. 1972. Turbulence effects on drag of sharp-edged bodies. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 98, HY7: 1187-1203.

Wagner, B. 1967. Windkräfte an Überwasserschiffen. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Bd. 61: 226-248.

Wilson, C.J., und R.F. Roddy. 1970. Estimating the wind resistance of cargo ships and tankers. Bericht Nr. 3355, Naval Ship Research and Development Center, Washington DC, U.S.A., 28 S.

Wieghardt, K. 1952. Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenrauhigkeiten. Schiffstechnik (1952/1954): 65-81.

Wieghardt, K. 1972. Zum Windprofil über See. Schiffstechnik, Bd. 19: 35-37.

Tabelle 1

Windwiderstand in Längs- und Querrichtung für verschiedene Schiffe, $CD_{l,AF}$ und CD_q *); Anhaltswerte in Einheiten von 0.05. Mit ± 0.05 ist der Bereich üblicher Werte etwa abgedeckt.

Schiffstyp	Kürzel	CD_q	$CD_{l,AF}$ $\varepsilon = 0$	$CD_{l,AF}$ $\varepsilon = \pi$	
Autotransporter	CAR	0.95	0.55	0.60	
Containerschiff	CON	0.90	0.55	0.55	
Zerstörer	DES	0.85	0.60	0.65	
Taucherbasisschiffe	DIV	0.90	0.60	0.80	
Bohrschiffe	DRI	1.00	0.70÷1.00	0.75÷1.10	
Fährschiffe	FER	0.90	0.45	0.50	
Fischkutter	FIS	0.95	0.70	0.70	
Frachtschiffe	FRE	0.85	0.65 0.55	0.55 0.50	Aufbau hinter ⊠ beladen Container an Deck
Passagierschiffe	PAS	0.90	0.40	0.40	
Forschungsschiffe	RES	0.85	0.55	0.65	
Offshore-Versorgungsschiffe	SUP	0.90	0.55	0.80	
Tanker	TAN	0.70	0.90 0.75	0.55 0.55	Aufbau hinten beladen in Ballast
Tender	TEN	0.85	0.55	0.55	

*) Aus Windkanalmessungen am Modell in turbulenzarmer Strömung ohne Gradienten.

Tabelle 2

Deflektionskoeffizient α und Querkraftkoeffizient δ, Anhaltswerte.

Schiffstyp	α	δ
CAR, FER, PAS	1.4	0.80
CON	1.3	0.40
FRE	1.3+) 1.1*)	0.40
TAN	1.0	0.40
DES, TEN	1.2	0.65
DIV, SUP	1.0+) 1.2*)	0.55
RES	1.2	0.60
FIS	1.0	0.40
DRI	1.5	0.10

vorlicher (+), achterlicher (*) Wind

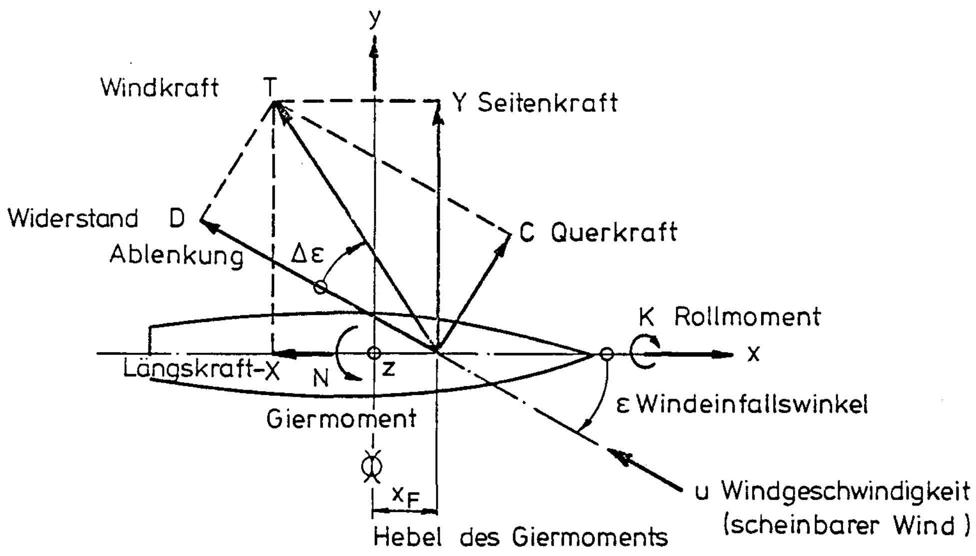


Bild 1 Windkräfte und Windmomente

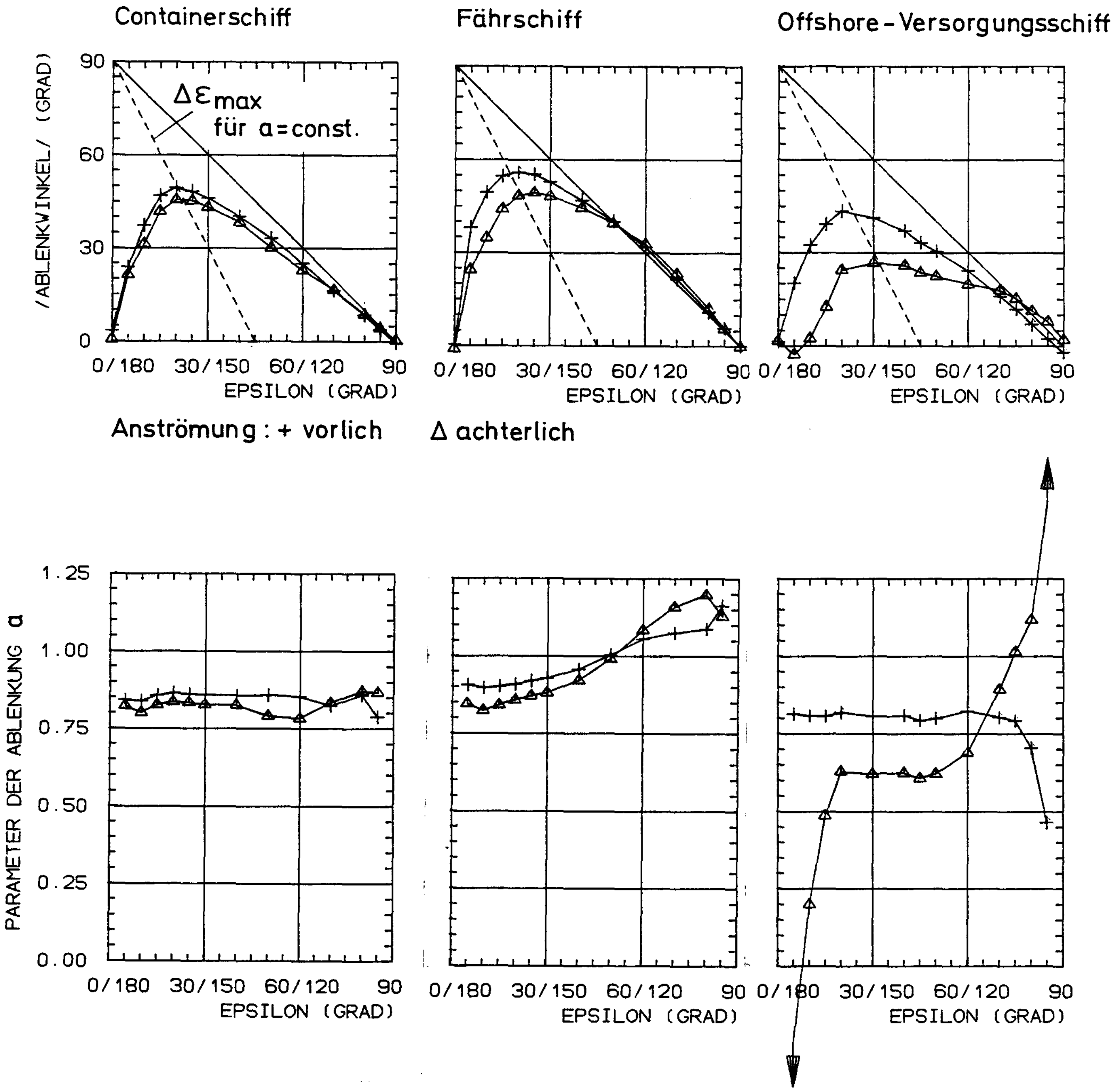


Bild 2 Ablenkwinkel (oben) und Ablenkparameter (unten) über dem Windeinfallswinkel

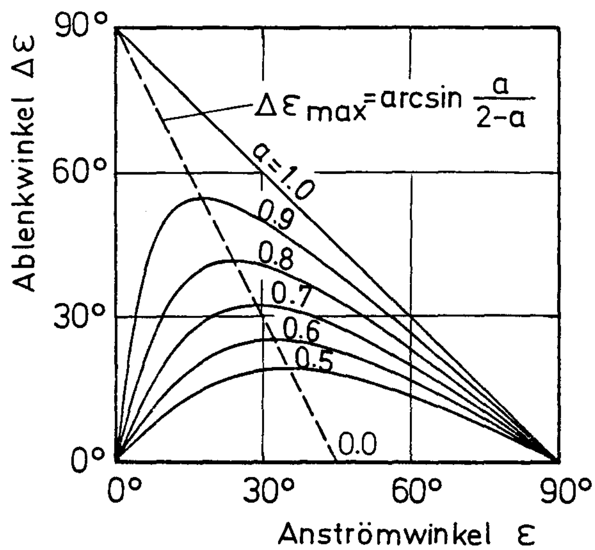


Bild 3 Ablenkwinkel für konstanten Ablenkparameter

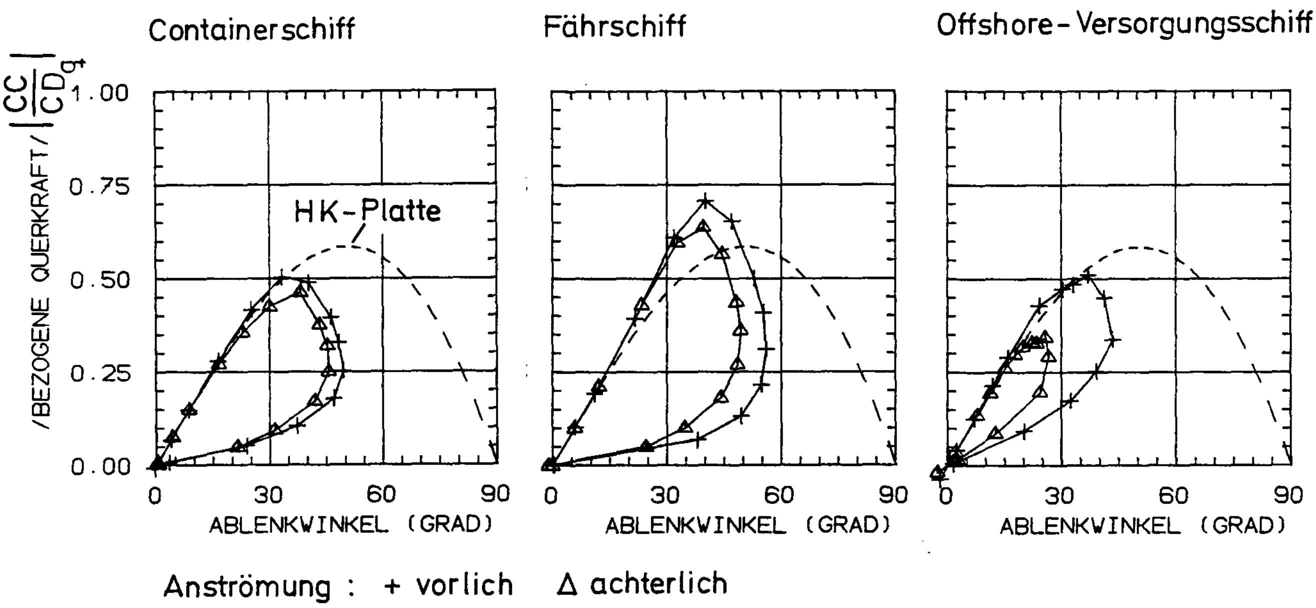


Bild 4 Bezogene Querkraft über dem Ablenkwinkel

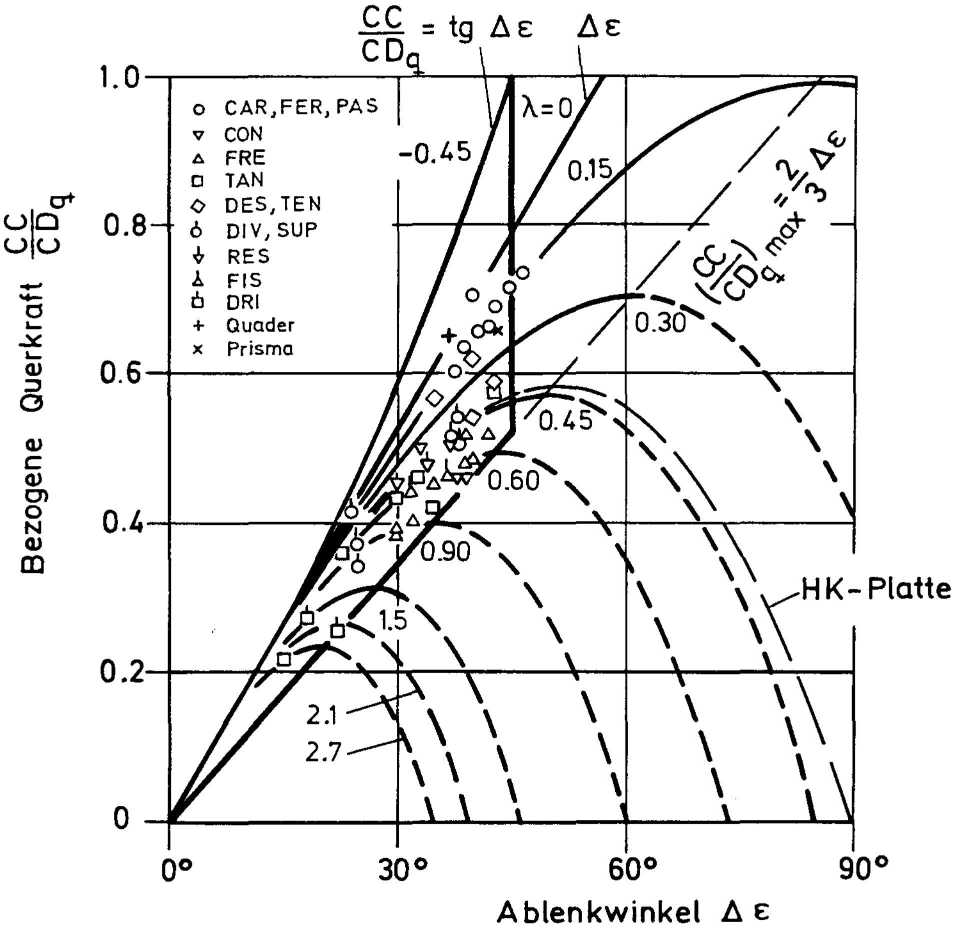


Bild 5 Verlauf der Querkraft über dem Ablenkwinkel nach dem Helmholtz-Kirchhoff-Ansatz und gemessene Querkraftmaxima

