

533 | März 1993

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Werner Blendermann

Schiffsform und Windlast- Korrelations- und Regressionsanalyse von Windkanalmessungen am Modell

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Schiffsform und Windlast – Korrelations- und Regressionsanalyse von Windkanalmessungen am Modell

Werner Blendermann, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1993

ISBN: 3-89220-533-7

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

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 533

**SCHIFFSFORM UND WINDLAST -
KORRELATIONS- UND REGRESSIONSANALYSE
VON WINDKANALMESSUNGEN AM MODELL**

Werner Blendermann

März 1993

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Koordinaten und Kennzeichnung der Windlast	1
3	Rückblick	3
4	Korrelation und Regression	4
5	Längs- und Querwiderstand	8
6	Ein Lastmodell	10
7	Analyse der Windkräfte	10
8	Analyse der Windmomente	14
9	Zeichnerische Analyse	16
10	Windlastfunktionen	17
11	Verfeinerung	19
12	Einfluß eines Windgradienten	23
13	Das Schiff mit Schlagseite	27
14	Manöver im Wind	31
15	Anwendungsfall	37
16	Schluß	39
17	Bezeichnungen	40
18	Literatur	42

Anhang: Windlastbeiwerte

1 Einleitung

Die rechnerische Simulation des Verhaltens von Schiffen in ihrer natürlichen Umgebung erfordert eine sorgfältige Formulierung der Kräfte und Momente, die durch Wind, Wellen und Umströmung auf das Schiff einwirken. Während die Berechnung der Wirkung von Strömung und Wellen Fortschritte macht, entzieht sich die Windwirkung der mathematischen Erfassung. Die Luftströmung am Schiff ist so schwierig, daß, zumindest gegenwärtig, numerische Lösungen nicht zu erwarten sind.

Beim Schiffsentwurf spielen aerodynamische Gesichtspunkte, von Fragen lokaler Windwirkung abgesehen, kaum eine Rolle. Ein Teilaspekt der Windlast ist der Luftwiderstand. Schiffe sind, mit wenigen Ausnahmen, über Wasser vorwiegend kantig. Nichts prägt die Form eines Objekts mehr als den Luftwiderstand vermindernde Maßnahmen. Doch solche Maßnahmen sind bei Schiffen selten. Gewöhnlich sind es andere Gründe wie der Wunsch nach Eleganz, die aerodynamisch günstige Formen mit bewirken. Als das Blaue Band eine gewinnbringende Trophäe war, erhielten Ozeanliner Aufbauten, die sich an strömungsgünstige Formen aus Windkanalversuchen anlehnten. Bei sehr schnellen Schiffen und hohen Treibstoffpreisen wird widerstandsbezogene Aerodynamik wieder mehr Beachtung finden.

Man kann die Windkräfte und Windmomente am Schiffsmodell im Windkanal messen. Oder man bestimmt sie nach einem Vergleichsschiff. Ermittlung nach Vorlage ist gängige und zuverlässige Praxis, wenn für ein Schiff keine Meßwerte vorliegen. Inzwischen gibt es so viele Messungen, daß man immer ein hinreichend ähnliches Schiff findet, sofern es sich nicht um neue unkonventionelle Entwürfe handelt.

Bisher ungenutzt geblieben sind Eigenschaften der Windwirkung, die an allen Schiffen auftreten. Schiffe haben über Wasser vielfältige Formen. Wie Windlast und Schiffsform zusammenhängen und ob Unterschiede in der Windlast zufallsbedingt oder typisch sind für ein Schiff, läßt sich mit Verfahren der Statistik ermitteln. Das Ziel ist die funktionale Darstellung der Windkräfte und Windmomente durch 'loading functions', im Deutschen mit 'Lastfunktionen' übersetzt, mit wenigen identifizierbaren Parametern.

Das Datenmaterial der Untersuchung stammt aus Windkanalmessungen in gleichförmiger, turbulenzarmer Strömung. Ergänzende Modellversuche wurden durchgeführt zum Einfluß ungleichförmiger Anströmung und zum Schiff mit Schlagseite. Ergebnisse der Untersuchung werden durch Beispielrechnungen ergänzt.

Windlastfunktionen können den Windkanalversuch nicht ersetzen, wo es um Feinheiten der Windwirkung geht. Im Anhang ist deshalb und auch zum Vergleich eine Auswahl von Messungen aus dem Datenmaterial dieser Untersuchung zusammengestellt.

2 Koordinaten und Kennzeichnung der Windlast

Zur Erfassung der Windkräfte und Windmomente am Schiff wird ein rechtshändiges kartesisches Koordinatensystem mit Ursprung in der Wasserlinie auf Hauptspant verwendet (Bild 1). Die x -Achse weist bugwärts, die y -Achse ist horizontal und nach Steuerbord

gerichtet und die z -Achse vertikal abwärts. Das Koordinatensystem macht Krängung und Trimmänderungen des Schiffs nicht mit. Der Anströmwinkel ε (Einfallswinkel des scheinbaren Windes) ist positiv entgegen dem Uhrzeiger und wird von der Längsachse aus gemessen; $\varepsilon = 0$ bedeutet Anströmung von vorn.

Die Kräfte in diesen Koordinaten sind die Längskraft X , die Seitenkraft Y und die (hier nicht näher benannte) Vertikalkraft. Das Giermoment N ist positiv bei Drehung von x nach y und das Rollmoment K bei Drehung von y nach z . Die Kraft in Richtung des scheinbaren Windes (Resultierende aus Wind und Fahrtwind) ist der Widerstand D und die Kraft quer dazu die Querkraft C , positiv nach links, wenn man in Windrichtung blickt. T bezeichnet die Resultierende der horizontalen Kräfte. Die Vertikalkraft, entgegengesetzt gleich dem Auftrieb, kann Rollmoment erzeugen. Sie hat bei konventionellen Schiffen unmittelbar keine Bedeutung. Ganz unwesentlich für diese Schiffe ist das Moment um die Querachse (Stampfmoment).

Die Windkräfte werden bezogen auf den Staudruck der Anströmung $q = \frac{\rho}{2}u^2$, $\rho \simeq 1.23 \text{ kg/m}^3$ Dichte der Luft, u Geschwindigkeit des scheinbaren Windes, und die Lateralfäche A_L des Schiffs. Man erhält die dimensionslosen Kraftbeiwerte

$$CX, CY, CD, CC, CT = (X, Y, D, C, T)/(q * A_L) \quad (1)$$

Es ist

$$CD = CY * \sin \varepsilon - CX * \cos \varepsilon, \quad CC = CX * \sin \varepsilon + CY * \cos \varepsilon \quad (2)$$

Die Längskraft wird auch auf die Frontschattenfläche A_F bezogen. Der Beiwert ist dann

$$CX_{AF} = X/(q * A_F) \quad (3)$$

Der derart bezogene Längswiderstand wird mit CD_{lAF} (Bezugsfläche A_F) bezeichnet, sonst CD_l (Bezugsfläche A_L). In dieser Form ist der Längswiderstand vergleichbar mit Widerstandsbeiwerten anderer Objekte in der üblichen Formulierung. Der Beiwert des Querwiderstands ist CD_q .

Der Beiwert des Giermoments ist

$$CN = N/(q * A_L * L_{oa}) \quad (4)$$

mit L_{oa} Länge über alles, und der Beiwert des Rollmoments

$$CK = K/(q * A_L * H_M) \quad (5)$$

mit $H_M = A_L/L_{oa}$ mittlere Höhe des Lateralplans.

Division des Giermoments durch die Seitenkraft ergibt den Hebelarm

$$x_F = N/Y \quad \text{oder} \quad x_F/L_{oa} = CN/CY \quad (6)$$

und Division des Rollmoments durch die Seitenkraft den Hebelarm

$$z_F = K/Y \quad \text{oder} \quad z_F/H_M = CK/CY \quad (7)$$

Bild 2 zeigt CX_{AF} , CY , CN und CK für ein Containerschiff, ein Fährschiff und ein Offshore-Versorgungsschiff (siehe auch **CON0101BN**, **FER0201BN** und **SUP0101BN** im Anhang).