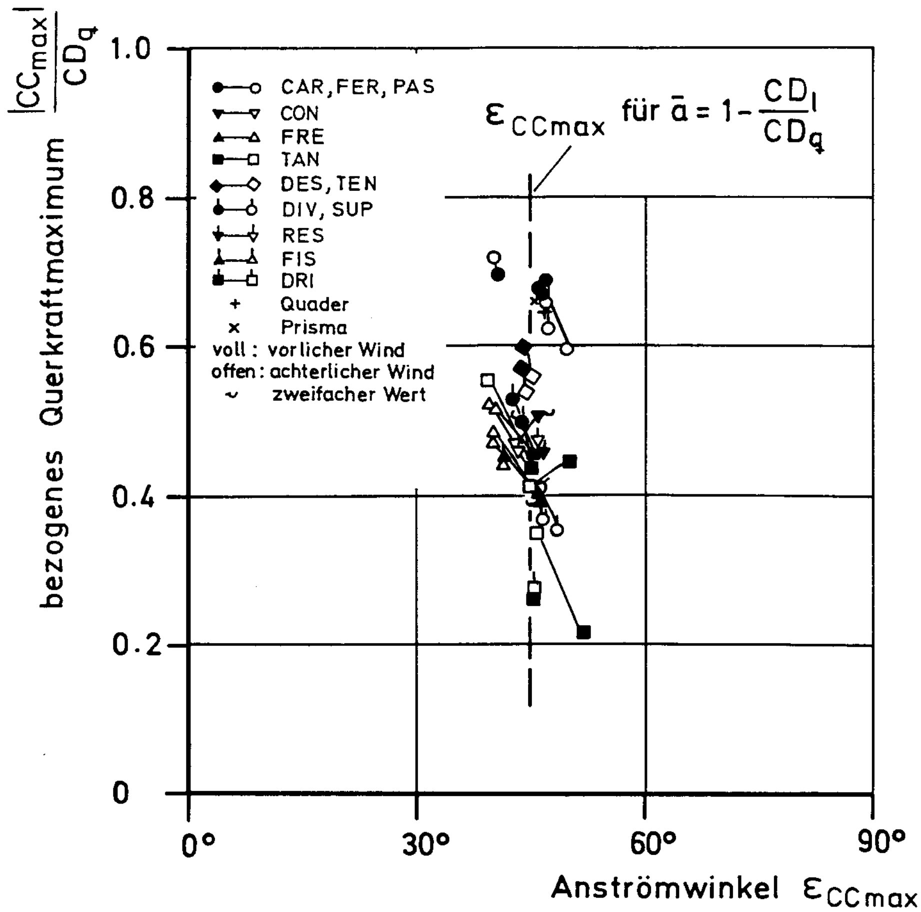


Bild 6 Querkraftmaximum und zugehöriger Anströmwinkel

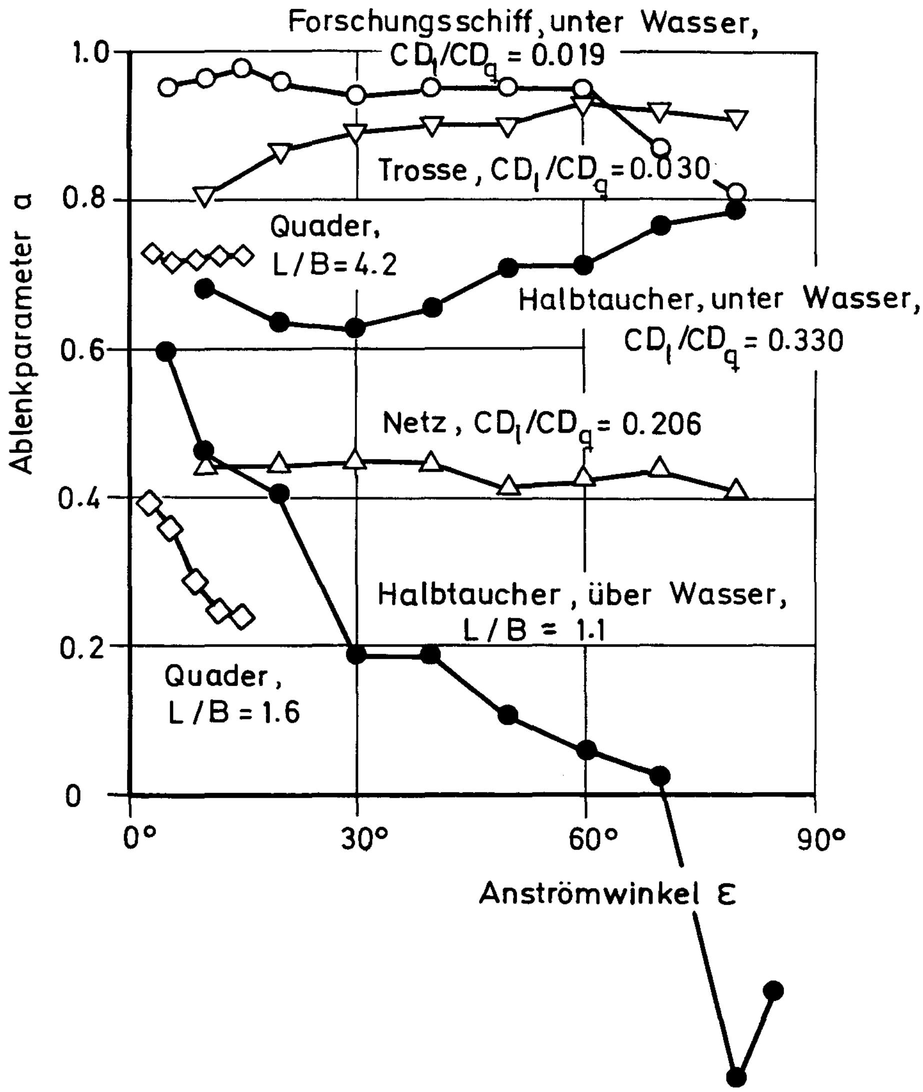


Bild 7 Ablenkparameter über dem Anströmwinkel für verschiedene Objekte

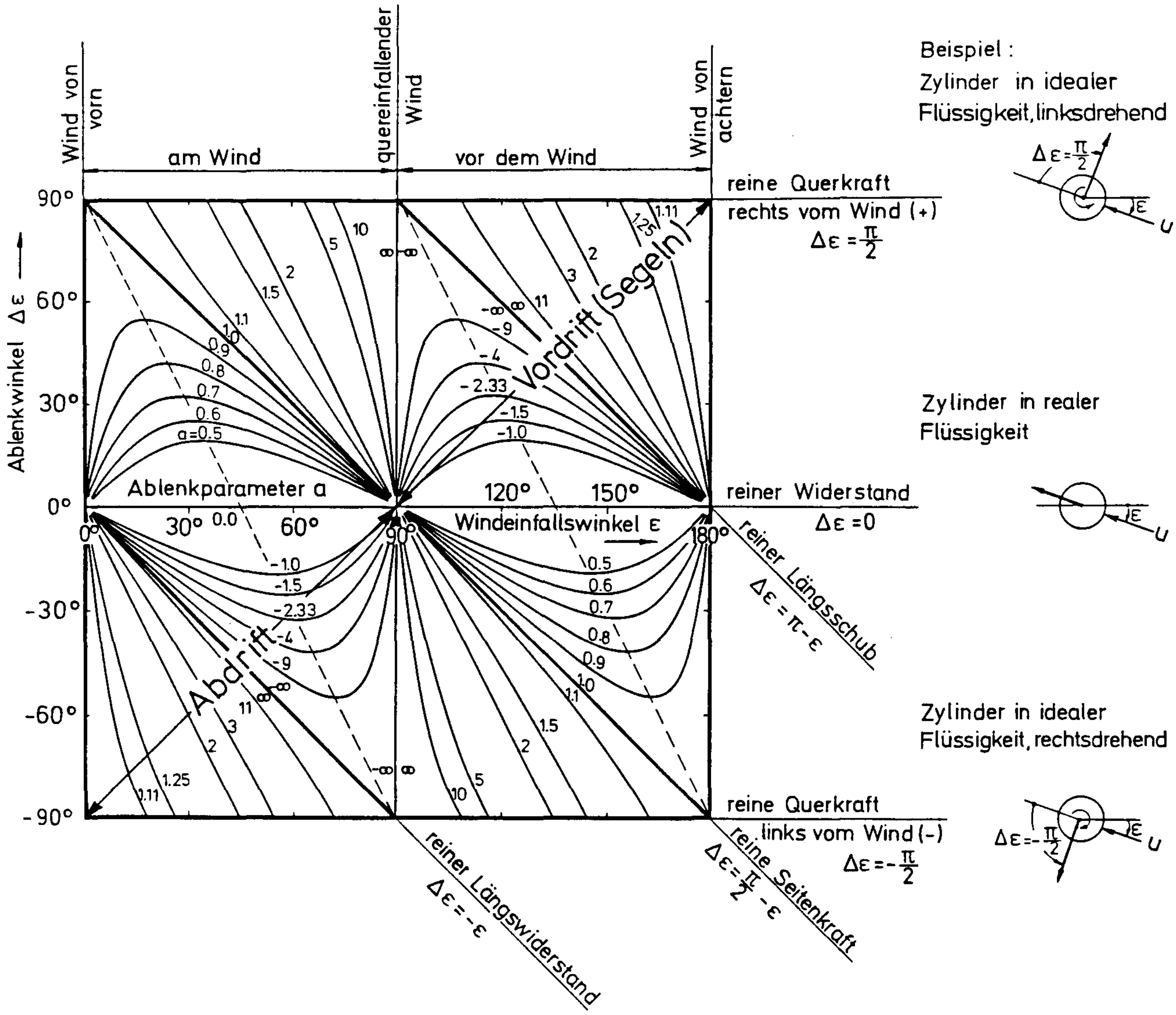


Bild 8 Ablenkung der Strömungskraft gegenüber der Strömung

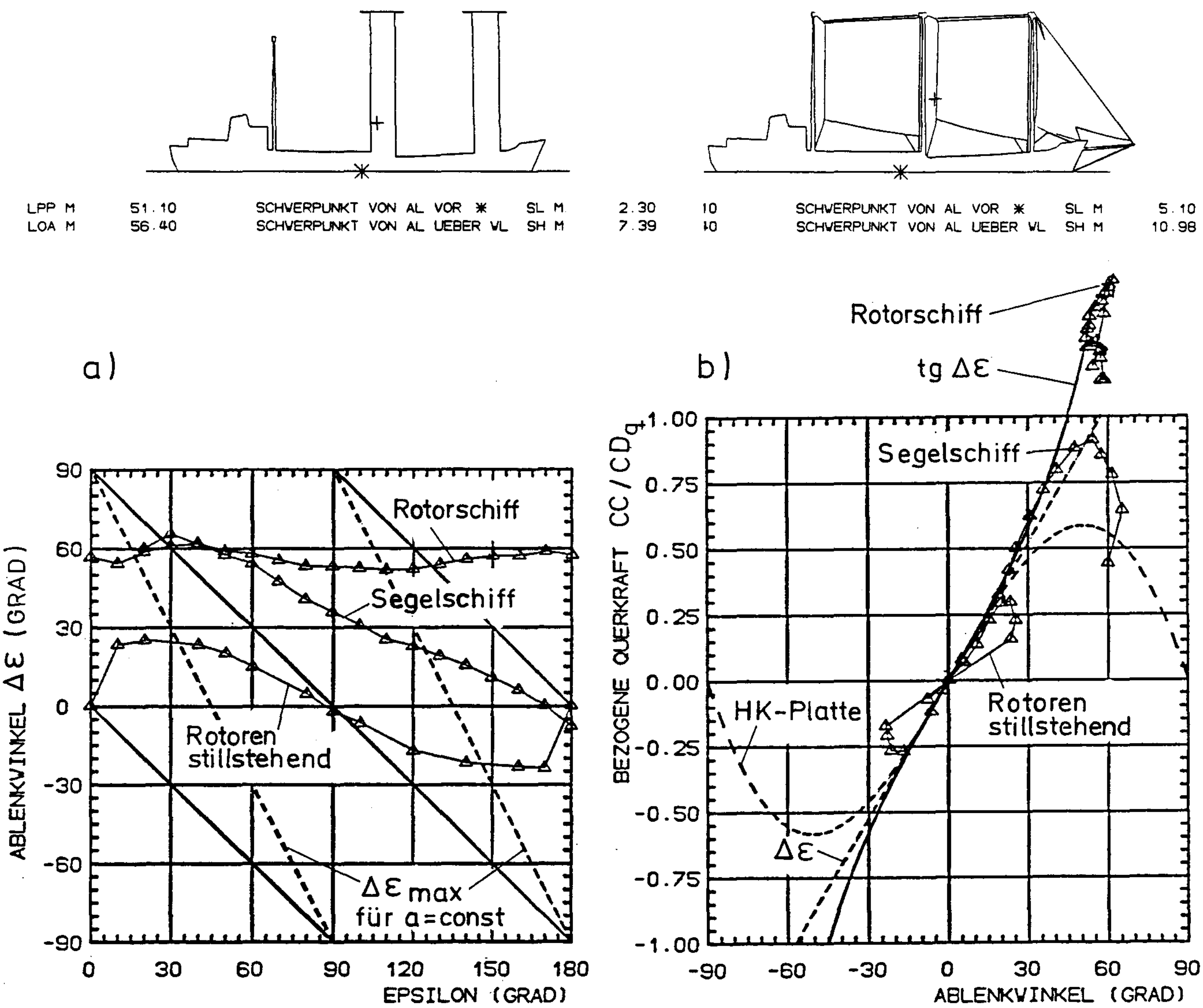


Bild 9 Windkraftablenkung (a) und Querkraft (b) an einem Frachtschiff mit Rotoren (Umfangsgeschwindigkeit/Windgeschwindigkeit = 3) und mit Segeln (optimale Segelstellung)

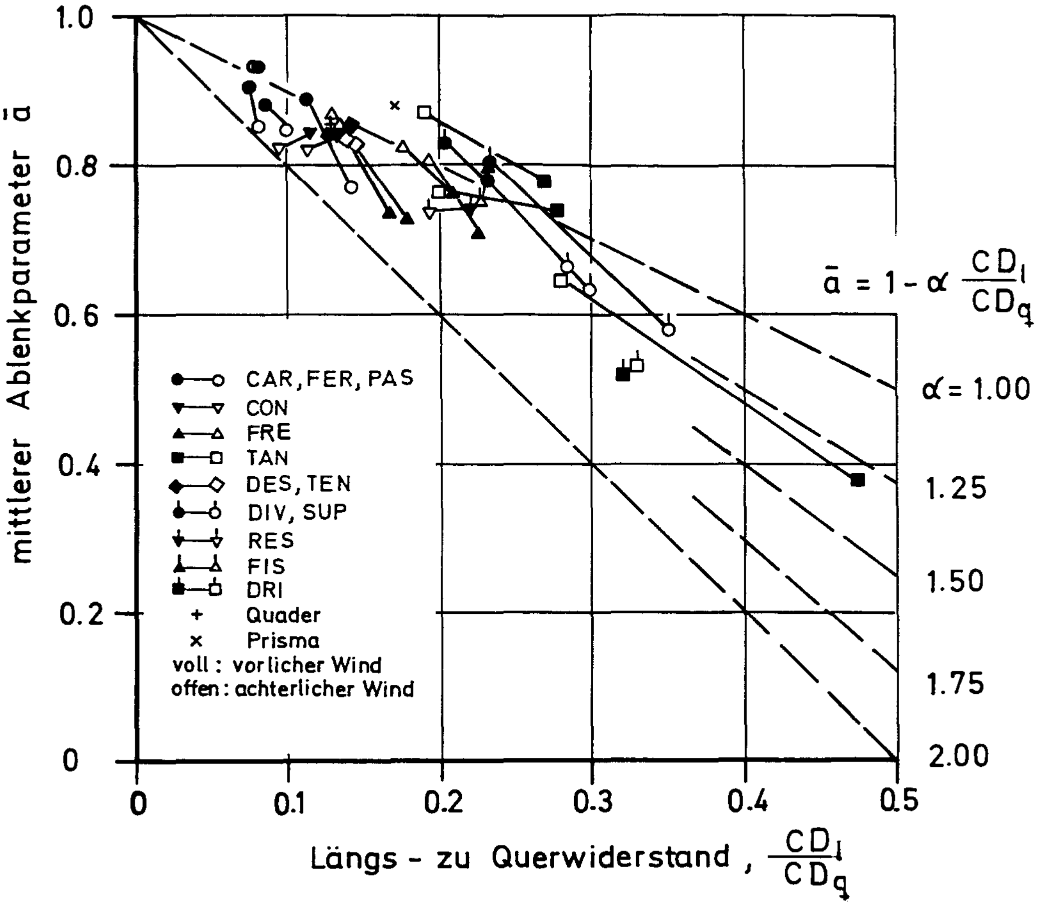


Bild 10 Mittlerer Ablenkparameter über dem Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand

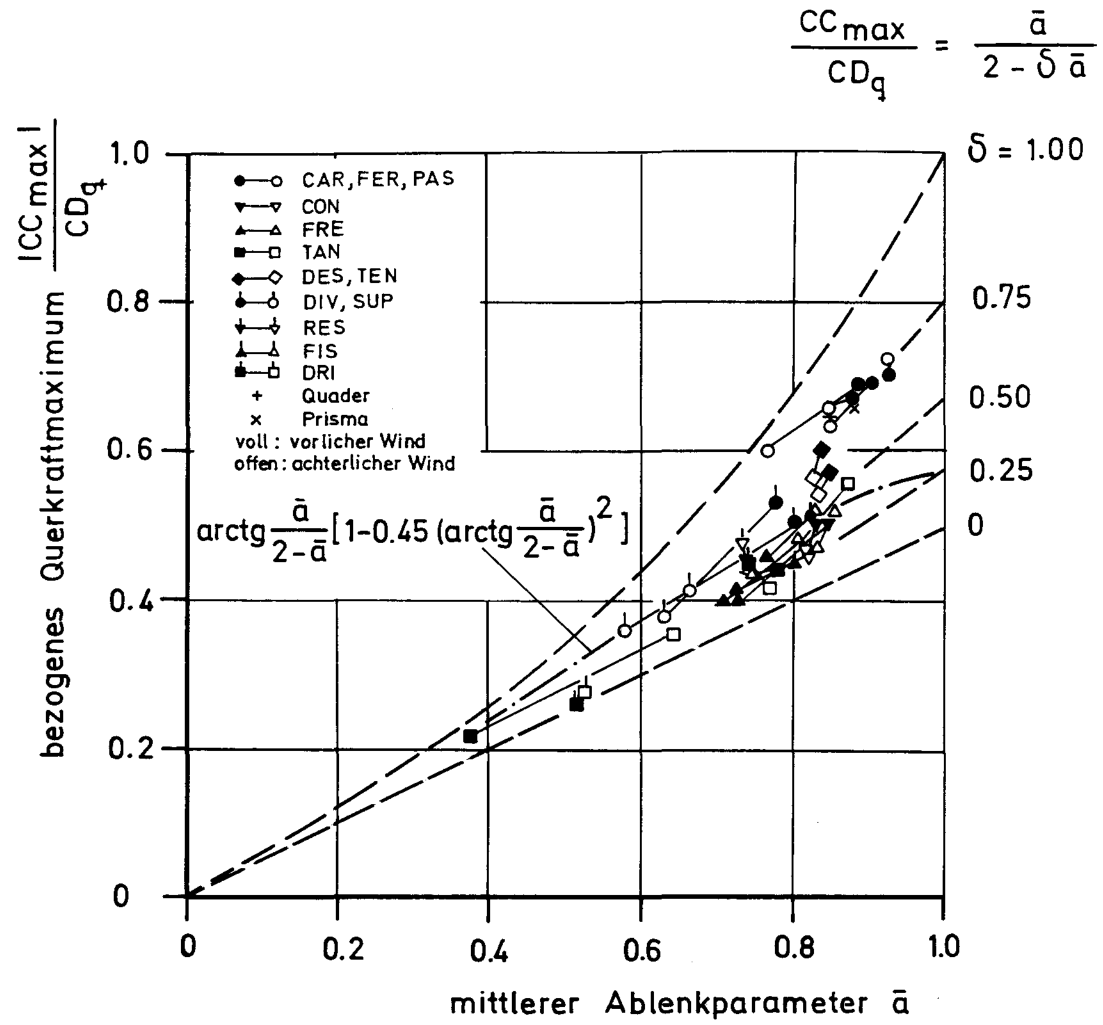


Bild 11 Bezogenes Querkraftmaximum über dem mittleren Ablenkparameter

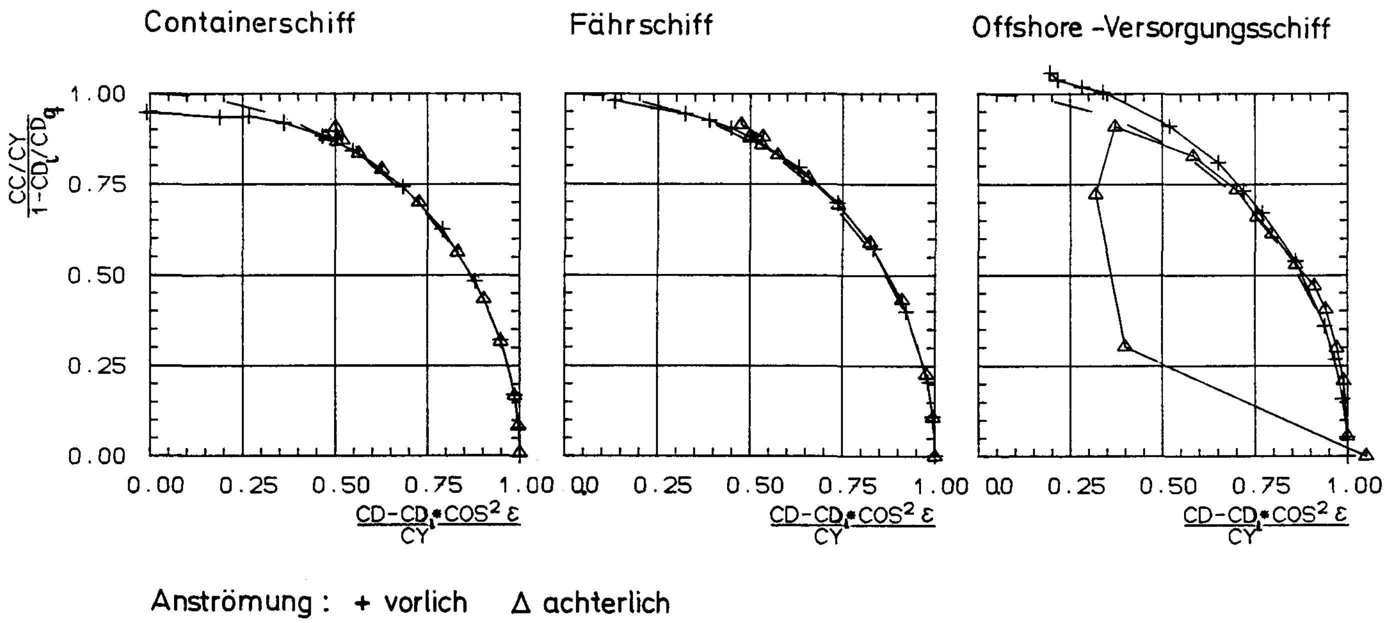


Bild 12 Kraftellipse

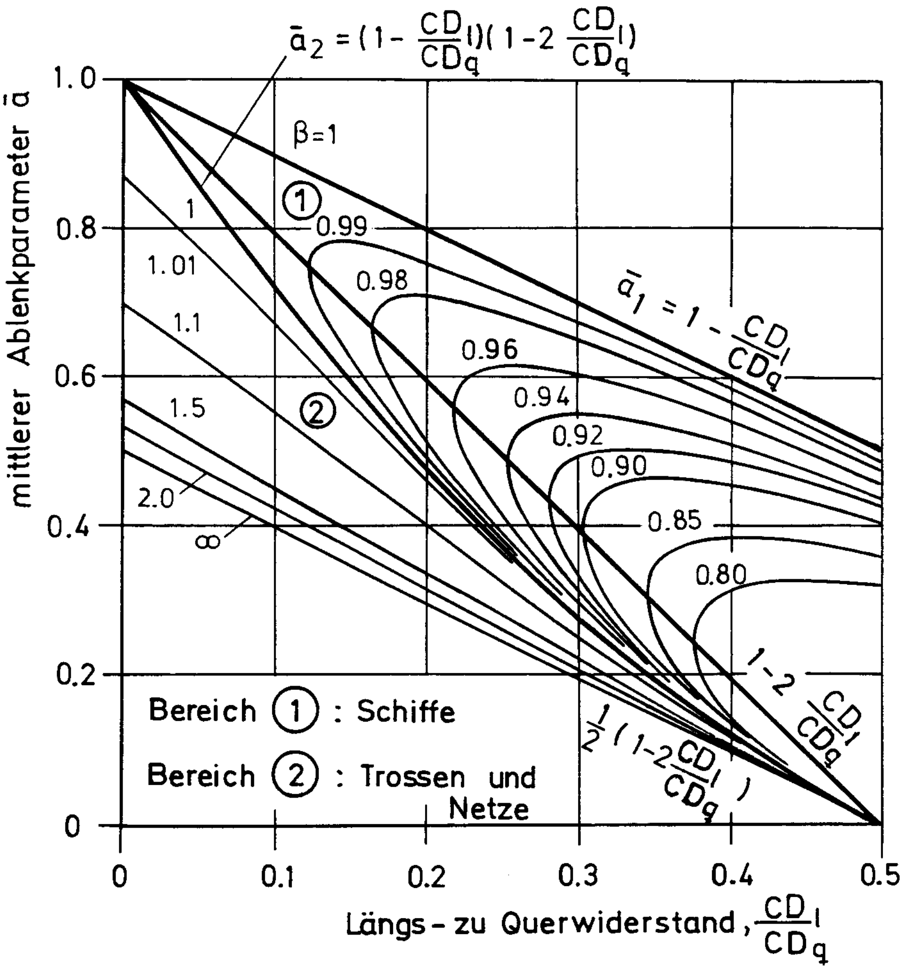


Bild 13 Ablenkparameter und Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand

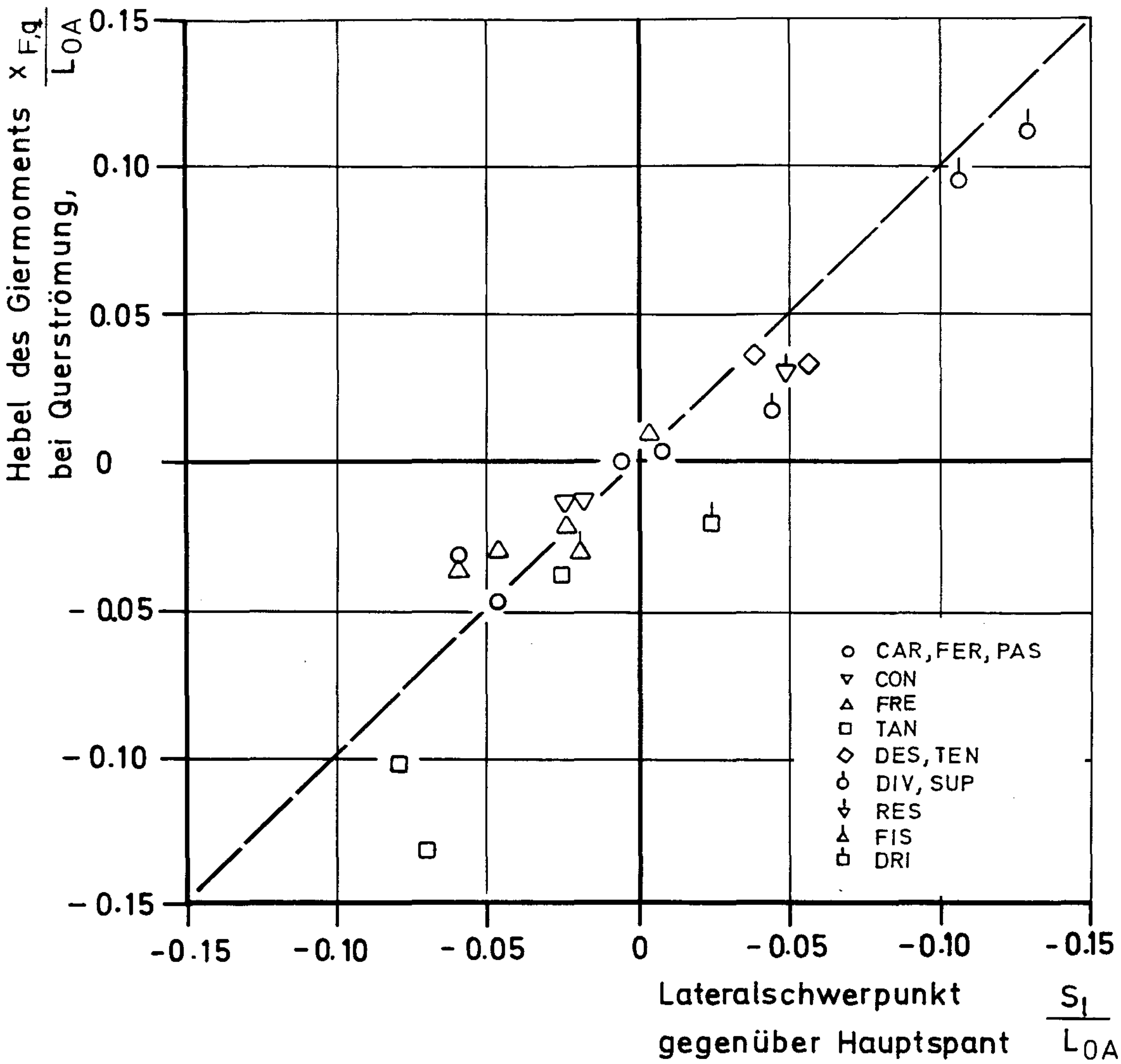


Bild 14 Hebel des Giermoments bei Querströmung über dem horizontalen Abstand des Lateralschwerpunktes von Hauptspant

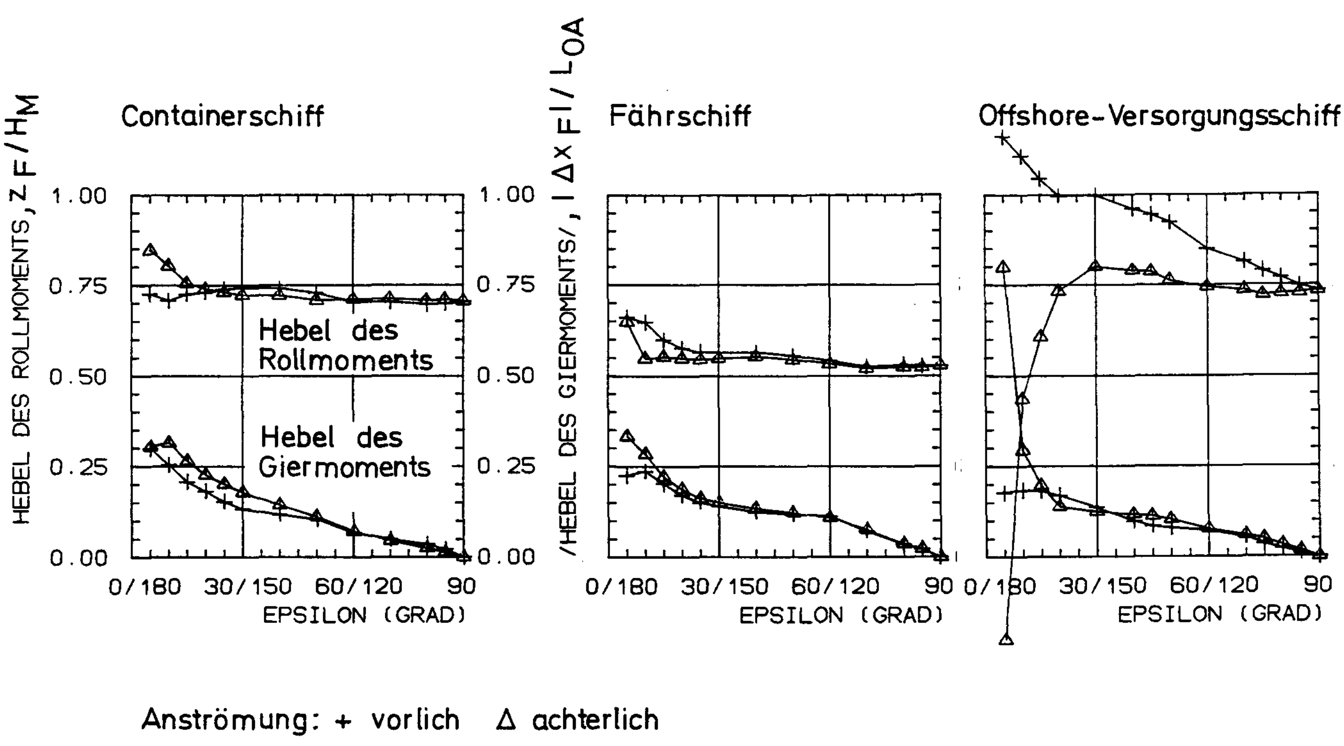


Bild 15 Hebel des Rollmoments, bezüglich Schwimmwasserlinie, und Hebel des Giermoments, bezüglich Momentenachse bei Querströmung, über dem Windeinfallswinkel

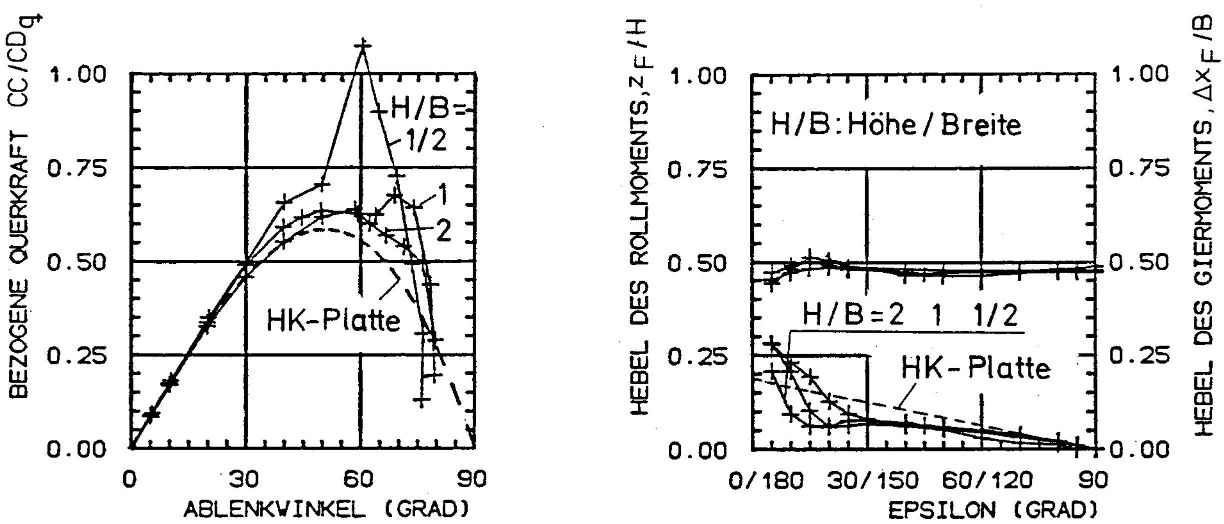


Bild 16 Querkraft und Hebel von Rollmoment und Giermoment an Platten auf einer Bodenplatte

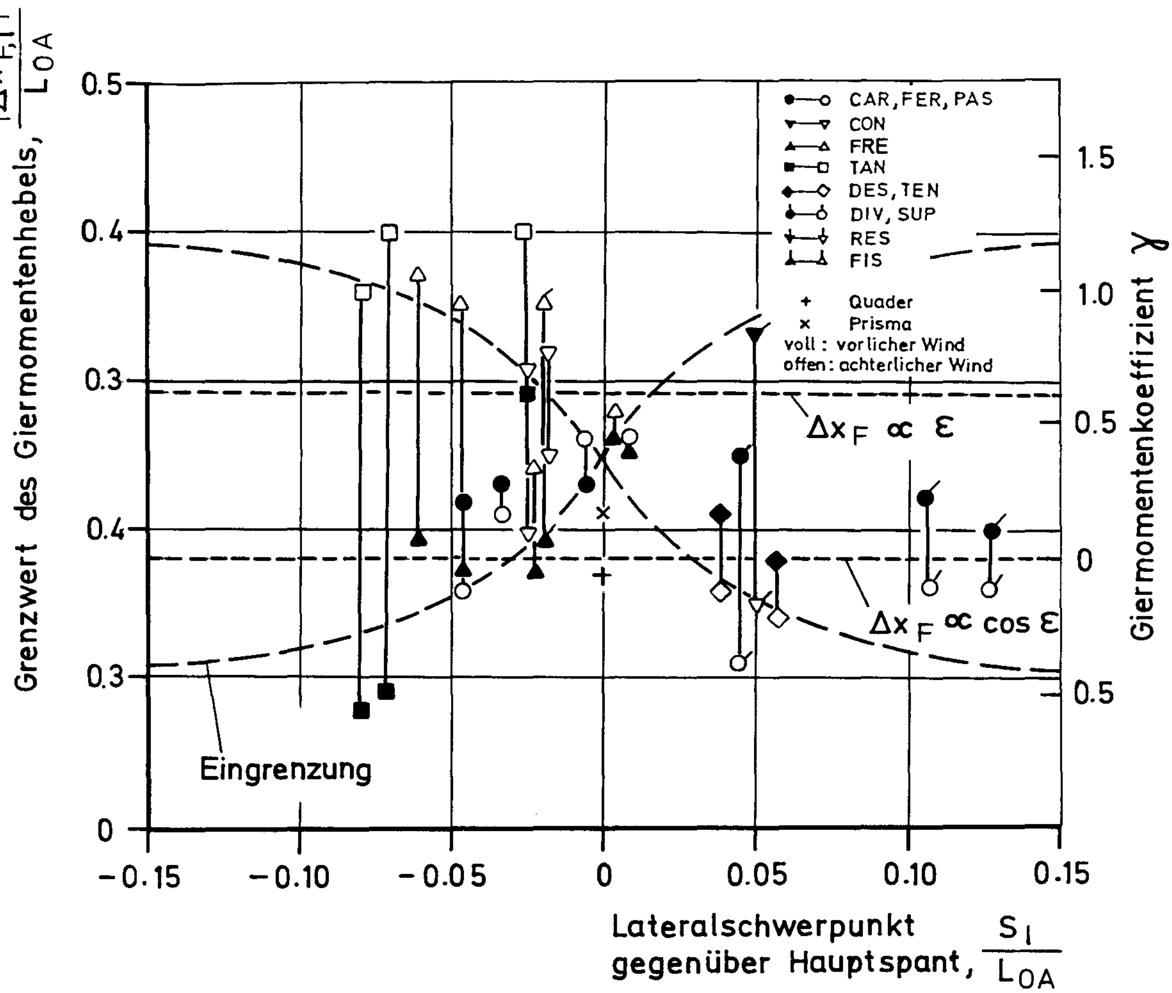


Bild 17 Grenzwert des Giermomentenhebels, bezüglich Momentenachse bei Querströmung, und zugehöriger Giermomentenkoeffizient über dem horizontalen Abstand des Lateralschwerpunktes von Hauptspant

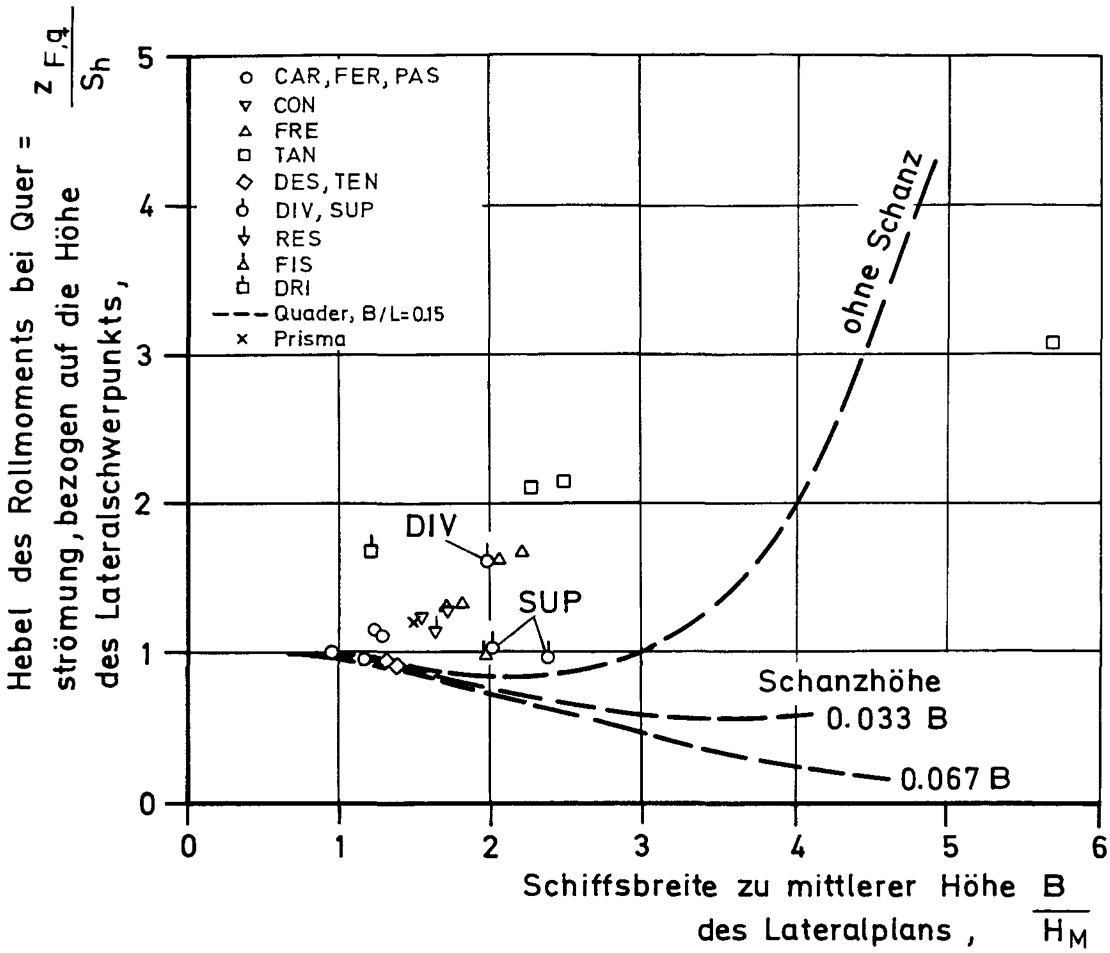


Bild 18 Hebel des Rollmoments bei Querströmung über dem Verhältnis von Schiffsbreite zu mittlerer Höhe des Lateralplans; Vergleichswerte für einen Quader mit und ohne Schanz

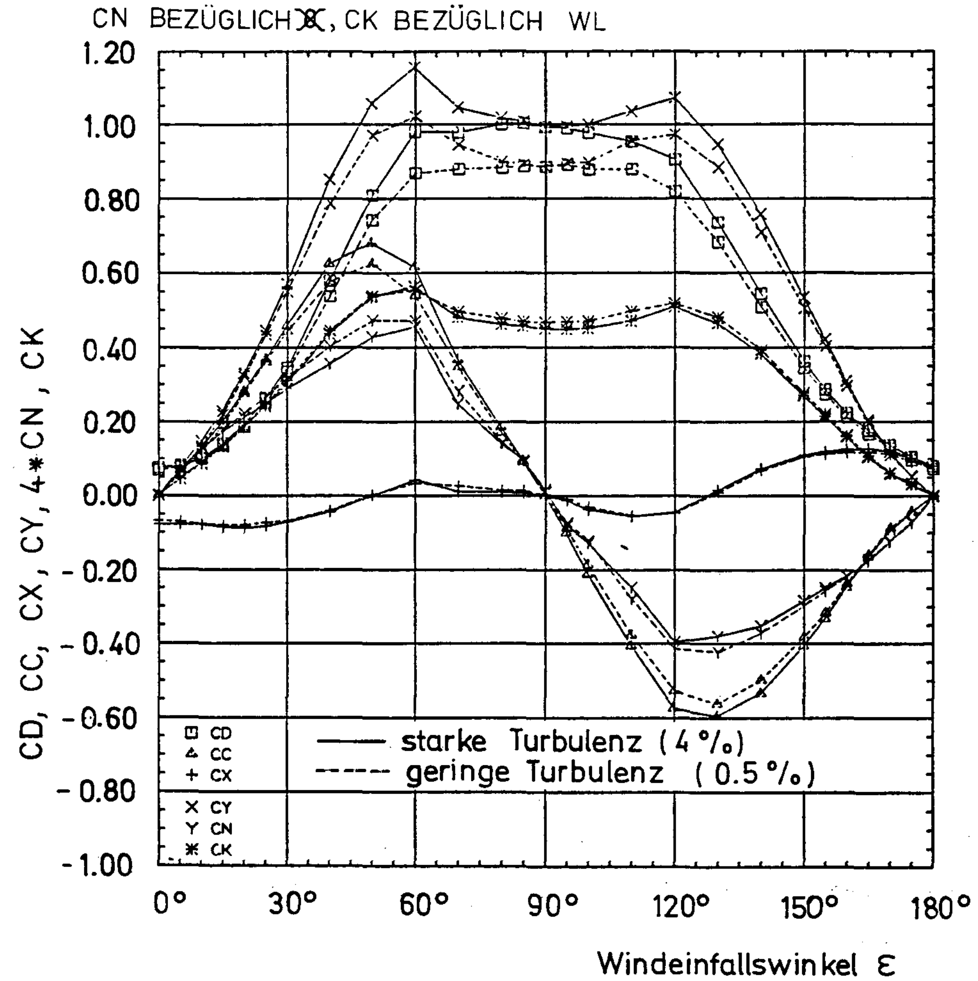


Bild 19 Windlastbeiwerte für ein Fährschiff in stark turbulenter und in turbulenzarmer Strömung

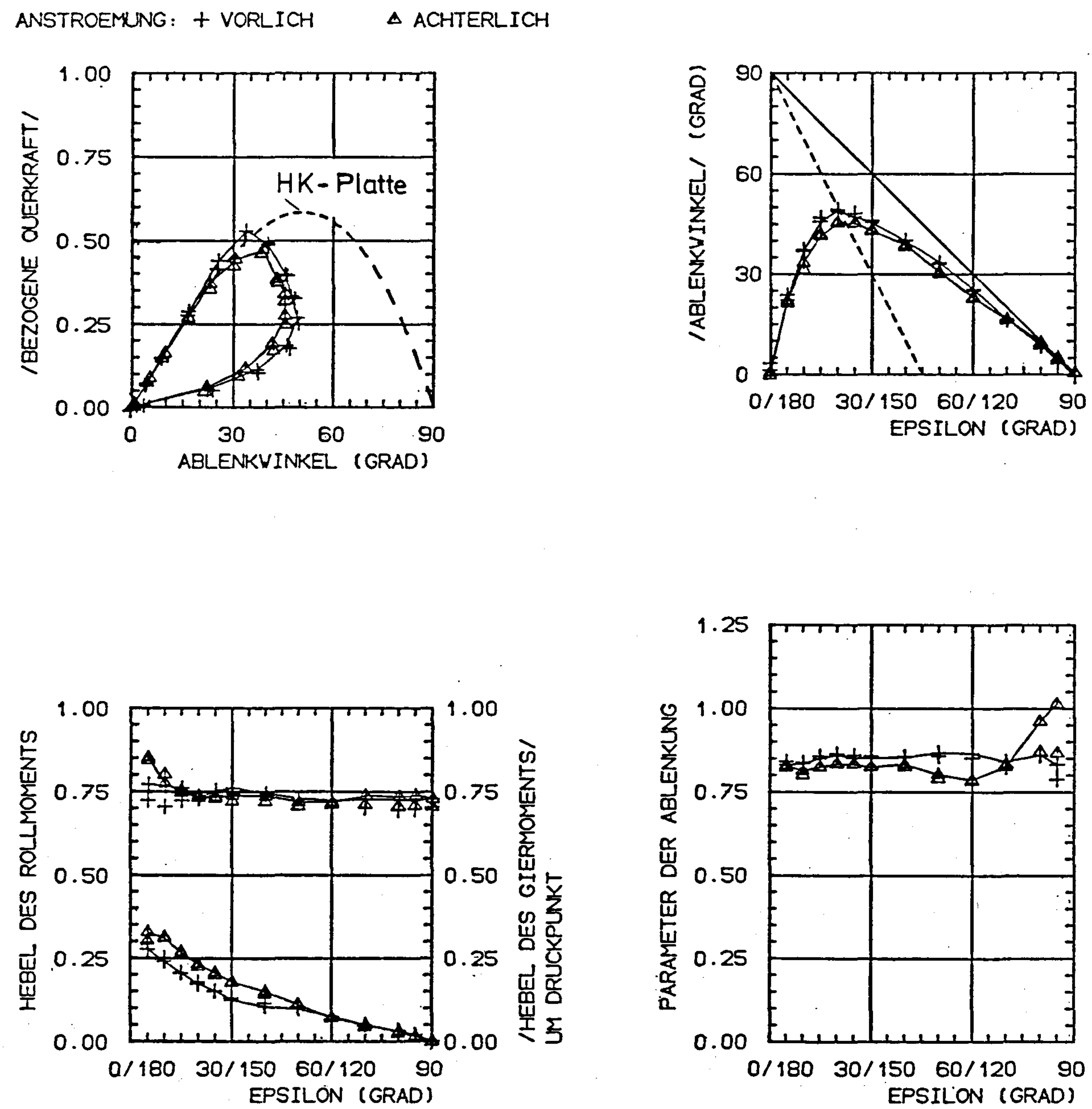


Bild 20 Verlauf der Windkräfte für ein Containerschiff in Strömung mit Gradienten ($\frac{1}{10}$ -Profil) und ohne Gradienten (unverbundene Aufpunkte)