3 Rückblick

Sofern Wind nicht den Antrieb liefert, findet er im Schiffsbetrieb wenig Beachtung. Trotzdem ist er eine wichtige Einflußgröße. Die Schwimmstabilität von Fahrgastschiffen wird unmittelbar nach dem Windrollmoment bemessen. Das Ergebnis der Meilenfahrt zur Schiffs-erprobung kann eine Korrektur um den Windeinfluß erfordern. Bei Manövern sowie Ankern oder Halten der Position ist es der Wind, der die Kräfte am Schiff beherrscht. Schiffsrouting ist die moderne Art der Schifffahrt, die dem Wind wieder Beachtung schenkt.

Seit gut einem Jahrhundert ist der Störfaktor Wind am Schiff Gegenstand von Untersuchungen [8]. Das Interesse galt zunächst dem Luftwiderstand bei Wind unmittelbar von vorn. *Froude* [16] benötigte diesen Wert, um den am Rumpf der 52 m langen Sloop GREY-HOUND gemessenen Schleppwiderstand um den Einfluß des Fahrtwindes zu korrigieren. Er stellte fest, daß der Luftwiderstand etwa 1.5 % des Wasserwiderstands ausmachte. Die Umrechnung ergibt $CX_{AF} = 1.04$. Für ein Schiff, das praktisch nur aus Rumpf bestand und als einzigen Aufbau auf dem Vorschiff ein Gerüst mit dem Dynamometer zur Messung des Schleppwiderstands trug, ist das ein hoher Wert und nur zum Teil dadurch zu erklären, daß der Luftwiderstand bei Wind von achtern gemessen worden war.

Hohe Werte lieferte auch die erste Windlastfunktion, die diese Bezeichnung verdient, für den Längswiderstand [3]:

$$X(\varepsilon = 0) = k * V^2 * A \quad (8)$$

mit $k = 0.0043$ für alle Schiffe. Die Winddruckfläche A war in Quadratfuß und die Relativgeschwindigkeit V von Schiff und Wind in Knoten anzusetzen. Die resultierende Längskraft X lautete dann in pounds. Als Annäherung für A wurde die Frontschattenfläche A_F genommen.

Heute schriebe man

$$X(\varepsilon = 0) = CD_{lAF} * \frac{\rho}{2} u^2 * A_F \quad (9)$$

Dem Faktor k entspricht ein Beiwert des Längswiderstands $CD_{lAF} = 1.26$. Dieser Wert liegt wesentlich über dem, was an heutigen Schiffen gemessen wird, und war wohl auch für damalige Schiffe ein hoher Wert.

Dove und *Ferris* [15] waren die ersten, die eine Parameterdarstellung der Windlast versuchten. Ihnen ging es um die Windlängskraft am Schiff im Zusammenhang mit den Ankerkräften. Sie formulierten diese Kraft als Beiwert

$$CX_{AS} = \frac{X}{\frac{\rho}{2} u^2 * A_S} \quad (10)$$

mit $A_S = A_L * \sin \varepsilon + A_F * \cos \varepsilon$ für die unbekannte Windschattenfläche (projizierte Fläche) des Schiffs, und stellten fest, daß dieser Beiwert bei gleicher Anströmung vom Seitenverhältnis $H_M/L_{oa} = A_L/L_{oa}^2$ abhängt. Bild 3 zeigt das Windlastdiagramm von *Dove* und *Ferris*, ergänzt um Werte von heutigen Schiffen für Anströmung von vorn (Längswiderstand). Offenbar waren die Schiffe damals aerodynamisch sehr ähnlich. Wie ist es sonst zu verstehen, daß sich heutige Schiffe nur unvollkommen einfügen ?

Wagner [40] versuchte eine Parametrisierung von Längs- und Querwiderstand mit dem Verhältnis von mittlerer Höhe zu Schiffsbreite und mittlerer Höhe zu Schiffslänge. Es blieb bei Ansätzen.