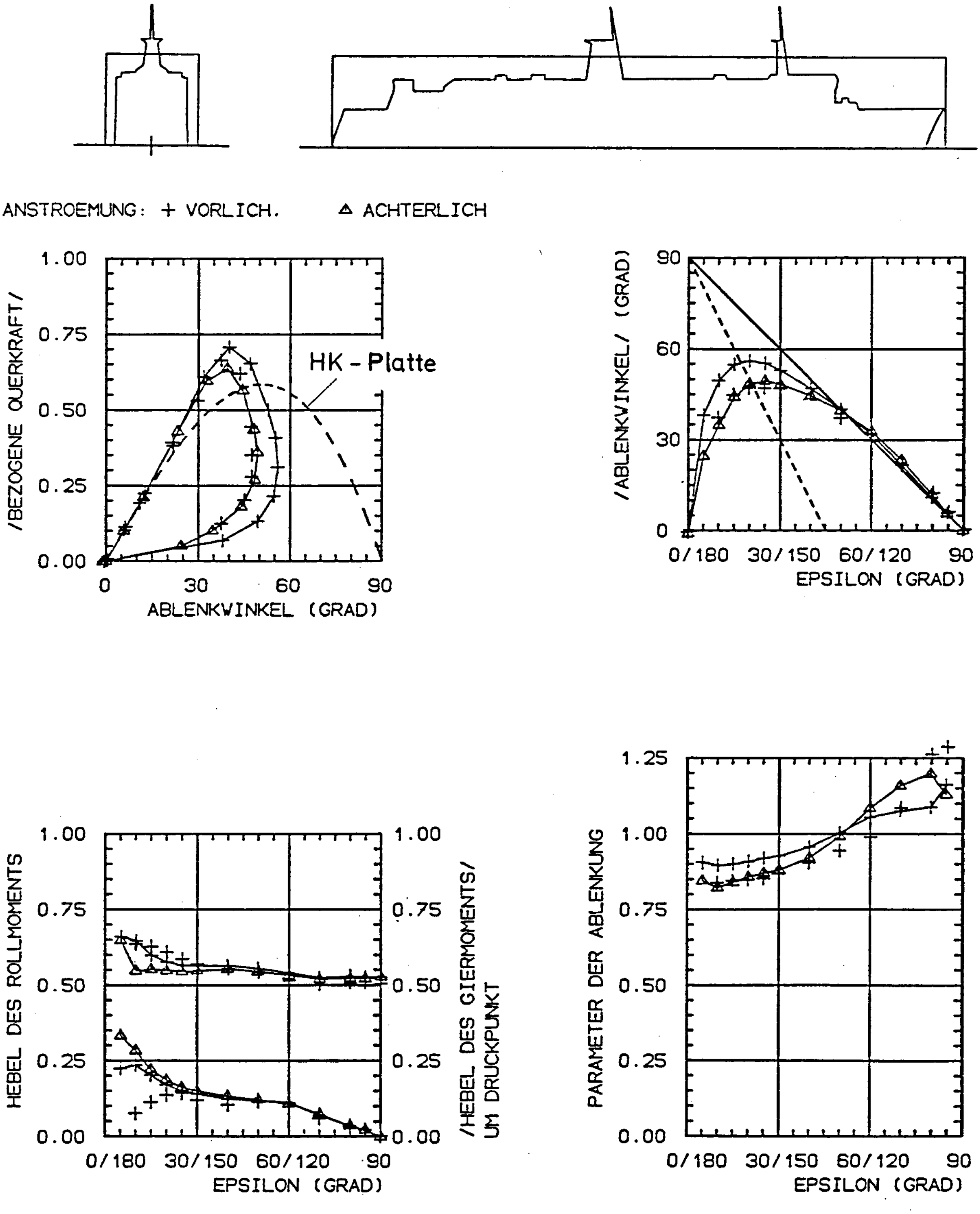


Bild 21 Verlauf der Kräfte und Momente für ein Fährschiff und für einen Quader (unverbundene Kreuze)

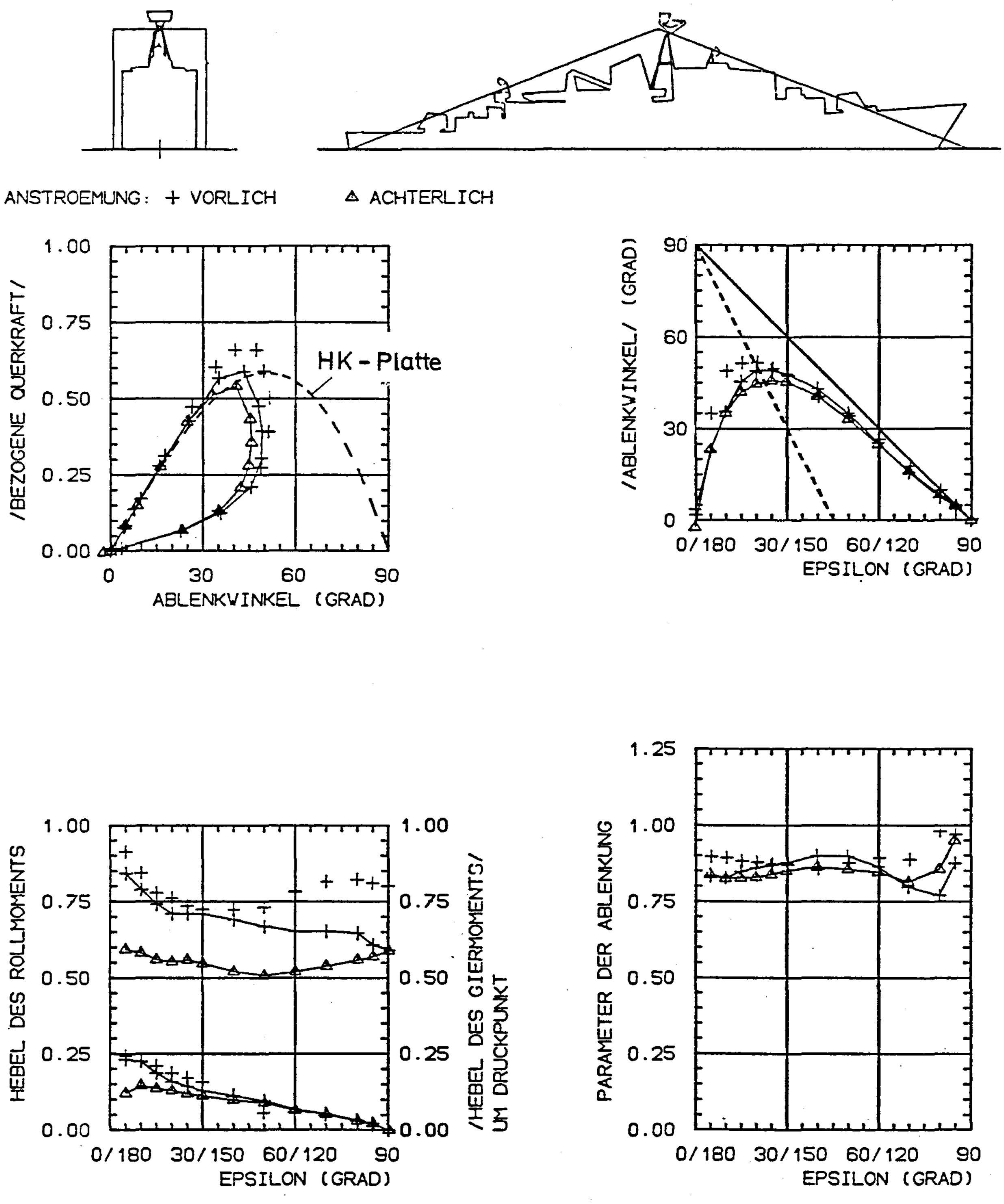
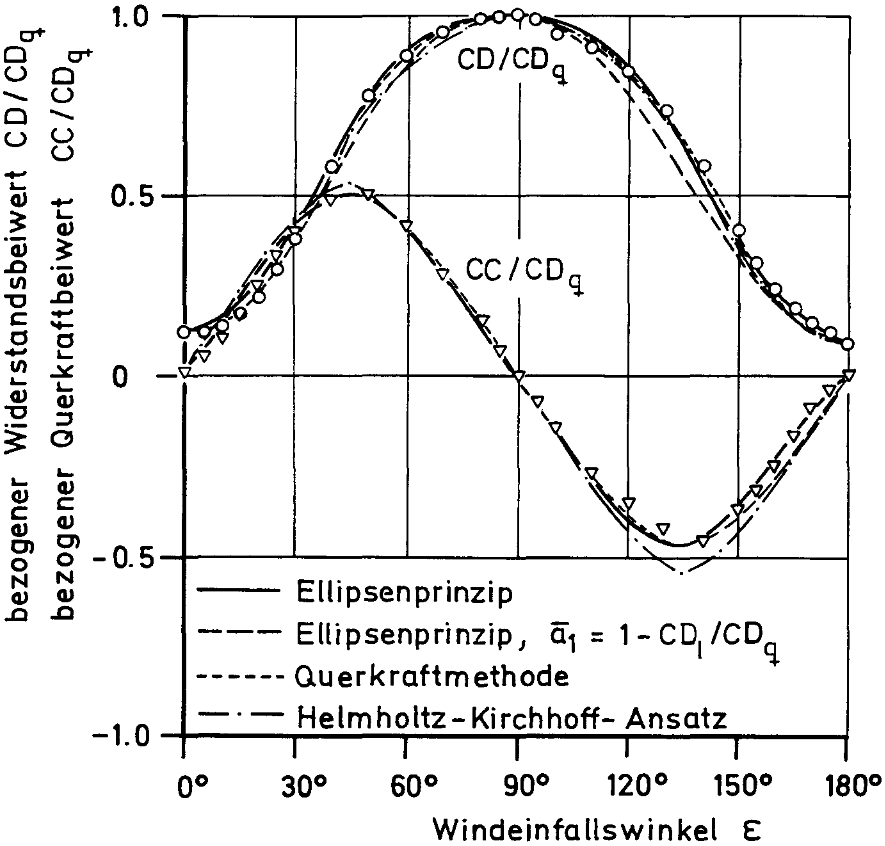


Bild 22 Verlauf der Kräfte und Momente für einen Tender und für ein Prisma (unverbundene Kreuze)



Koeffizienten:

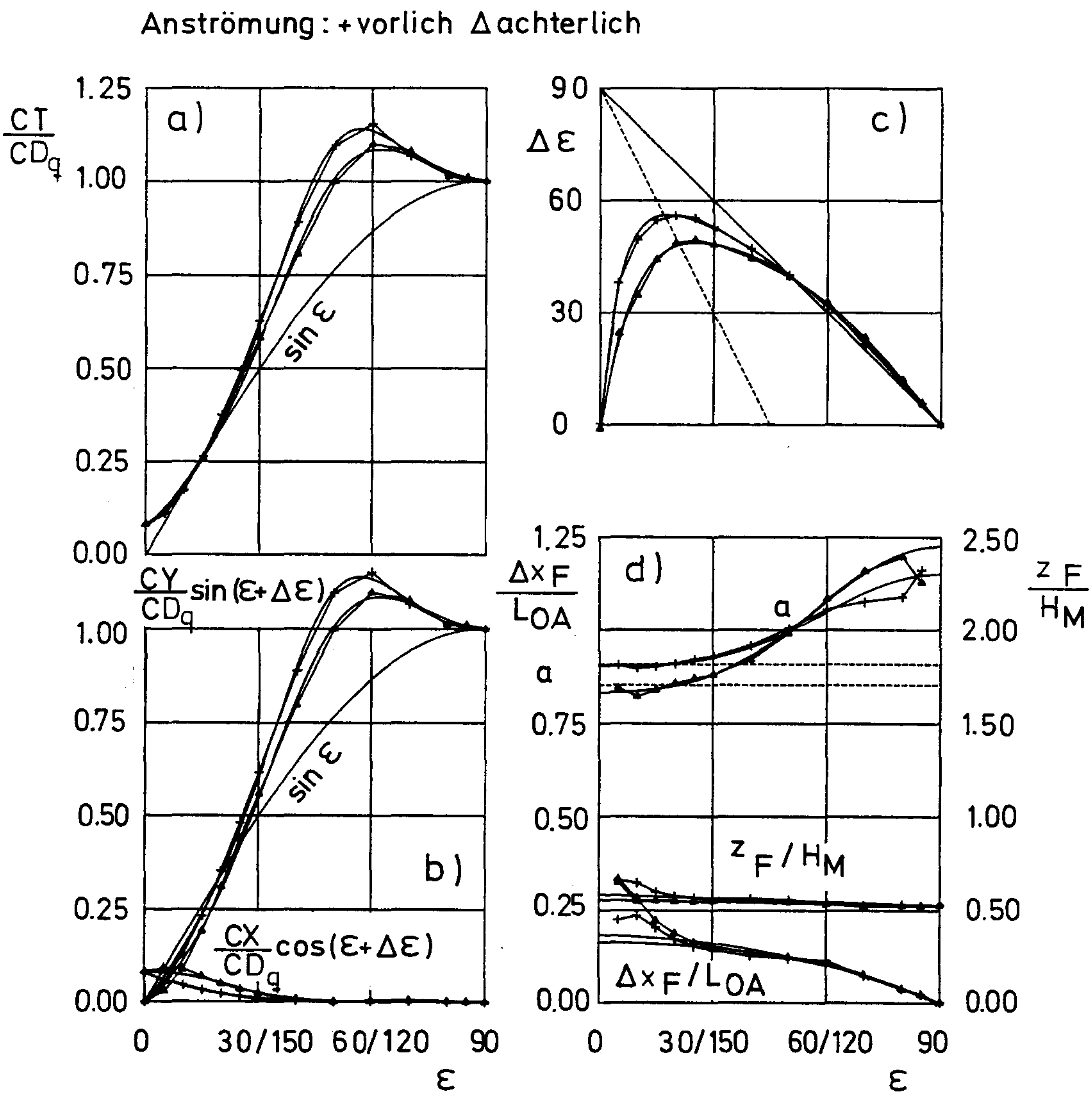
Ellipsenprinzip	$\frac{CD_l}{CD_q}$	$\bar{a}$	$\bar{a}_1$	$\frac{CC_{max}}{CD_q}$		β	$\frac{CC'_{max}}{CD_q}$	B
vorlich	0.117	0.848	0.883	0.500	→	0.9958	0.422	-0.627
achterlich	0.095	0.821	0.905	0.461		0.9946	0.399	-0.542

Ellipsenprinzip $\bar{a}_1 = 1\text{-}CD_l/CD_q$	-"-		-"-	-"-				
vorlich	0.117		0.883	0.500	→	1	0.442	-0.468
achterlich	0.095		0.905	0.461		1	0.453	-0.074

Querkraftmethode m = 1.33, n = 2	-"-	-"-	-"-	$\varepsilon_{CC_{max}}$		A	B	C	D
vorlich	0.117	0.848	0.500	45°	→	3.900	-2.721	-2.368	0.022
achterlich	0.095	0.821	0.461	45°		5.863	-4.740	-3.747	-0.057

HK-Ansatz $\lambda = 0.45$	-"-	-"-
vorlich	0.117	0.883
achterlich	0.095	0.905

Bild 23 Beiwerte von Widerstand und Querkraft für ein Containerschiff; Vergleich von Rechnung und Messung



CD_q 0.89	$CD_{l,\varepsilon=0}$ 0.07	$CD_{l,\varepsilon=\pi}$ 0.07

Vorlicher Wind

μ 1.12	A_{CT} -1.52	m 2.21	ρ 2.15
v 8.28	B_{CT} 3.30	n 1.03	q 0
$\Delta\varepsilon_q$ 0.1	$A_{\Delta\varepsilon}$ 0.903	$B_{\Delta\varepsilon}$ 0.247	$C_{\Delta\varepsilon}$ -0.055
$x_{F,q}$ 0.003	A_{XF} 0.262	B_{XF} -0.005	C_{XF} 0.609
$z_{F,q}$ 0.528	A_{ZF} 0.057	B_{ZF} 0.618	

Achterlicher Wind

μ 1.29	A_{CT} - 0.981	m 1.59	ρ 1.74
v 6.42	B_{CT} 26.8	n 5.71	q 3.61
$\Delta\varepsilon_q$ 0.1	$A_{\Delta\varepsilon}$ 0.832	$B_{\Delta\varepsilon}$ 0.393	$C_{\Delta\varepsilon}$ -0.067
$x_{F,q}$ 0.003	A_{XF} -0.266	B_{XF} 0.094	C_{XF} 0.445
$z_{F,q}$ 0.528	A_{ZF} 0.028	B_{ZF} 0.618	

Bild 24 Approximation von Windlastbeiwerten für ein Fährschiff;
Komponenten und Koeffizienten

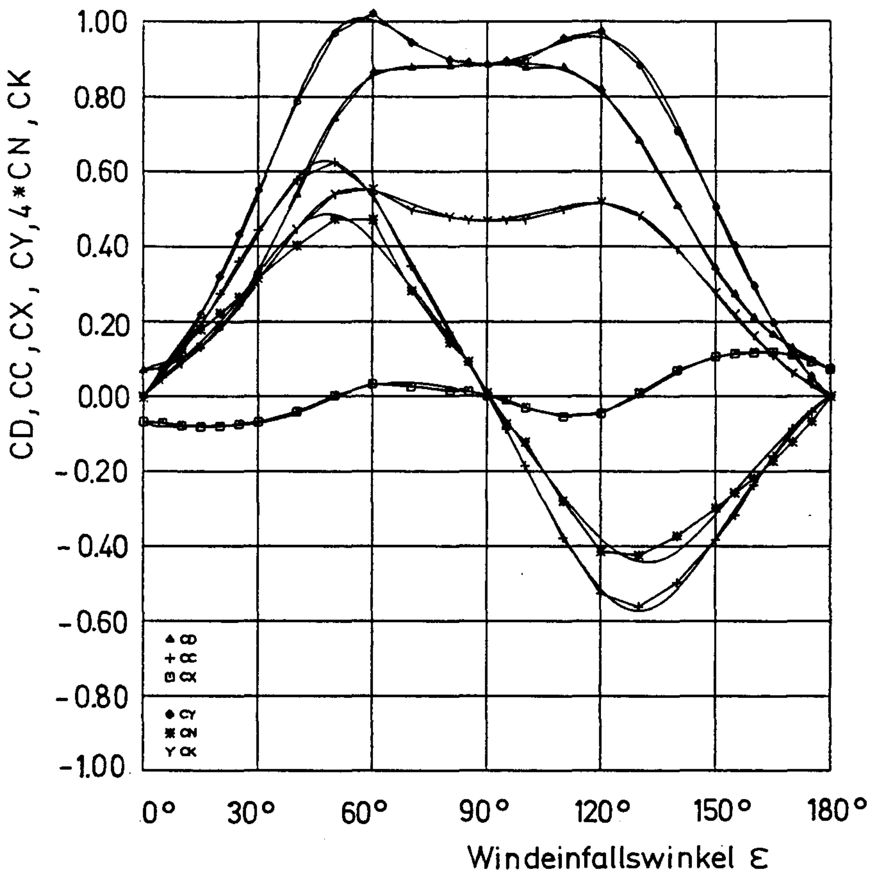


Bild 25 Kraft- und Momentenbeiwerte für ein Fährschiff; Approximationsfunktionen (strakende Linien)

Anhang A: Windlastbeiwerte für sieben Schiffsmodelle*)

Autotransporter

Containerschiff (voll, Teillast, leer)

Cargo/Containerschiff

Bohrschiff

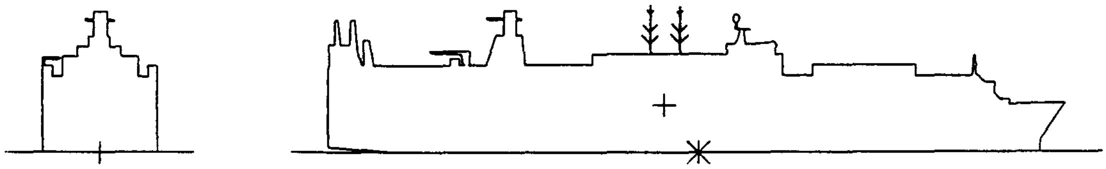
Fährschiff

Offshore-Versorgungsschiff (langer Aufbau, kurzer Aufbau)

Tanker (beladen, Ballast)

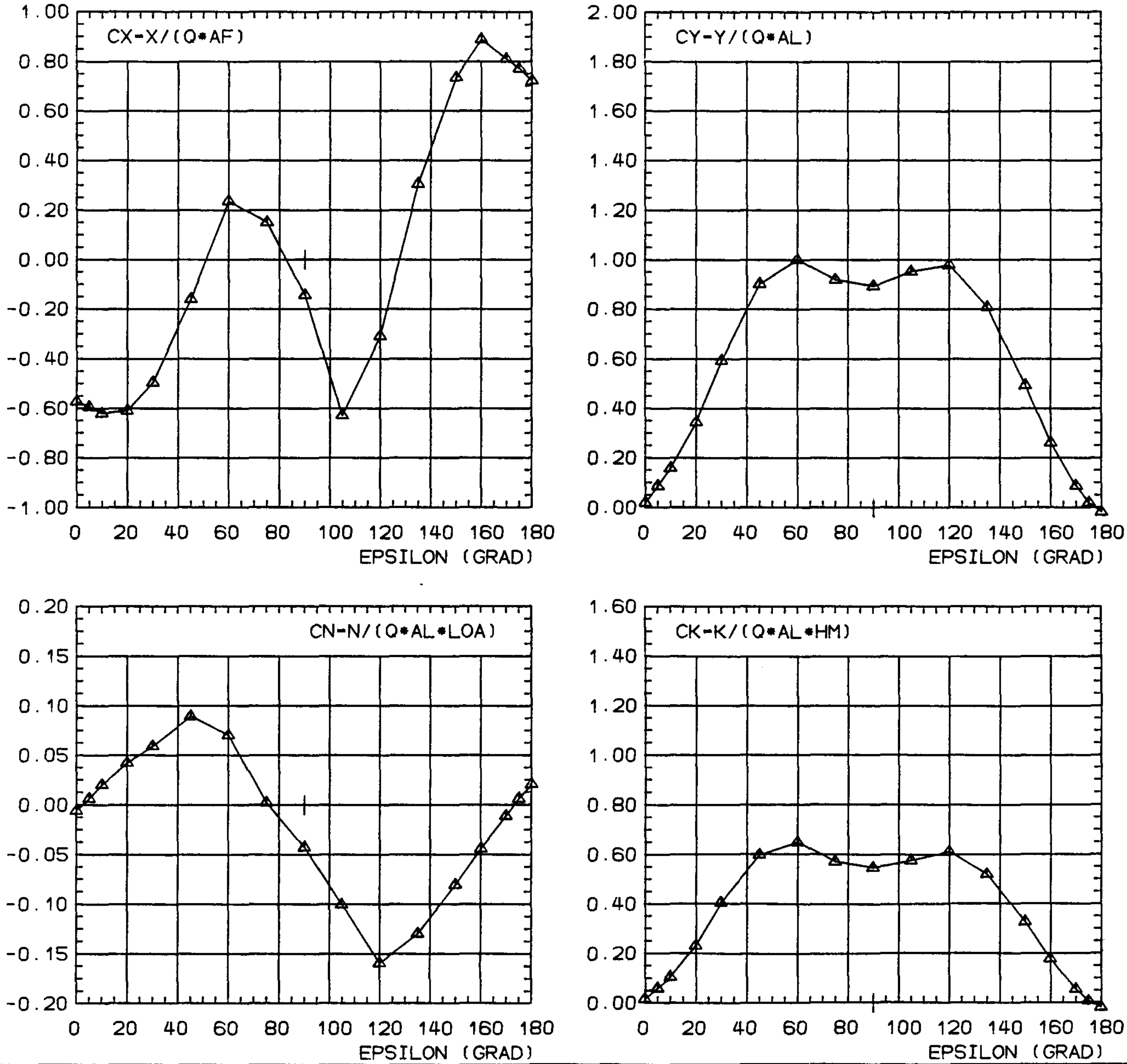
Beiwerte weiterer Schiffstypen in Aage (1971).

*) Aus Windkanalmessungen in turbulenzarmer Strömung ohne Gradienten (Messung Institut für Schiffbau).

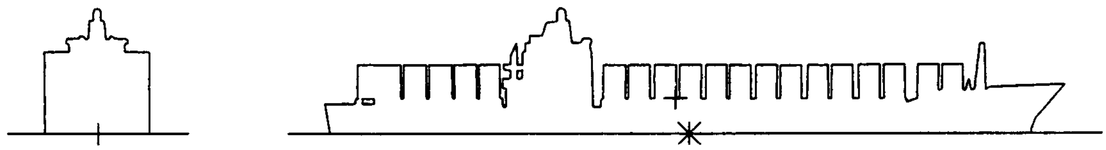


LAENGE PP	LPP M	180.00		SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL M	-8.98
LAENGE OA	LOA M	195.00		SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH M	12.56
BREITE IN DER WL	BWL M	30.00		MITTLERE HOEHE VON AL	HM M	23.51
LATERALFLAECHE	AL M^2	4584.16		TIEFGANG VORN	TV M	8.50
FRONTFLAECHE	AF M^2	811.68		TIEFGANG HINTEN	TH M	8.50

MASSSTAB 1:150 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.69E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ , CK BEZUEGLICH WL

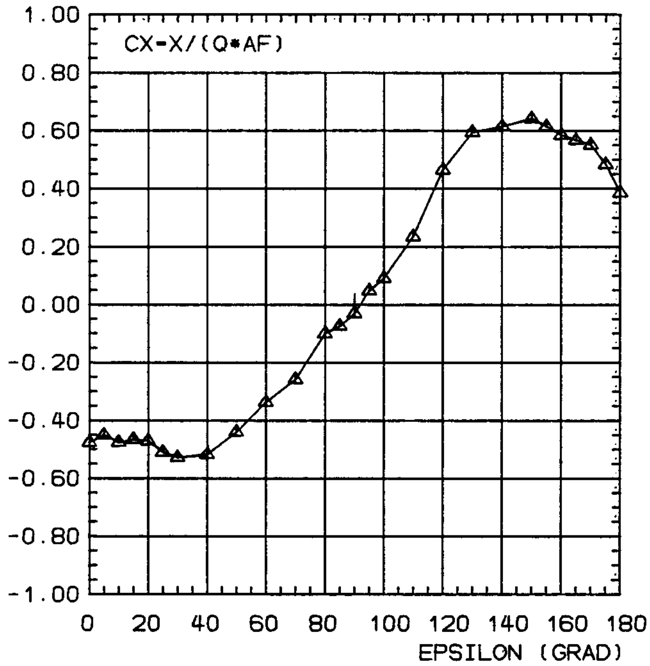


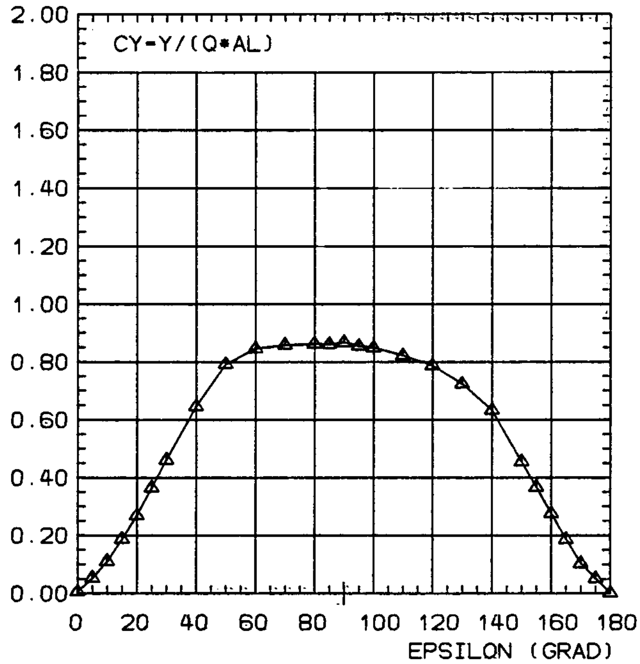
KENNUNG CAR0201BN A-1	AUTOTRANSPORTER	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

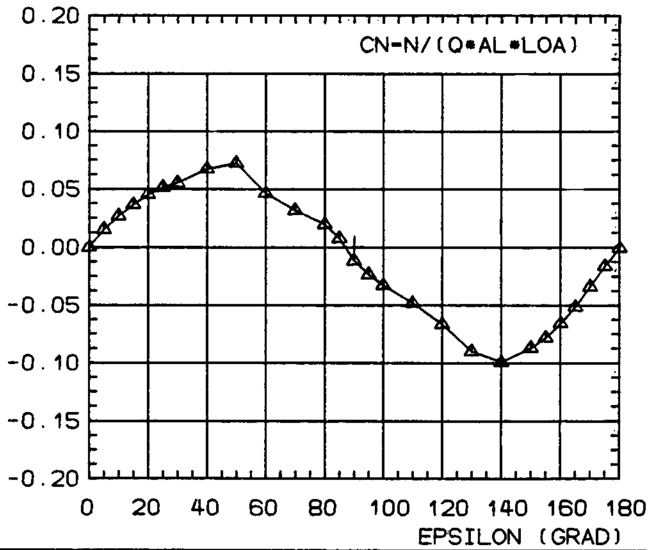


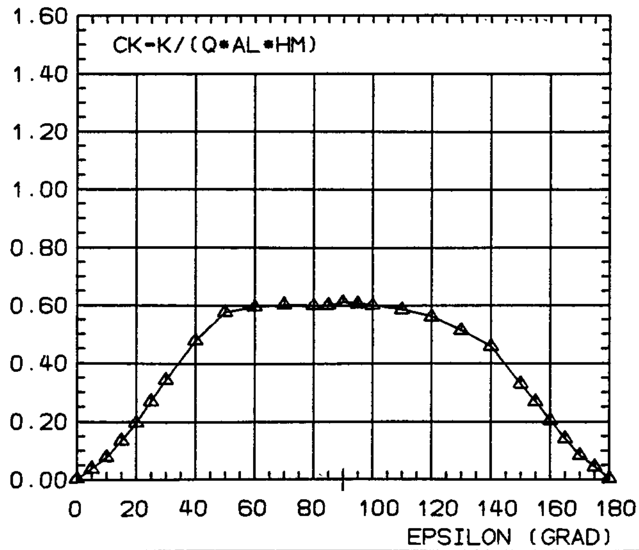
LAENGE PP	LPP M	194.51		SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL.M	-3.87
LAENGE OA	LOA M	210.75		SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH.M	10.08
BREITE IN DER WL	BWL M	30.50		MITTLERE HOEHE VON AL	HM.M	17.80
LATERALFLAECHE	AL M^2	3751.11		TIEFGANG VORN	TV M	11.60
FRONTFLAECHE	AF M^2	801.97		TIEFGANG HINTEN	TH M	11.60

MASSSTAB 1:150 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.10E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ , CK BEZUEGLICH WL

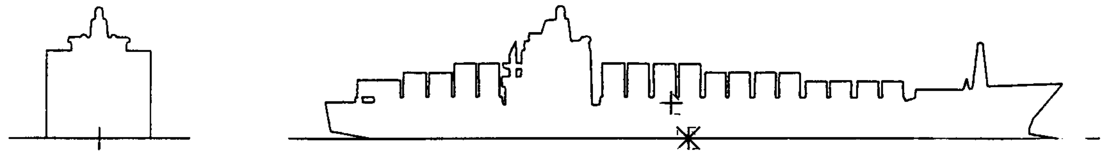






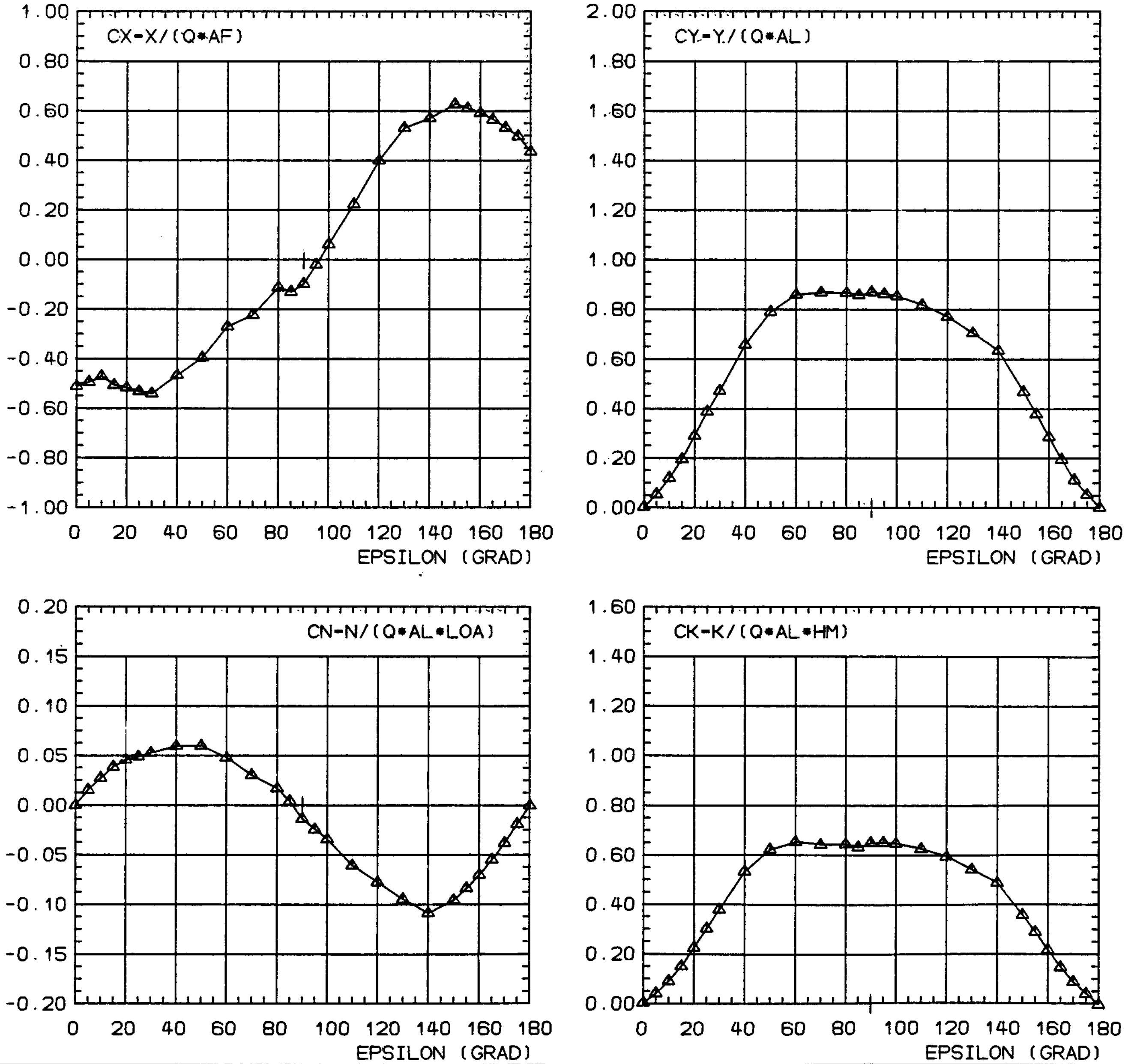


KENNUNG		INSTITUT FUER
CON0101BN	CONTAINERSCHIFF	SCHIFFBAU
A-2		UNIVERSITAET HAMBURG

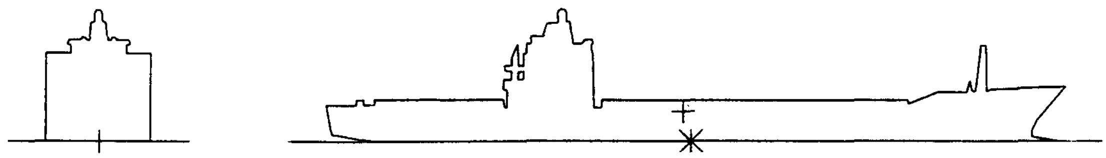


LAENGE PP	LPP	M	194.51	SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL	M	-4.87
LAENGE OA	LOA	M	210.75	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH	M	10.22
BREITE IN DER WL	BWL	M	30.50	MITTLERE HOEHE VON AL	HM	M	17.91
LATERALFLAECHE	AL	M^2	3773.51	TIEFGANG VORN	TV	M	9.60
FRONTFLAECHE	AF	M^2	857.06	TIEFGANG HINTEN	TH	M	9.60

MASSSTAB 1:150 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.10E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ , CK BEZUEGLICH WL

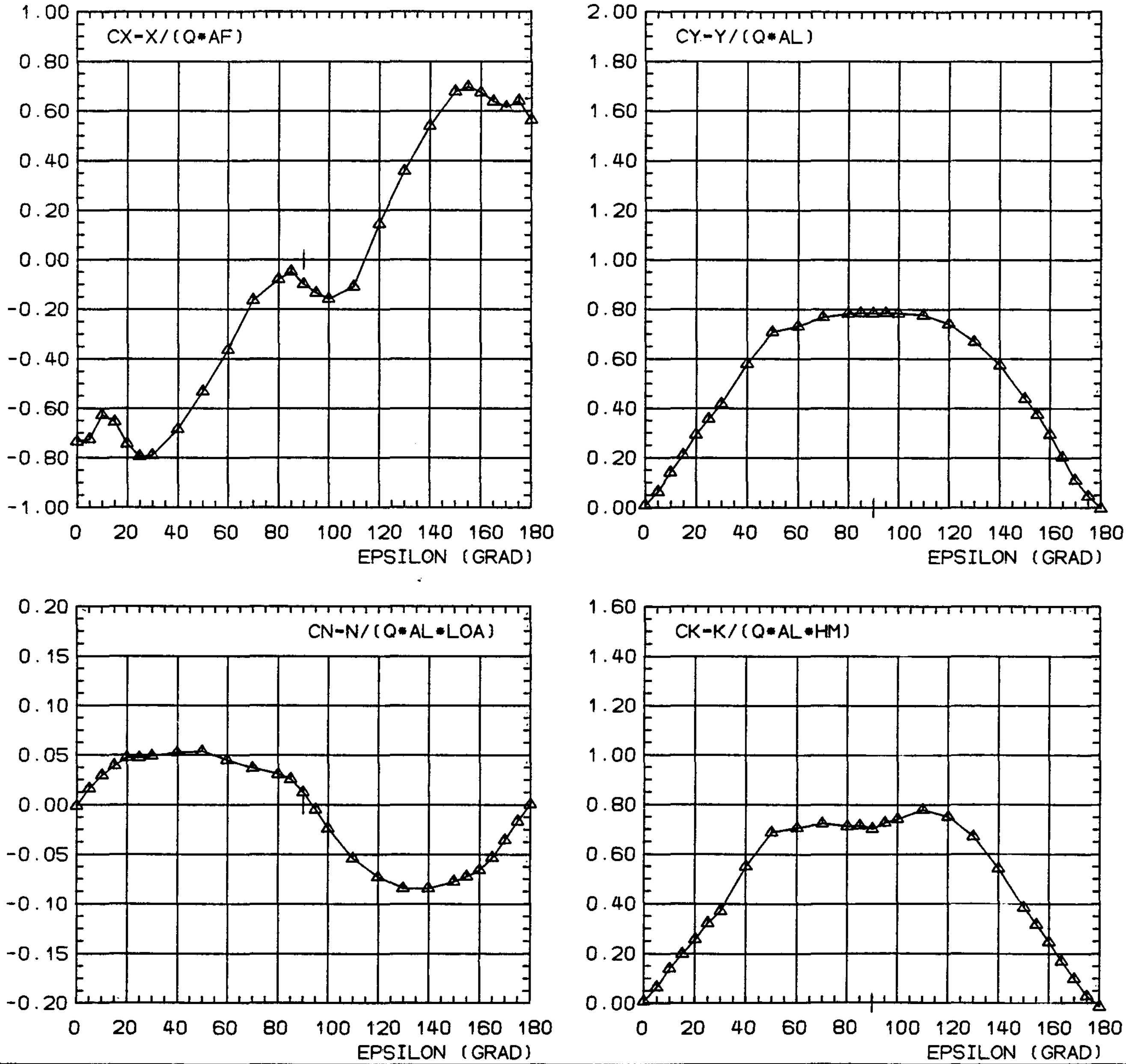


KENNUNG CON0107BN A-3	CONTAINERSCHIFF	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

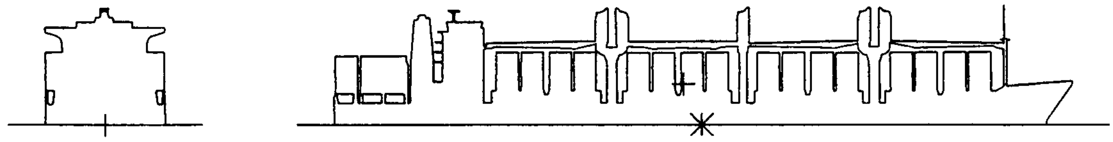


LAENGE PP	LPP	M	194.51	SCHWERPUNKT VON AL VOR *	SL	M	-2.14
LAENGE OA	LOA	M	210.75	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH	M	8.67
BREITE IN DER WL	BWL	M	30.50	MITTLERE HOEHE VON AL	HM	M	13.98
LATERALFLAECHE	AL	M^2	2947.30	TIEFGANG VORN	TV	M	9.60
FRONTFLAECHE	AF	M^2	857.06	TIEFGANG HINTEN	TH	M	9.60

MASSSTAB 1:150 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.10E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH * , CK BEZUEGLICH WL

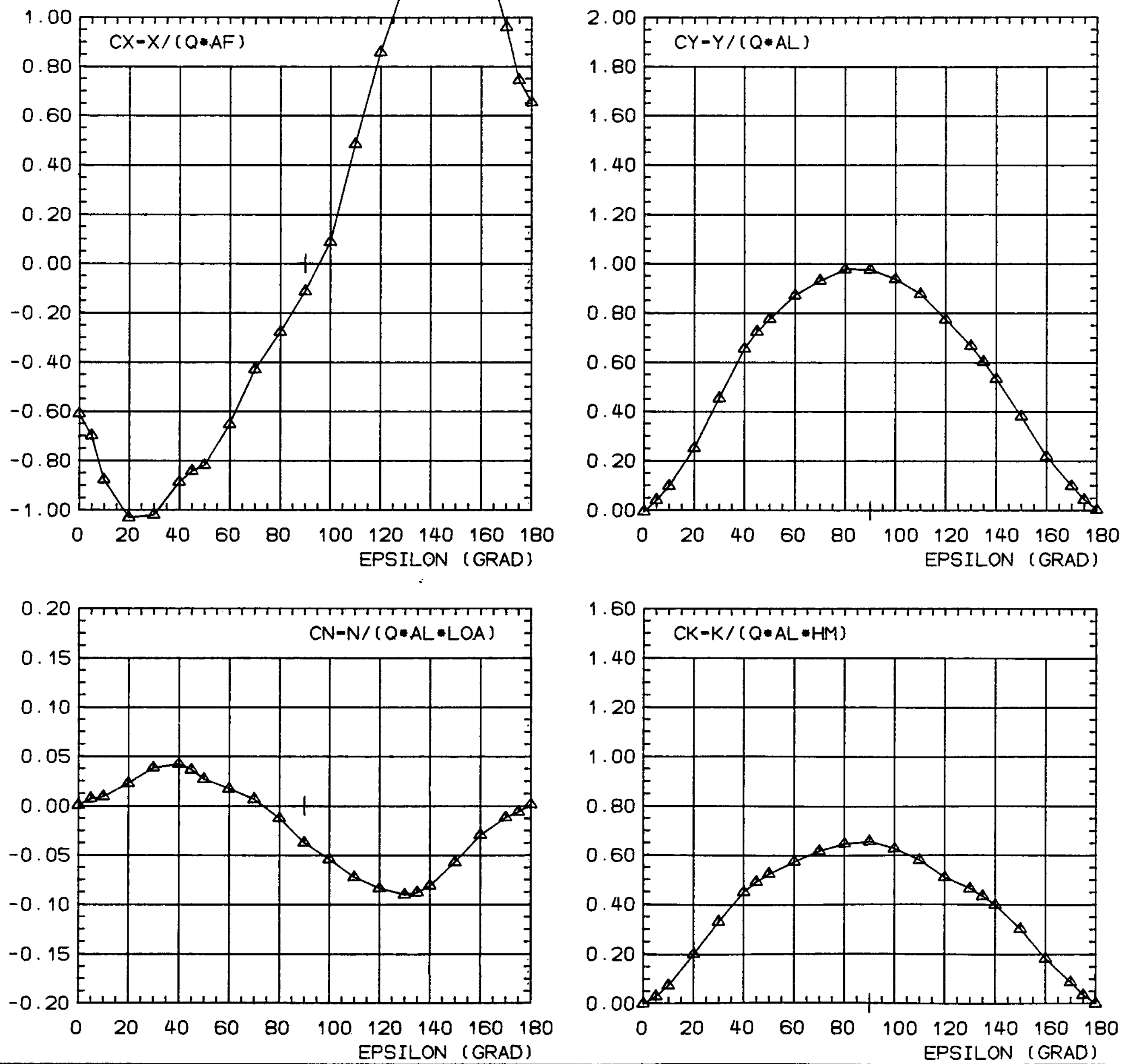


KENNUNG CON0104BN A-4	CONTAINERSCHIFF	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