Isherwood [21] schließlich wählte einen formalen Ansatz für Längskraft, Seitenkraft und Rollmoment. Er setzte lineare Abhängigkeit der Windlastbeiwerte von Verhältniswerten des Schiffs voraus, gebildet aus Länge (L_{oa}) und Breite (B), Lateralfäche (A_L), Frontschattenfläche (A_F), Lateralfäche der Aufbauten (A_S), umwehler Umfang (U) und Abstand des Lateralschwerpunkts vom Bug (s); ferner berücksichtigte er die Zahl der Gruppen von Masten (M):

$$CX = -(A_0 + A_1 \frac{2A_L}{L_{oa}^2} + A_2 \frac{2A_F}{B^2} + A_3 \frac{L_{oa}}{B} + A_4 \frac{U}{L_{oa}} + A_5 \frac{s}{L_{oa}} + A_6 * M \pm 1.96 \sigma_X) \quad (11)$$

$$CY = B_0 + B_1 \frac{2A_L}{L_{oa}^2} + B_2 \frac{2A_F}{B^2} + B_3 \frac{L_{oa}}{B} + B_4 \frac{U}{L_{oa}} + B_5 \frac{s}{L_{oa}} + B_6 \frac{A_S}{A_L} \pm 1.96 \sigma_Y \quad (12)$$

$$CN = C_0 + C_1 \frac{2A_L}{L_{oa}^2} + C_2 \frac{2A_F}{B^2} + C_3 \frac{L_{oa}}{B} + C_4 \frac{U}{L_{oa}} + C_5 \frac{s}{L_{oa}} \pm 1.96 \sigma_N \quad (13)$$

Die Koeffizienten $A_n(\varepsilon)$, $B_n(\varepsilon)$ und $C_n(\varepsilon)$ ermittelte Isherwood nach der Methode der kleinsten Quadrate aus Windkanalmessungen an 49 Schiffen. Es ist σ die Streuung (Standardabweichung). Die mittlere Streuung über alle Windeinfallswinkel ist mit 0.10 für X , 0.04 für Y und 0.013 für N angegeben. Tabelle 1 gibt die Koeffizienten für Längs- und Querströmung wieder.

Beispiel: Windlastbeiwerte nach Isherwood für ein Fährschiff im Vergleich mit Meßwerten. Für den Vergleich ist ein neueres Schiff gewählt worden (**FER0301BN**, Baujahr 1989) [2]. Das Schiff hat die folgenden Daten: $L_{oa} = 161.0$ m, $B = 29.0$ m, $A_L = 4223.3$ m², $A_F = 898.2$ m², $H_M = 26.2$ m. Heutige Fährschiffe haben große Lateralfächen. Bis auf die Lateralfäche, in der dimensionslosen Form $2 * A_L / L_{oa}^2$, liegen alle anderen Werte innerhalb des Bereichs für das von Isherwood untersuchte Kollektiv. Die Parameterwerte sind:

$\frac{2A_L}{L_{oa}^2}$	$\frac{2A_F}{B^2}$	$\frac{L_{oa}}{B}$	$\frac{U}{L_{oa}}$	$\frac{s}{L_{oa}}$	$\frac{A_S}{A_L}$	M
0.326	2.14	5.55	1.50	0.532	0.583	1

Bild 4 zeigt das Ergebnis der Rechnung. Gute Übereinstimmung besteht bei der Seitenkraft, ein Ergebnis, das für diese Komponente wegen der geringen Unterschiede für unterschiedliche Schiffe zu erwarten war. Weniger gut getroffen ist das Giermoment bei vorlichem Wind. Die Längskraft aber, vom Längswiderstand abgesehen, liegt völlig daneben. Man beachte, daß sie auf die Lateralfäche bezogen ist (maximales $|CX_{AF}| = 0.40 * A_L / A_F = 1.88$). Tatsächlich ist die Windlängskraft schwer zu bestimmen. Bei Fährschiffen wechselt sie die Richtung im Quadranten des Windeinfalls. Aber so ungewöhnlich ist die Form heutiger Fährschiffe nicht, daß man keinen besseren Wert erwarten könnte. Abgesehen von Längs- und Querwiderstand ist das Ergebnis unzureichend. Es spricht gegen Isherwoods Ansatz.