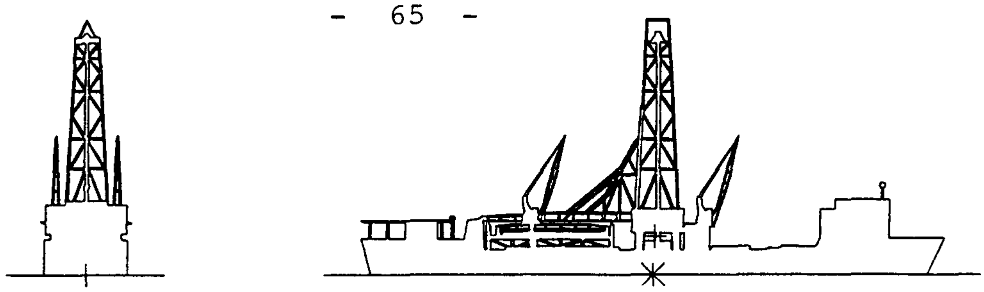


LAENGE PP	LPP M	187.30	SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL M	-4.92
LAENGE OA	LOA M	198.25	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH M	11.07
BREITE IN DER WL	BWL M	32.20	MITTLERE HOEHE VON AL	HM M	18.61
LATERALFLAECHE	AL M^2	3689.73	TIEFGANG VORN	TV M	12.20
FRONTFLAECHE	AF M^2	826.32	TIEFGANG HINTEN	TH M	12.20

MASSSTAB 1:140 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.80E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ . CK BEZUEGLICH WL

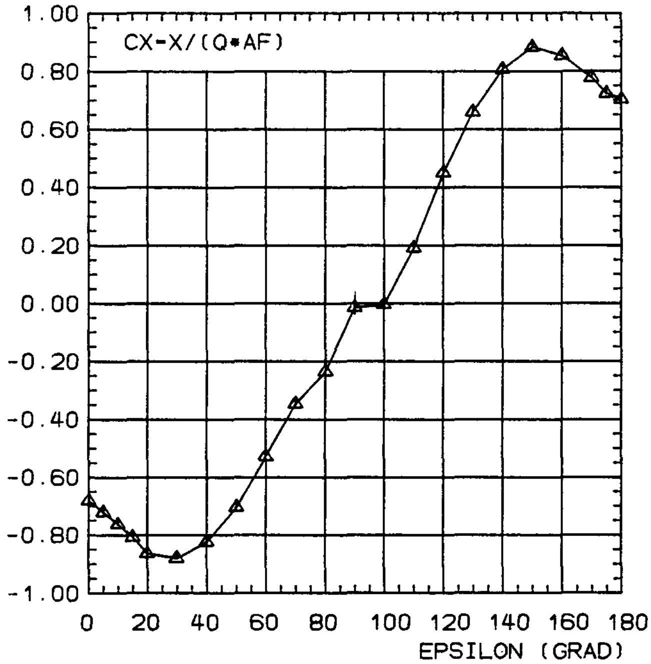


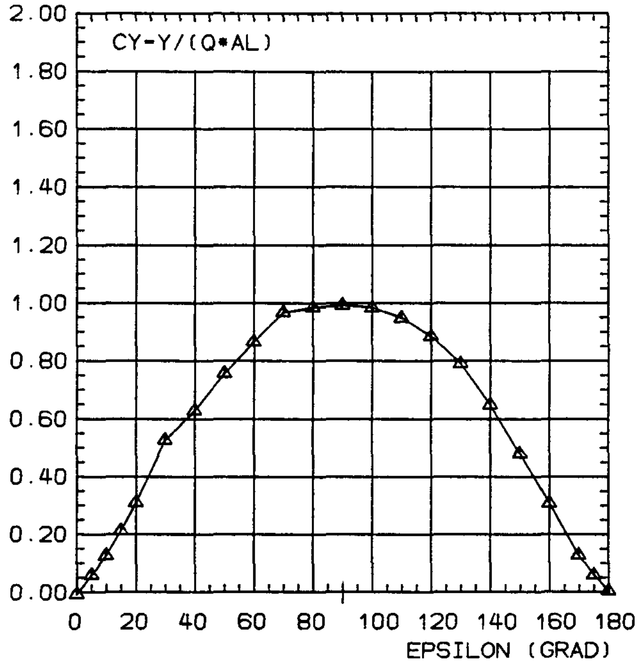
KENNUNG CON0301BN A-5	CARGO/CONTAINERSCHIFF	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

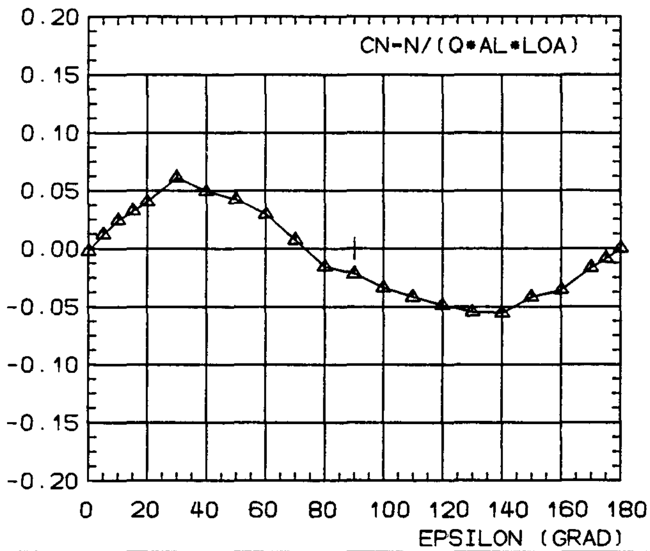


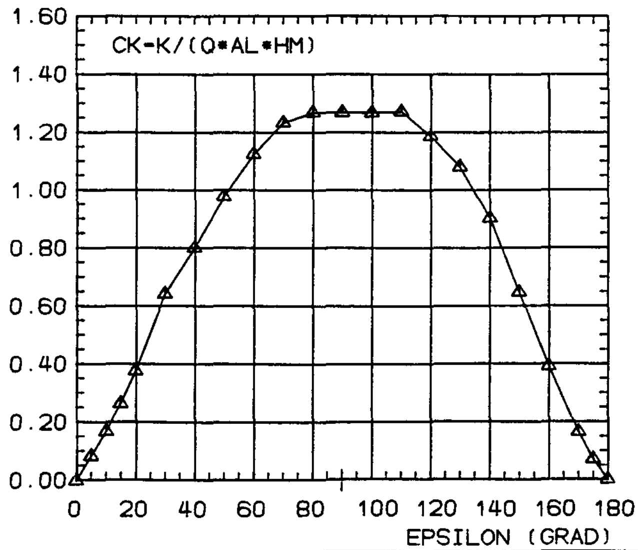
LAENGE PP	LPP	M	137.00	SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL	M	0.34
LAENGE OA	LOA	M	150.10	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH	M	10.03
BREITE IN DER WL	BWL	M	21.35	MITTLERE HOEHE VON AL	HM	M	13.15
LATERALFLAECHE	AL	M^2	1973.53	TIEFGANG VORN	TV	M	7.00
FRONTFLAECHE	AF	M^2	916.00	TIEFGANG HINTEN	TH	M	7.00

MASSSTAB 1:100 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.87E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ , CK BEZUEGLICH WL

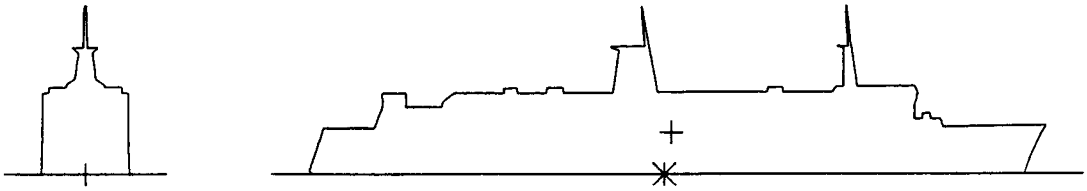






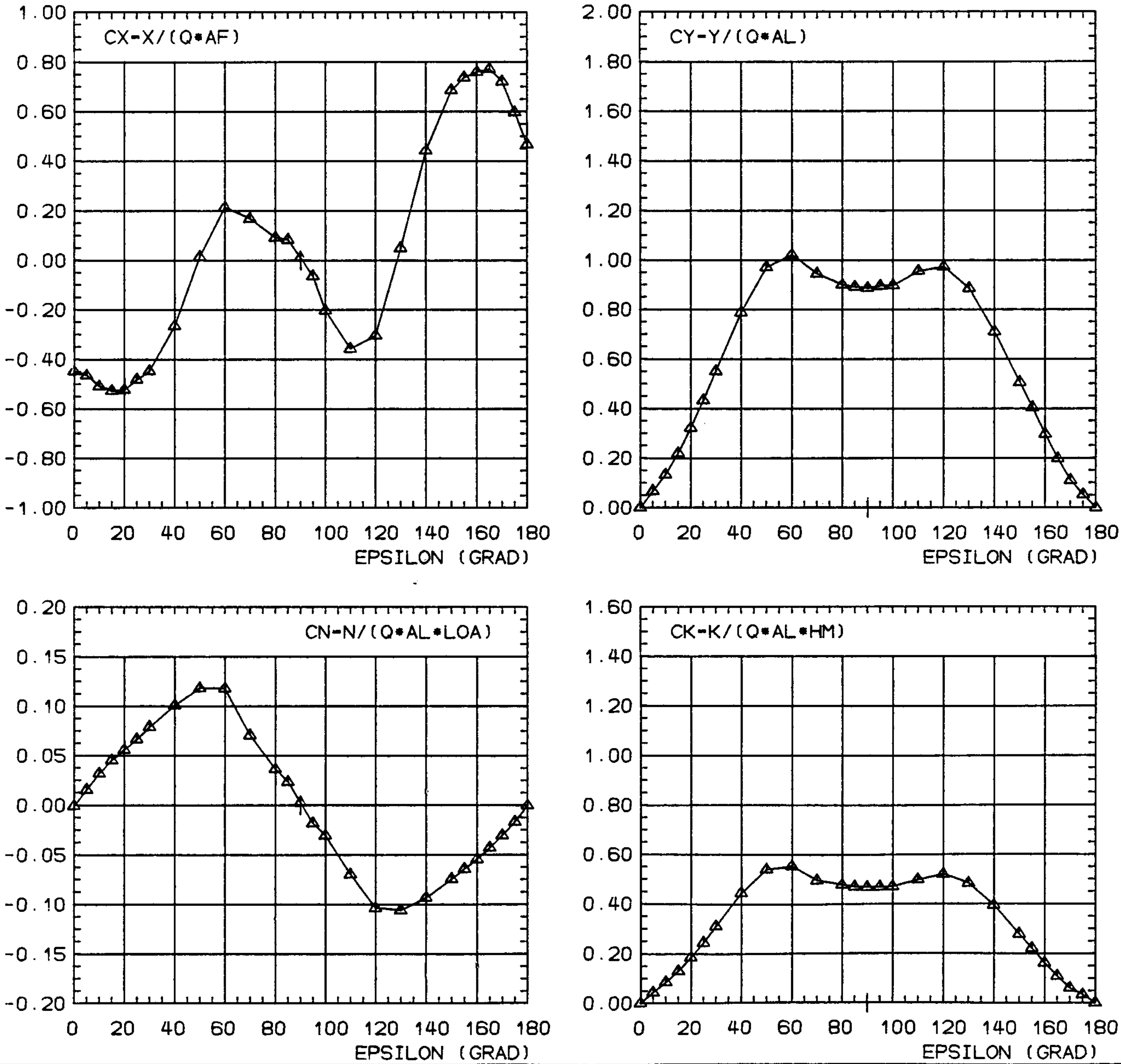


KENNUNG DRI0103BN A-6	BOHRSCHIFF	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

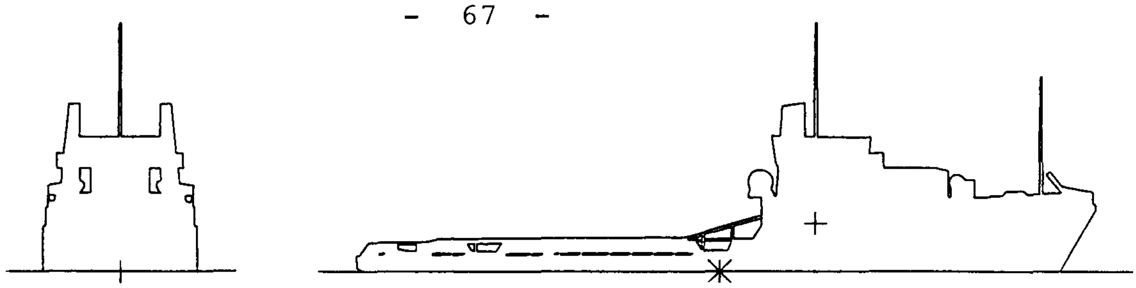


LAENGE PP	LPP	M	139.60	SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL	M	1.36
LAENGE OA	LOA	M	143.90	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH	M	8.15
BREITE IN DER WL	BWL	M	17.35	MITTLERE HOEHE VON AL	HM	M	15.25
LATERALFLAECHE	AL	M^2	2125.75	TIEFGANG VORN	TV	M	5.90
FRONTFLAECHE	AF	M^2	325.33	TIEFGANG HINTEN	TH	M	5.90

MASSSTAB 1:100 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.16E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ . CK BEZUEGLICH WL

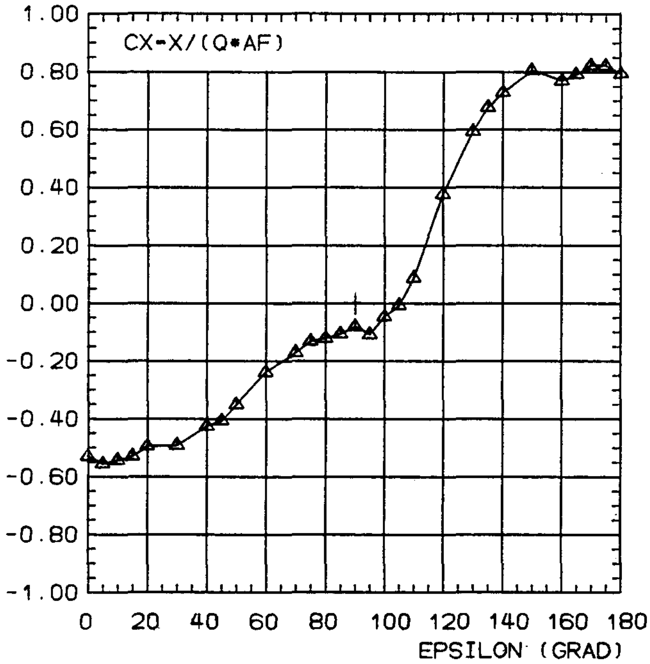


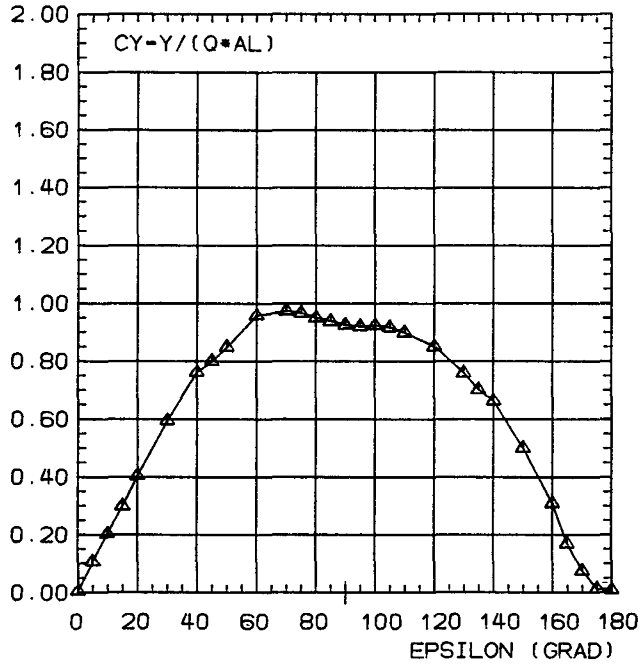
KENNUNG FER0201BN A-7	FAEHRSCHIFF	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

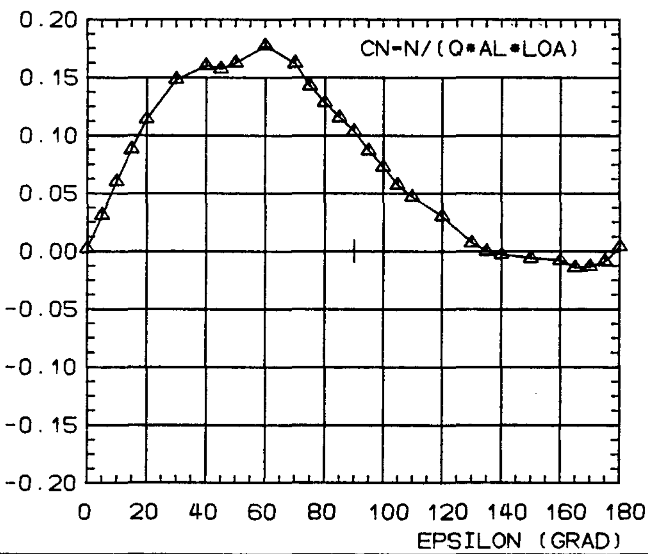


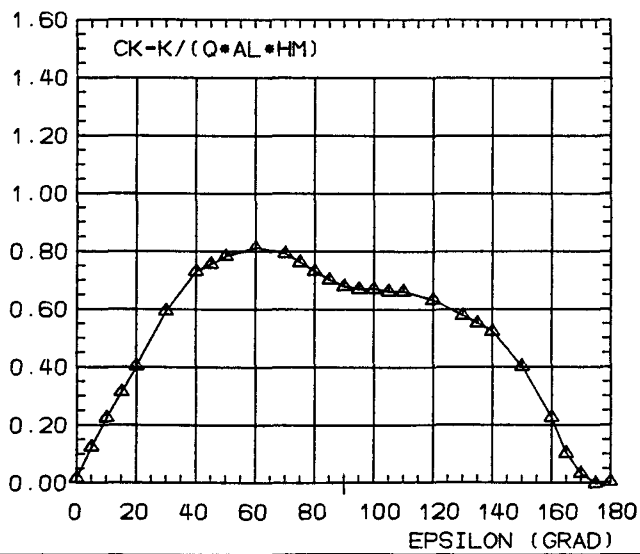
LAENGE PP	LPP M	58.35		SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL M	7.95
LAENGE OA	LOA M	61.95		SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH M	4.08
BREITE IN DER WL	BWL M	13.00		MITTLERE HOEHE VON AL	HM M	5.76
LATERALFLAECHE	AL M^2	336.80		TIEFGANG VORN	TV M	4.85
FRONTFLAECHE	AF M^2	137.48		TIEFGANG HINTEN	TH M	4.85

MASSSTAB 1:50 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.30E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ , CK BEZUEGLICH WL

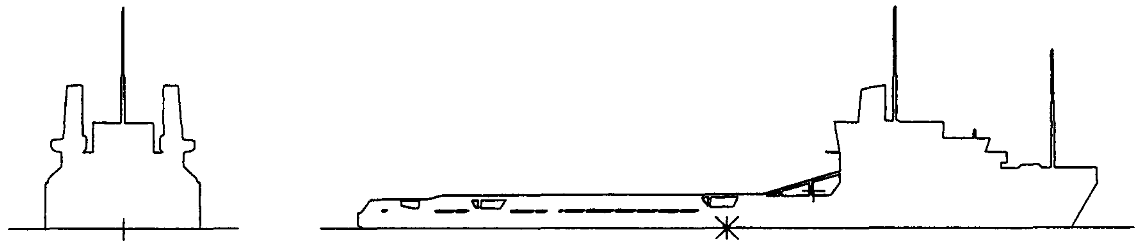






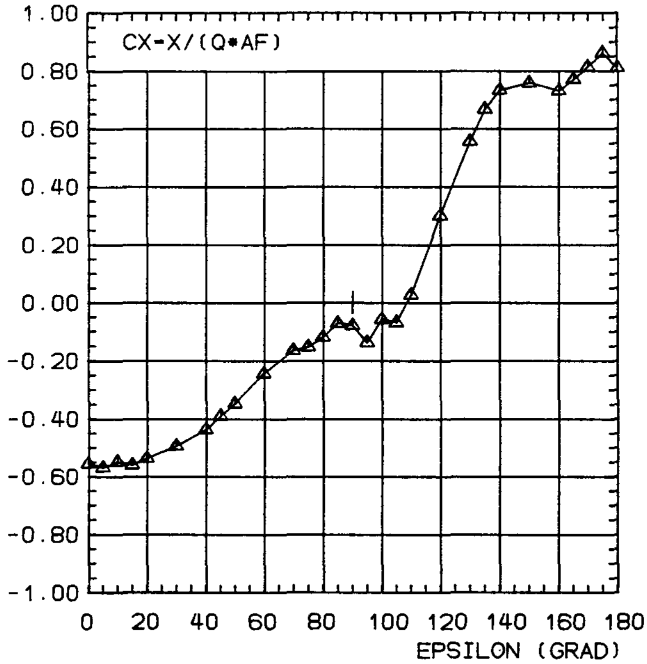


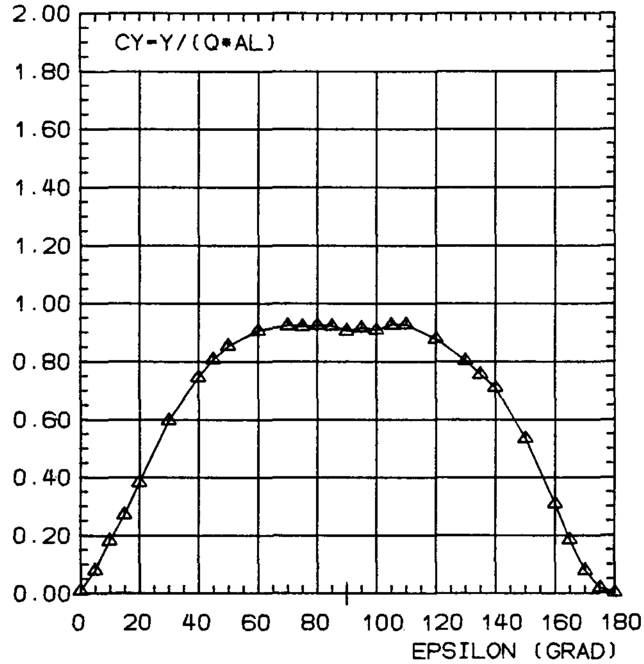
KENNUNG SUP0101BN A-8	OFFSHORE-VERSORGER	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

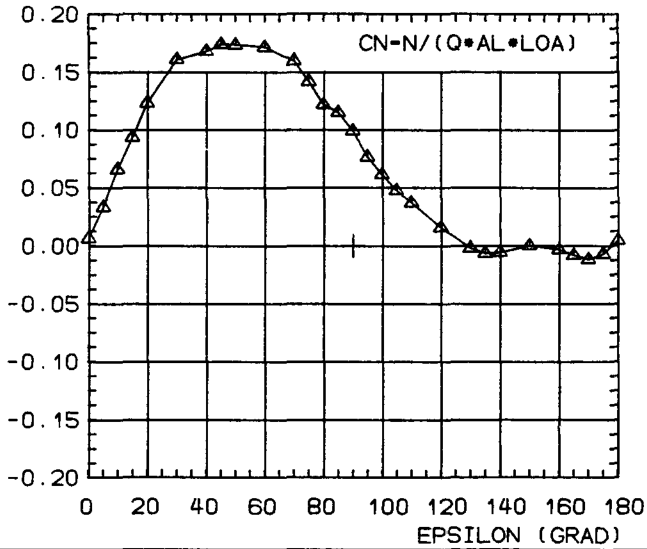


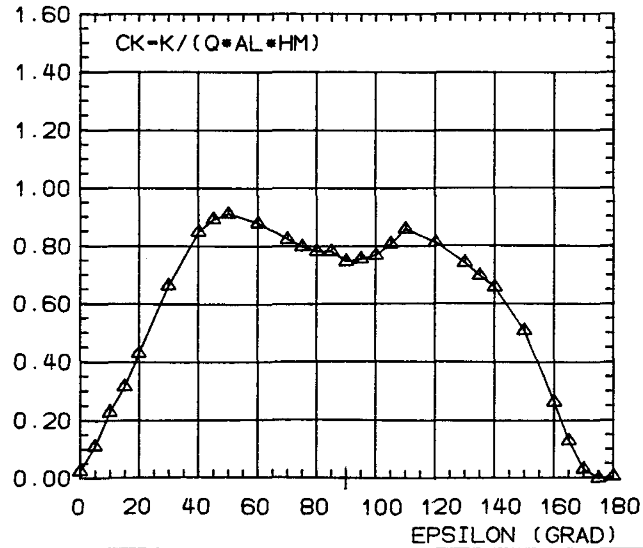
LAENGE PP	LPP M	58.35	SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL	M	7.12
LAENGE OA	LOA M	61.00	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH	M	3.14
BREITE IN DER WL	BWL M	13.00	MITTLERE HOEHE VON AL	HM	M	4.46
LATERALFLAECHE	AL M^2	260.33	TIEFGANG VORN	TV	M	4.85
FRONTFLAECHE	AF M^2	110.12	TIEFGANG HINTEN	TH	M	4.85

MASSSTAB 1:50 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.27E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON - 0°: WIND VON VORN Q - $\rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ , CK BEZUEGLICH WL

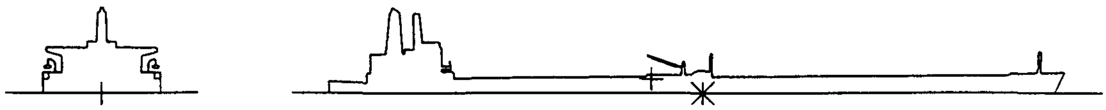






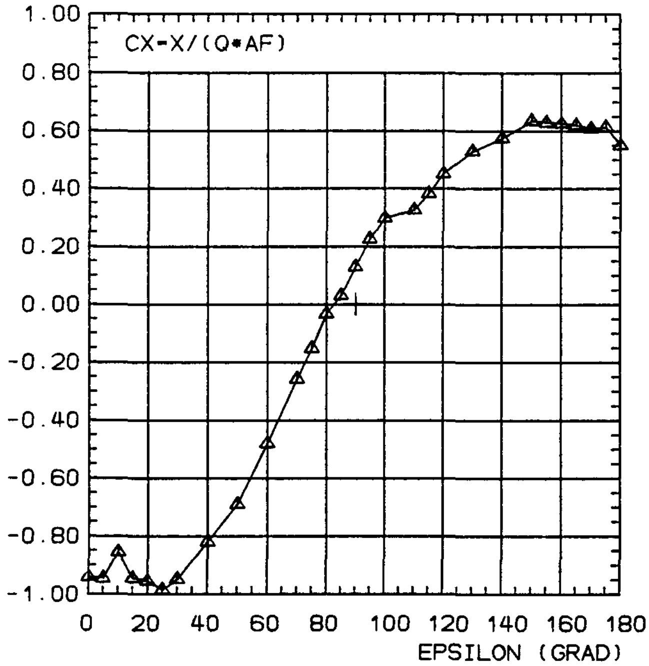


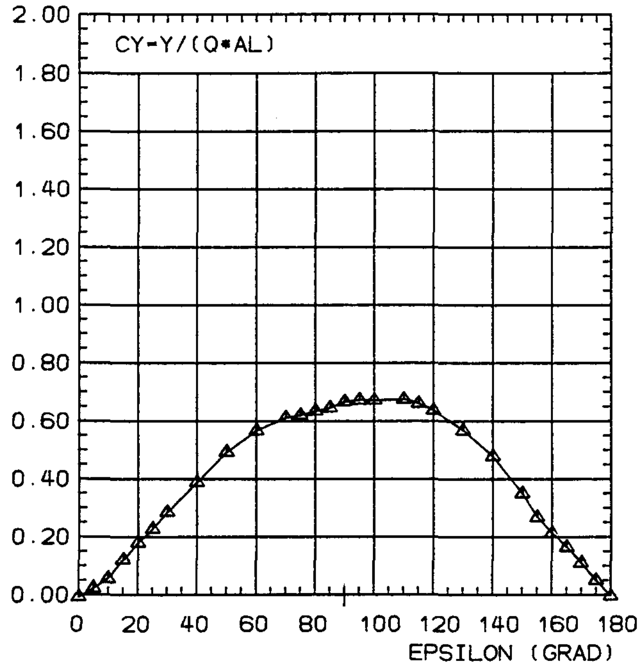
KENNUNG SUP0107BN A-9	OFFSHORE-VERSORGER	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

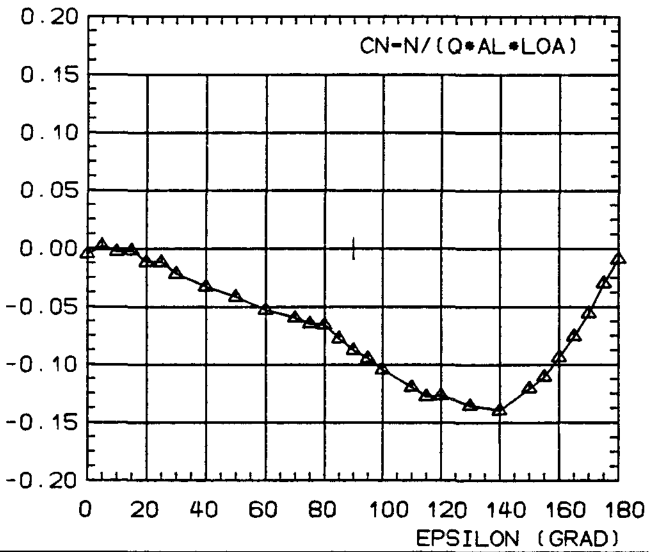


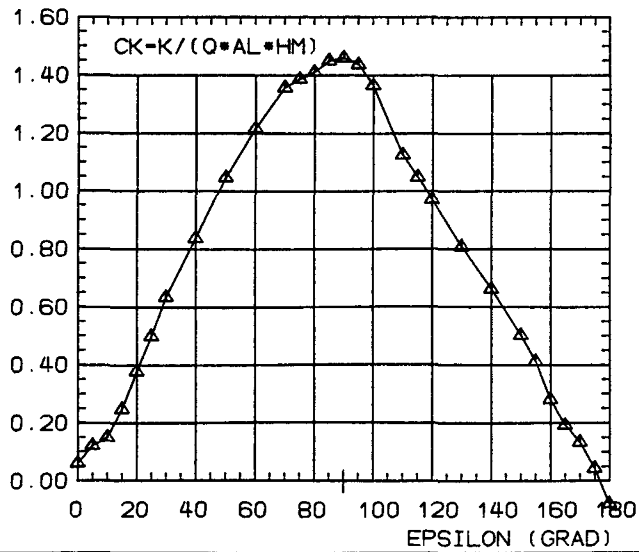
LAENGE PP	LPP	M	336.00	SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL	M	-24.45
LAENGE OA	LOA	M	351.40	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH	M	6.83
BREITE IN DER WL	BWL	M	55.40	MITTLERE HOEHE VON AL	HM	M	9.68
LATERALFLAECHE	AL	M^2	3401.47	TIEFGANG VORN	TV	M	23.50
FRONTFLAECHE	AF	M^2	1131.79	TIEFGANG HINTEN	TH	M	23.50

MASSSTAB 1:250 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.69E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ , CK BEZUEGLICH WL

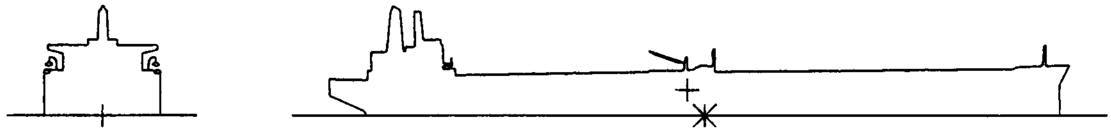






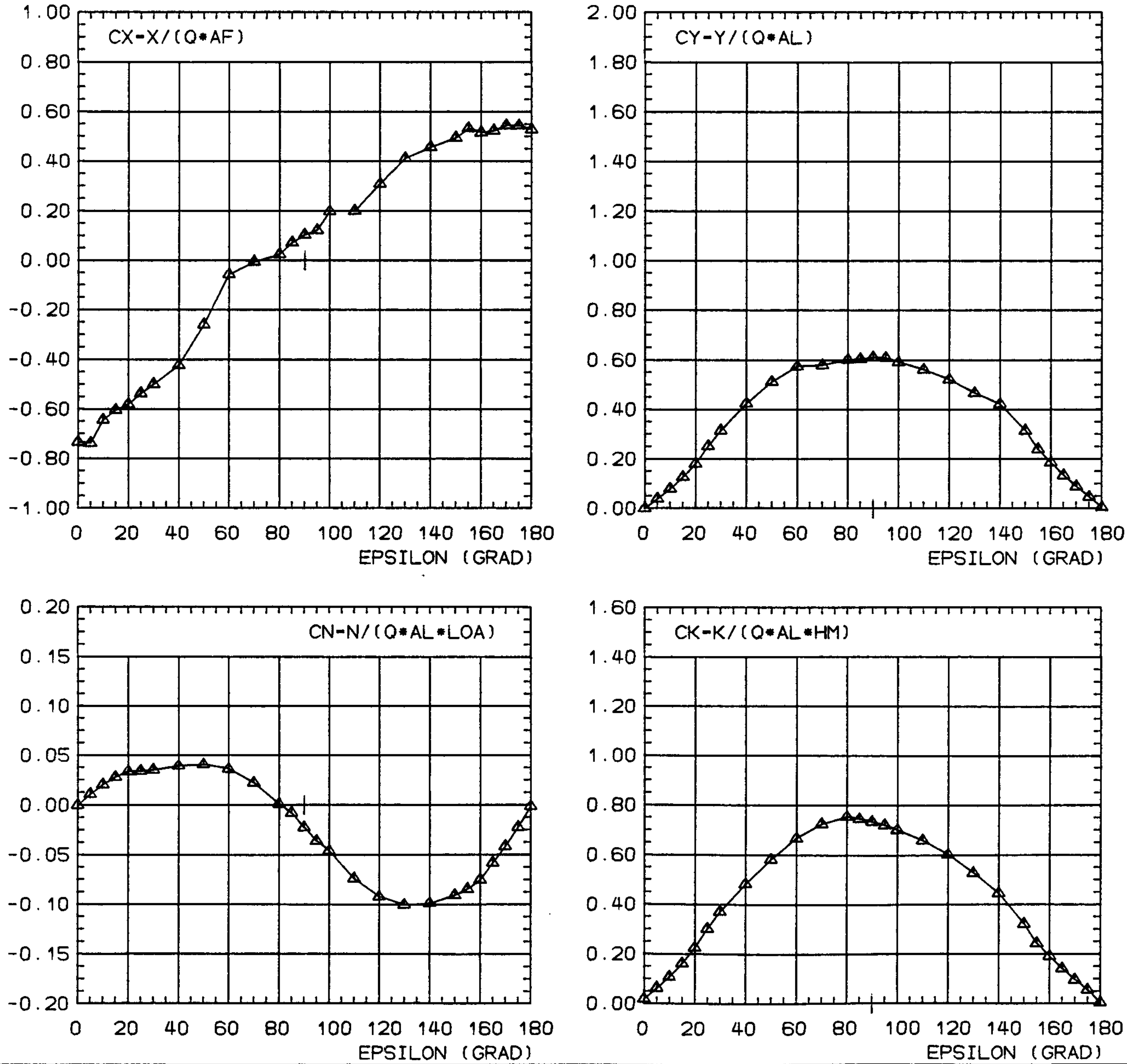


KENNUNG TAN0202BN A-10	TANKER	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG



LAENGE PP	LPP M	336.00	SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL M	-8.32
LAENGE OA	LOA M	351.40	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH M	12.34
BREITE IN DER WL	BWL M	55.40	MITTLERE HOEHE VON AL	HM M	22.31
LATERALFLAECHE	AL M^2	7839.63	TIEFGANG VORN	TV M	8.25
FRONTFLAECHE	AF M^2	1803.93	TIEFGANG HINTEN	TH M	13.00

MASSSTAB 1:250 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 2.09E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG
EPSILON = 0 °: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES
CN BEZUEGLICH ✳ , CK BEZUEGLICH WL



KENNUNG TAN0201BN A-11	TANKER	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

Anhang B: Beispiele

Beispiel 1. Marineschiff - Windlastparameter aus der kennzeichnenden Auftragung.

Beispiel 2. Forschungsschiff - Schätzen von Windkraft und Windmoment.

Beispiel 3. Forschungsschiff - Mindestschub zum Drehen durch den Wind.

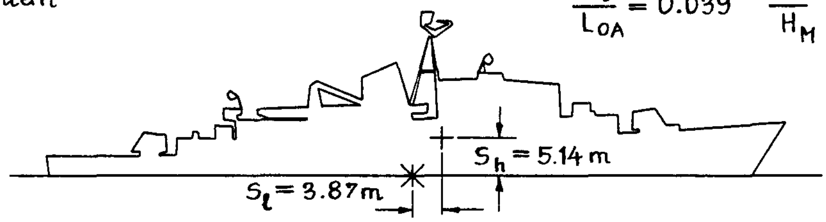
Beispiel 4. Bohrschiff - Anpassen von Windlastbeiwerten.

$CD_q = 0.82$

$CD_{\ell,AF} = 0.56$ für Wind von vorn und von achtern

$\frac{CD_\ell}{CD_q} = 0.139$

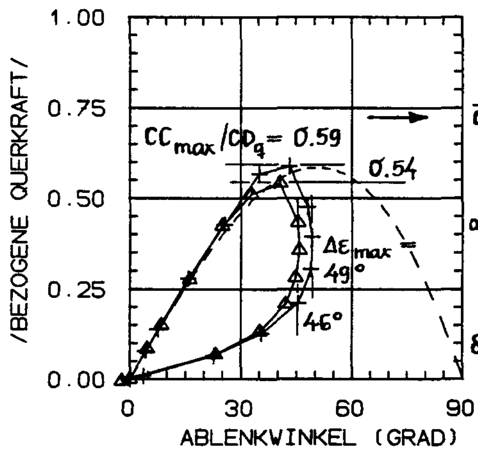
$\frac{S_\ell}{L_{OA}} = 0.039 \quad \frac{S_h}{H_M} = 0.59$



LAENGE PP	LPP M	93.60	SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL M	3.87
LAENGE OA	LOA M	98.60	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH M	5.14
BREITE IN DER WL	BWL M	11.00	MITTLERE HOEHE VON AL	HM M	8.29
LATERALFLAECHE	AL M^2	817.06			
FRONTFLAECHE	AF M^2	166.37			

MASSSTAB 1:100 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL 1.46E+06 WINDPROFIL GLEICHFOERMIG

ANSTROEMUNG: + VORLICH, △ ACHTERLICH



$$\bar{a} = \frac{2 \sin \Delta\varepsilon_{max}}{1 + \sin \Delta\varepsilon_{max}}$$

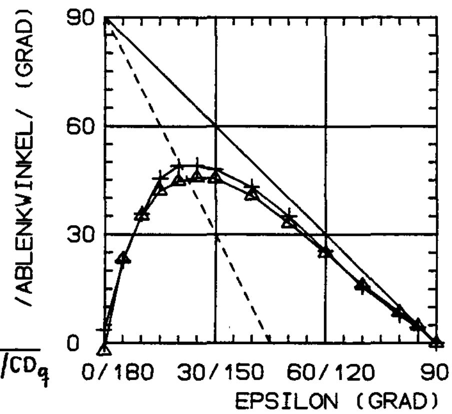
0.86 0.84

$$\alpha = \frac{1}{CD_\ell/CD_q} \quad \frac{1-\sin \Delta\varepsilon_{max}}{1+\sin \Delta\varepsilon_{max}}$$

1.01 1.17

$$\delta = \frac{1-\sin \Delta\varepsilon_{max}}{\sin \Delta\varepsilon_{max}} - \frac{1}{CC_{max}/CD_q}$$

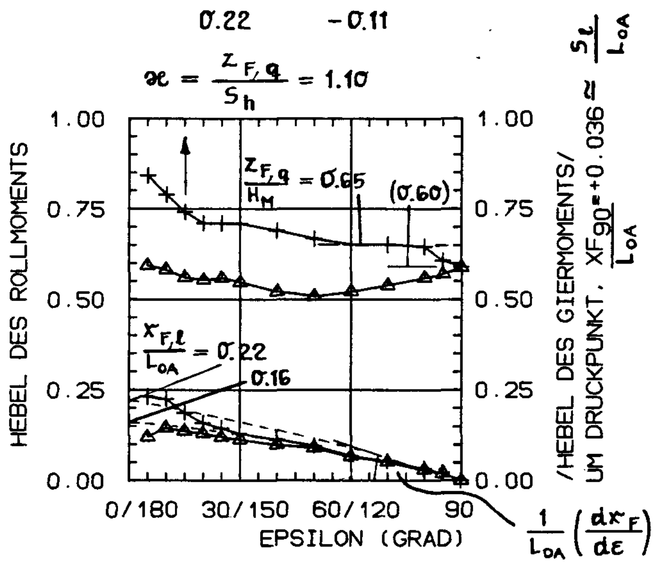
0.63 0.54



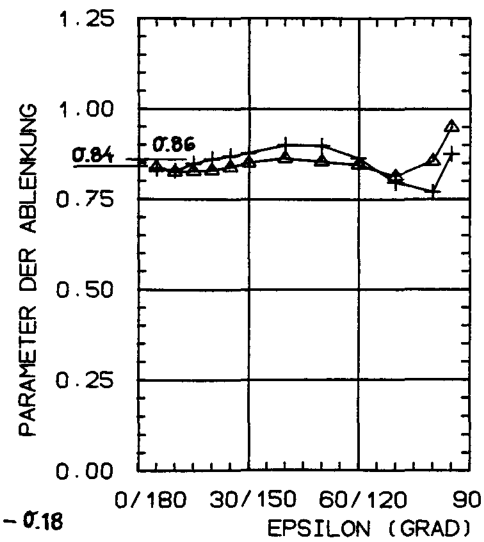
$$\gamma = \left| \frac{x_{F,\ell}}{(dx_F/d\varepsilon)_q} \right| - 1$$

0.22 -0.11

$$\varkappa = \frac{z_{F,q}}{S_h} = 1.10$$



$$\frac{1}{L_{OA}}\left(\frac{dx_F}{d\varepsilon}\right)_q = -0.18$$



Beispiel 1. Windlastparameter aus der kennzeichnenden Auftragung

Beispiel 2. Schätzen von Windkraft und Windmoment.

Für ein Forschungsschiff sind die Kraft- und Momentenbeiwerte abhängig vom Windeinfallswinkel zu ermitteln. Eine Schätzung nach dem Ellipsenprinzip mit $\bar{a} = 1-CD_l/CD_q$ reiche aus.

Kennzeichnende Auftragung in Bild 1, geschätzte Windlastbeiwerte in Bild 2.