4 Korrelation und Regression

Sehen wir im Augenblick davon ab, daß es um Schiffe geht. Betrachten wir sie als längliche, rauhe Objekte, deren Rauigkeiten wie im Ölnebel eines Rauchversuchs verschwinden,

Tabelle 1: Isherwoods [28] Koeffizienten für Längs- und Querströmung

ε°	A_0 B_0	A_1 B_1	A_2 B_2	A_3 B_3	A_4 B_4	A_5 B_5	A_6 B_6	σ_X σ_Y
0	2.152 -	-5.00 -	0.243 -	-0.164 -	- -	- -	- -	0.086 -
90	0.355 0.889	- -	- 0.138	- -	-0.247 -	- -0.66	0.018 -	0.094 0.051
180	-2.529 -	3.76 -	-0.174 -	0.128 -	- -	1.55 -	- -	0.112 -

Tabelle 2: Schiffstyp und Kürzel

	Kürzel		Kürzel
Autotransporter	CAR	Passagierschiff	PAS
Containerschiff	CON	Forschungsschiff	RES
Zerstörer	DES	Schnellboot	SPE
Taucherbasisschiff	DIV	Offshoreversorger	SUP
Bohrschiff	DRI	Gastanker	TAG
Fährschiff	FER	Tanker	TAN
Fischkutter	FIS	Tender	TEN
Frachtschiff	FRE		

und beschreiben sie durch Länge, Breite und Höhe sowie Fläche und Flächenmoment bzw. den Quotienten von Flächenmoment und Fläche, den Flächenschwerpunkt. Ein wichtiges qualitatives Merkmal ist der Schiffstyp.

Als Bezugslänge dient die Länge über alles, L_{oa} , und als Bezugsfläche die Lateralfläche, A_L . Objektbreite ist die Schiffsbreite B und Höhe die mittlere Höhe des Lateralplans, $H_M = A_L/L_{oa}$. Die Längslage des Lateralschwerpunkts bezüglich Hauptspant wird mit s_L und die Höhenlage über der Schwimmlinie mit s_H bezeichnet.

Der Untersuchung liegen 23 Schiffe zugrunde (mit Varianten 34 Objekte). Davon sind 17 Schiffe im Windkanal des Instituts für Schiffbau untersucht worden. Die Windlastbeiwerte für diese Schiffe sind zum Teil veröffentlicht [12, 13, 34, 5, 10]. Die Windlastbeiwerte von weiteren sechs älteren Schiffen stammen aus der gut dokumentierten Sammlung von *Aage* [1]. Das Kollektiv ist keine Stichprobe im Sinne der Statistik, aber sicher ein repräsentativer Querschnitt der Grundmenge heute in Fahrt bzw. noch in Fahrt befindlicher Schiffe. Es hat keine Auslese unter den Objekten gegeben. Schiffstyp und dafür verwendetes Kürzel sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Versuchsbedingungen waren für alle Schiffe gleich. Die Modelle waren über einer Bodenplatte drehbar angeordnet und wurden in turbulenzarmer, gleichförmiger Strömung untersucht. Eine Auswahl von Meßergebnissen ist im Anhang zusammengestellt.

Die mittlere Höhe des Lateralplans, bezogen auf die Schiffslänge (keine Spiegelung an der Wasserlinie !), entspricht dem halben Seitenverhältnis eines allseits umströmten Objekts,

z.B. einer Platte. Dieser Wert ist in Bild 5 a über der Schiffslänge aufgetragen. Er ist nicht zu verwechseln mit dem Schlankheitsgrad, der hier besser durch das Verhältnis von Frontschattenfläche A_F zu Lateralfläche wiedergegeben wird (Bild 5 b). Trotz der starken Streuung ist eine Abnahme der Parameter mit der Schiffslänge zu erkennen: Die Regressionsgeraden fallen mit zunehmender Schiffslänge.

Im Mittel ist $H_M/L_{oa} = 0.091$ und $A_F/A_L = 0.27$, die Streuung beträgt 0.026 bzw. 0.09. Man muß diese Parameter nennen, auch wenn sie für die Windlast ohne Bedeutung sind. Welche Parameter wichtig sind, wird die Regressions- und Korrelationsanalyse [32] der Meßdaten zeigen. Wir wollen die beiden Schiffparameter nutzen, um wiederkehrende Begriffe der Analyse einzuführen.