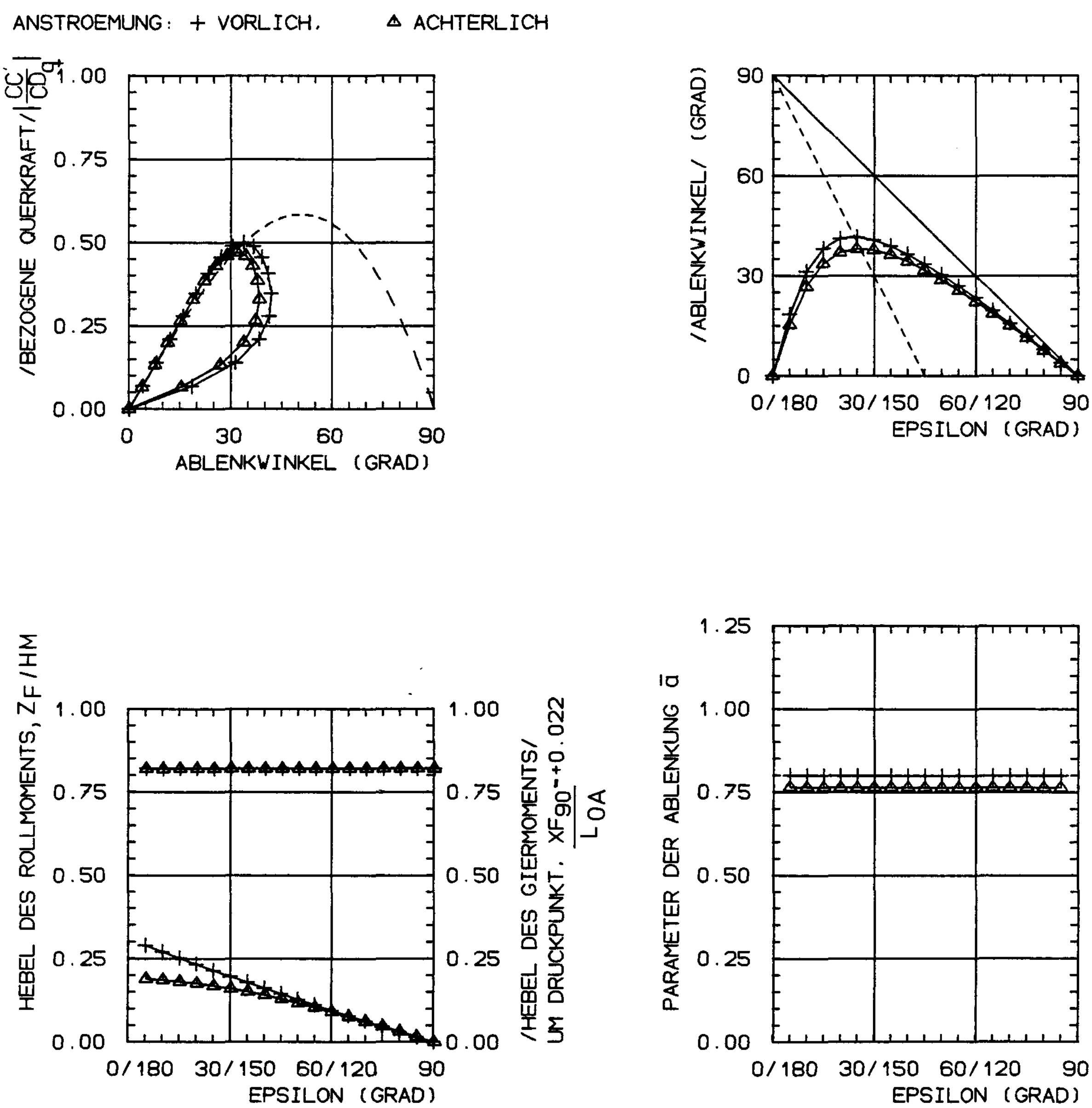
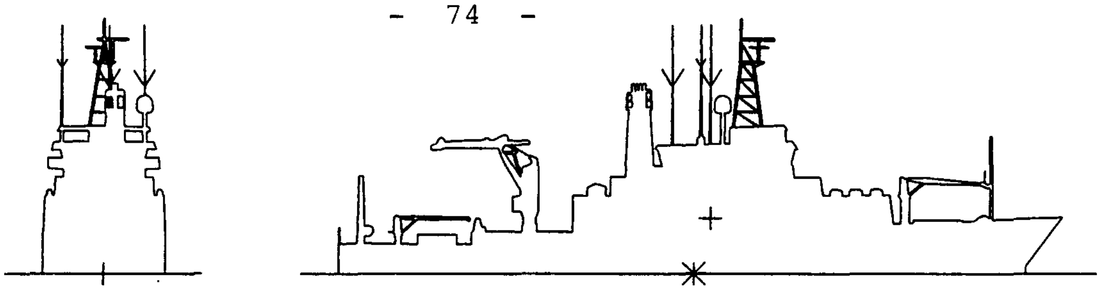


Bild 1 Geschätzte Windwirkung in kennzeichnender Auftragung

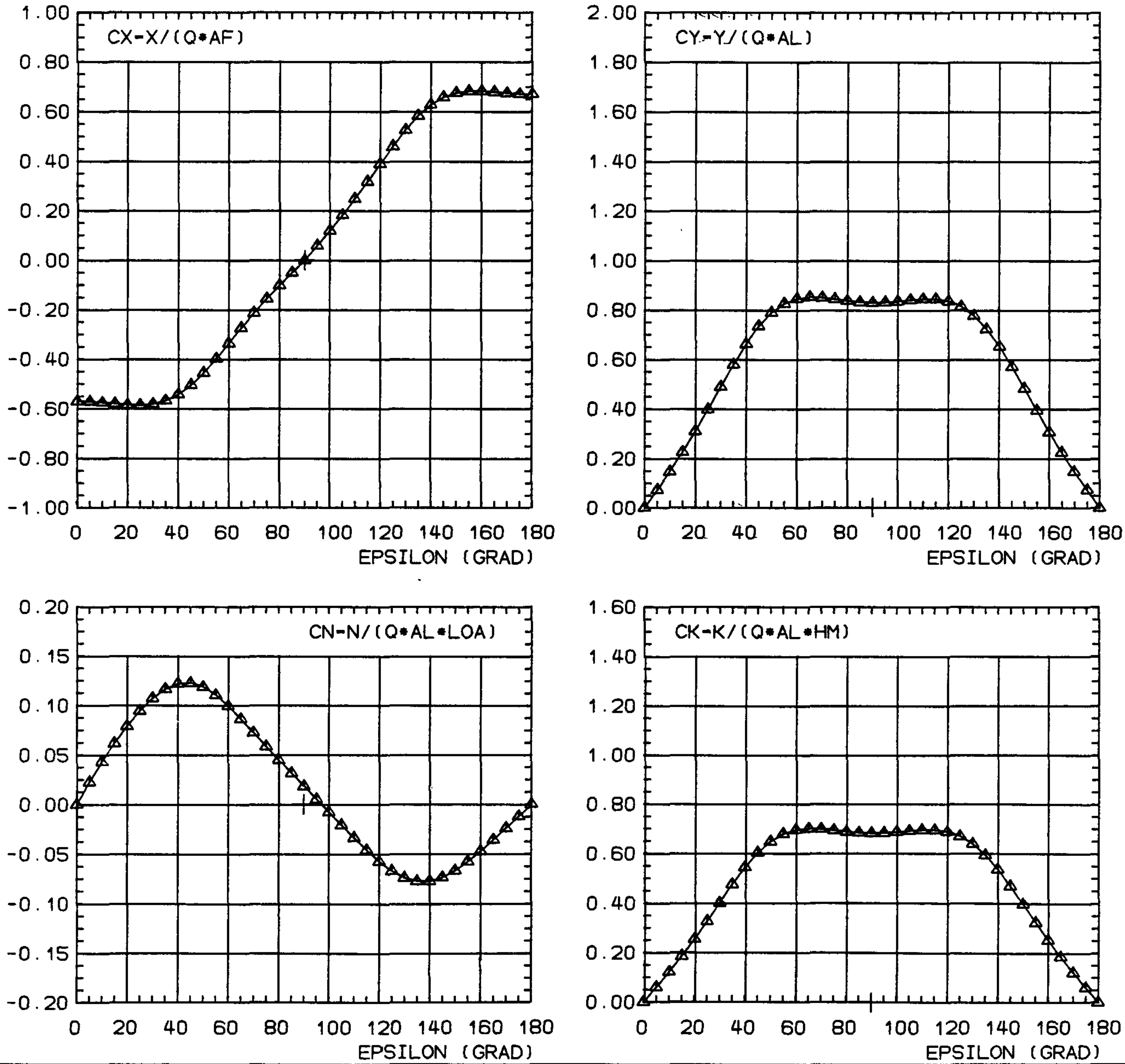


LAENGE PP	LPP	M	90.00	SCHWERPUNKT VON AL VOR ✳	SL	M	2.18
LAENGE OA	LOA	M	97.50	SCHWERPUNKT VON AL UEBER WL	SH	M	7.61
BREITE IN DER WL	BWL	M	16.50	MITTLERE HOEHE VON AL	HM	M	11.22
LATERALFLAECHE	AL	M^2	1093.83	TIEFGANG VORN	TV	M	4.80
FRONTFLAECHE	AF	M^2	320.18	TIEFGANG HINTEN	TH	M	4.80

MASSSTAB 1:1 KRAENGUNG 0.0° RE-ZAHL WINDPROFIL GLEICHFOERMIG

EPSILON = 0°: WIND VON VORN $Q = \rho U^2/2$ STAUDRUCK DES WINDES

CN BEZUEGLICH ✳ , CK BEZUEGLICH WL



KENNUNG RES0201BN Bild 2	Geschätzte Windlastbeiwerte für ein Forschungsschiff	INSTITUT FUER SCHIFFBAU UNIVERSITAET HAMBURG

Beispiel 3. Mindestschub zum Drehen durch den Wind.

Ein Forschungsschiff soll bei Windstärken bis 8 Beaufort nur mit dem Bugstrahlapparat durch den Wind gedreht werden können.
Wie groß ist der nötige Schub?

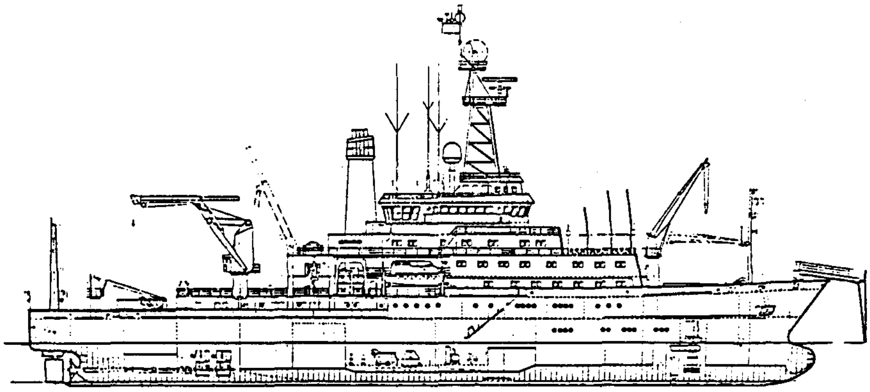


Bild 1 Forschungsschiff; Generalplan

Schiffsdaten:

Länge über alles	97,5 m	Breite	16,5 m
Länge zwischen den Loten	90,0 m	Tiefgang	5,1 m

über Wasser:		unter Wasser:	
Lateralfläche	1094 m²	Lateralfläche	503 m²
Frontfläche	320 m²	Hauptspant	84 m²
Lateralschwerpunkt vor Hauptspant	2,2 m	Lateralschwerpunkt vor Hauptspant	1,0 m

Abstand des Bugstrahlantriebs von Hauptspant: 33,4 m

Ansatz für die Wind- und Driftkräfte: Ellipsenprinzip mit $\bar{a} = 1 - CD_l/CD_q$. Berücksichtigung der Drift in den Windkräften.

Fall 1: Der Bugstrahlapparat erzeugt nur Querschub (Bild 2). Der Mindestschub beträgt

$$0{,}38 \frac{\rho}{2} u^2 A_L = 0{,}38 \cdot \frac{1{,}23}{2} \frac{kg}{m^3} \cdot 20^2 \left(\frac{m}{2}\right)^2 \cdot 1094\ m^2 = 102\ kN,$$

mit ρ Dichte der Luft, u Windgeschwindigkeit und A_L Lateralfläche über Wasser. Die maximale Driftgeschwindigkeit beträgt 15 % der Windgeschwindigkeit; das sind 3,0 m/s.

Fall 2: Der Bugstrahlapparat erzeugt auch Längsschub (Bild 3). Die Längskomponente der Windkraft am Schiff wird kompensiert, so daß es nur quer verdriftet mit maximal 6 % der Windgeschwindigkeit; das sind 1,2 m/s. Der nominelle Mindestschub beträgt

$$0{,}37 \frac{\rho}{2} u^2 A_L = 100\ kN.$$

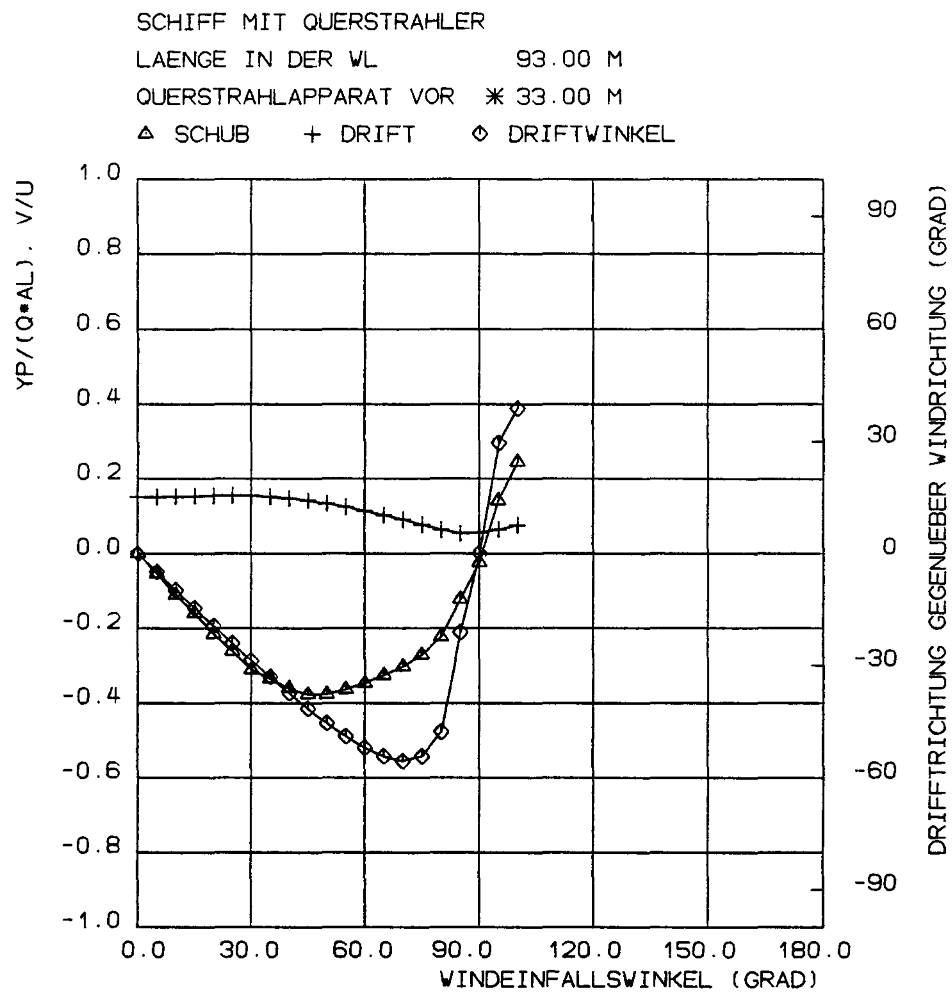


Bild 2 Querschub zum Drehen des Schiffes durch den Wind, bezogen auf Staudruck des Windes und Schiffslateralfläche über Wasser, $Y_p/(q\ A_L)$, positiv luvwärts, Driftgeschwindigkeit zu Windgeschwindigkeit, v/u, und Driftrichtung gegenüber der Windrichtung, positiv rechts vom Wind, über dem Windeinfallswinkel

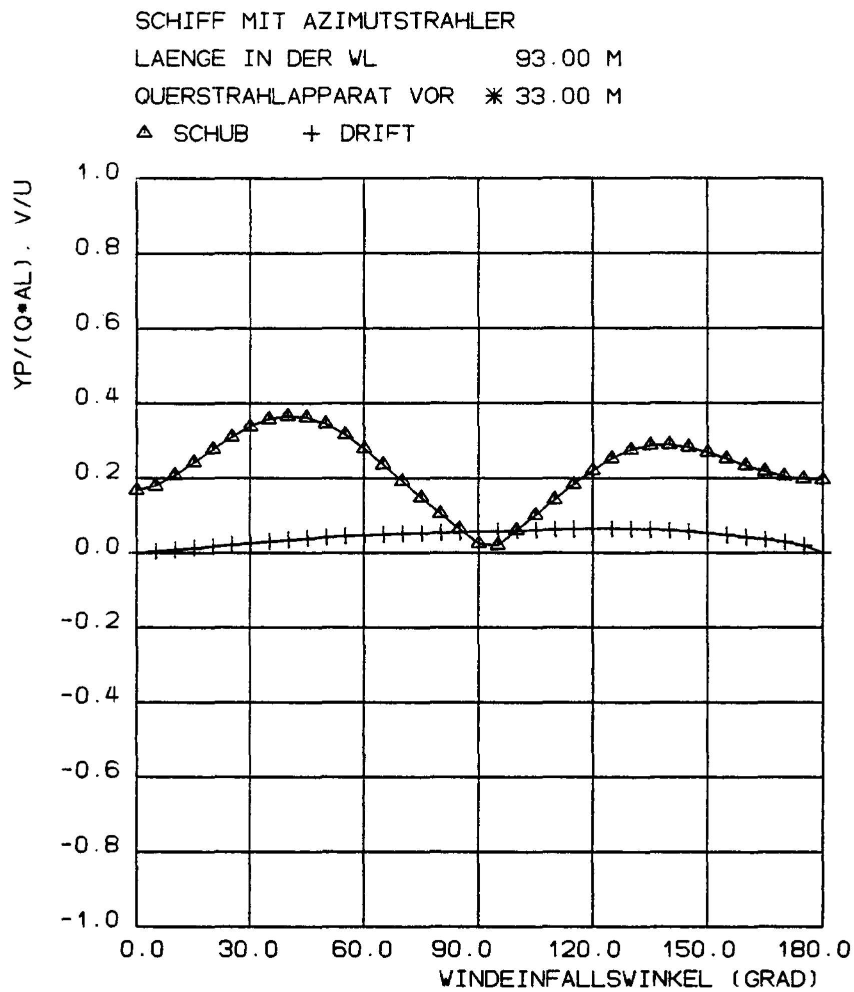
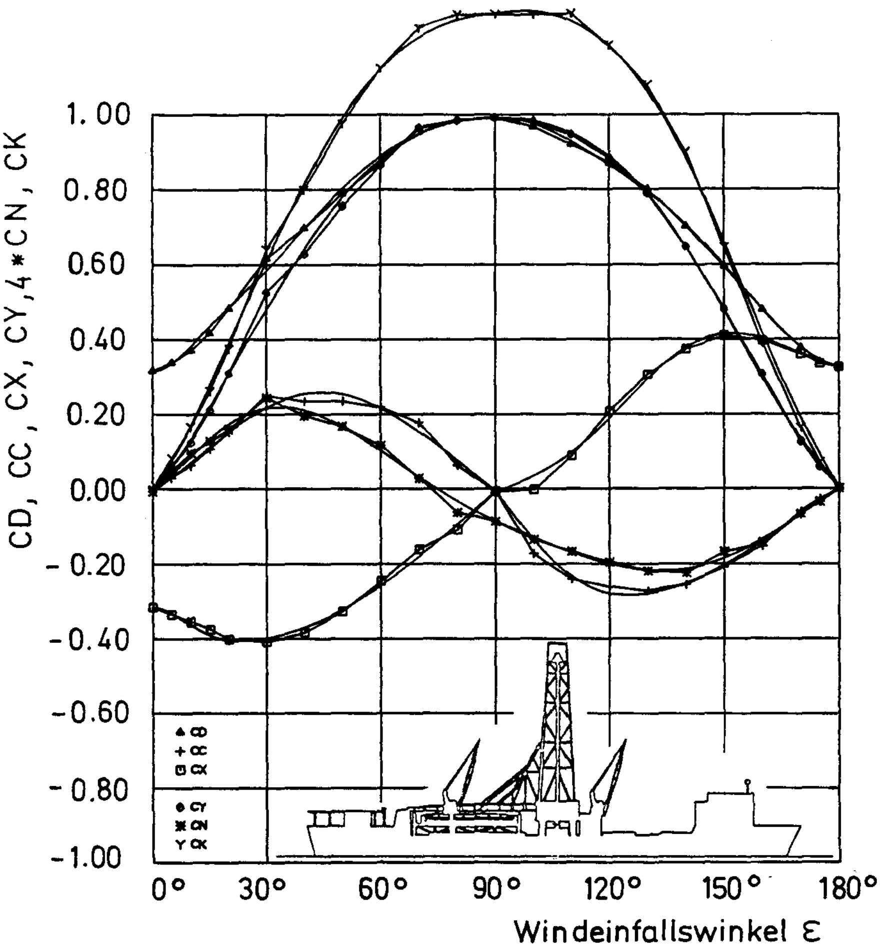


Bild 3 Schub zum Drehen des Schiffes durch den Wind, bezogen auf Staudruck des Windes und Schiffslateralfläche über Wasser, $Y_P/(q\ A_L)$, und Querdrift zu Windgeschwindigkeit, v/u, über dem Windeinfallswinkel



CD_q 0.99	$CD_{l,\varepsilon=0}$ 0.32	$CD_{l,\varepsilon=\pi}$ 0.33

Vorlicher Wind

μ 1.89	A_{CT} 0.366	m 0.01	p 1.86
ν 2.05	B_{CT} 1.82	n 1.66	q 15.3
$\Delta\varepsilon_q$ -0.41	$A_{\Delta\varepsilon}$ 0.522	$B_{\Delta\varepsilon}$ -0.039	$C_{\Delta\varepsilon}$ 0.015
$x_{F,q}$ -0.022	A_{XF} 0.069	B_{XF} -0.002	C_{XF} -0.641
$z_{F,q}$ 1.28	A_{ZF} -0.017	B_{ZF} 0.618	

Achterlicher Wind

μ 1.89	A_{CT} -0.401	m 0.23	p 1.67
ν 3.05	B_{CT} -0.566	n 1.16	q 1.31
$\Delta\varepsilon_q$ -0.41	$A_{\Delta\varepsilon}$ 0.532	$B_{\Delta\varepsilon}$ 0.251	$C_{\Delta\varepsilon}$ -0.133
$x_{F,q}$ -0.022	A_{XF} -0.115	B_{XF} -0.831	C_{XF} -0.090
$z_{F,q}$ 1.28	A_{ZF} 0.159	B_{ZF} 0.618	

Beispiel 4 Anpassen von Windlastbeiwerten; Approximationsfunktionen (strakende Linien) und Koeffizienten für ein Bohrschiff