Der Grad des Zusammenhangs zwischen Variablen läßt sich durch den Korrelationskoeffizienten messen. Er beträgt - 0.39 für das Seitenverhältnis und für den Schlankheitsgrad. Daß beide Datensätze denselben Wert liefern, ist Zufall. Der Korrelationskoeffizient bei linearer Regression, in der Folge mit KK abgekürzt, kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Ist er Null, besteht kein Zusammenhang zwischen den Variablen. Die Korrelation ist um so ausgeprägter, je mehr $|KK|$ sich dem Wert 1 nähert; ± 1 bedeutet funktionalen Zusammenhang. Das Vorzeichen gibt an, ob die Korrelation positiv oder negativ ist. In diesem Fall ist sie negativ: Das Seitenverhältnis nimmt mit zunehmender Schiffslänge ab, Schiffe werden mit zunehmender Länge schlanker.

Ob diese Aussage aus dem vorliegenden Datensatz gezogen werden darf, läßt sich mit der Student-Verteilung prüfen [44]. Wenn der Betrag von KK größer oder gleich einem Mindestwert ist, der sich aus dem gewählten Vertrauensbereich, hier mit 0.95 angenommen (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %), und der Zahl Freiheitsgrade (Probenumfang minus Zahl aus der Probe geschätzter Parameter), hier $34 - 2 = 32$, ergibt (Tabelle 3), ist die Korrelation signifikant gegen die Nullhypothese, daß kein Zusammenhang besteht. Dieser Wert beträgt 0.340 im zweiseitigen Test bzw. 0.288 im einseitigen Test, wenn das Vorzeichen von KK von vornherein sicher ist. Seitenverhältnis sowie Schlankheitsgrad können mit der Schiffslänge nur abnehmen, das erzwingen schon begrenzte Durchfahrtshöhen und -breiten, also $|KK| = 0.39 > 0.288$. Aber auch wenn das nicht sicher wäre, gälte die Korrelation als signifikant ($|KK| > 0.340$).

Das in Bild 5 eingetragene Streuungsmaß ist die Standardabweichung der Aufpunkte von der Regressionsgeraden, 0.024 für H_M/L_{oa} und 0.08 für A_F/A_L . Je geringer diese Streuung ist, je mehr sich die Aufpunkte der Regressionsgeraden nähern, um so schärfer ist diese bestimmt. Einen Anhaltswert für den Anteil der Streuung, der durch die Abhängigkeit der Parameter voneinander bedingt ist, gibt das Quadrat des Korrelationskoeffizienten. Für das Seitenverhältnis bedeutet dies, daß $0.39^2 = 0.15$, also nur etwa 15 % aus der Änderung der Schiffslänge durch lineare Regression zu erklären sind; 85 % haben andere Ursachen.

Von der Schiffslänge (unabhängige Einflußgröße) kann man also auf die mittlere Höhe der Lateralfläche oder das Verhältnis von Frontschattenfläche zu Lateralfläche schließen (abhängige Zielgröße). Niemand wird die Schiffslänge aus H_M/L_{oa} bzw. A_F/A_L bestimmen wollen. Grundsätzlich gibt es jedoch für jeden Datensatz zwei Regressionsgeraden, je nachdem welcher Parameter als Einflußgröße und als Zielgröße aufgefaßt wird. Wenn $|KK| < 1$, bedeutet Vertauschen von abhängigem und unabhängigem Parameter nicht Umkehr der Funktion. Die Regressionsgeraden schneiden sich im Schwerpunkt des Daten-

Tabelle 3: Mindestwerte des Korrelationskoeffizienten aus der Student-Verteilung für einen Vertrauensbereich von 0.95 (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%); Auszug aus Sachs [32]

Zahl Freiheitsgrade	Zweiseitiger Test	Einseitiger Test
20	0.423	0.360
21	0.413	0.352
22	0.404	0.344
23	0.396	0.337
24	0.388	0.330
25	0.381	0.323
26	0.374	0.317
27	0.367	0.311
28	0.361	0.306
29	0.355	0.301
30	0.349	0.296
35	0.325	0.275
40	0.304	0.257
50	0.273	0.231
60	0.250	0.211
70	0.232	0.195
80	0.217	0.183
90	0.205	0.173
100	0.195	0.164

satzes und klaffen um so mehr, je kleiner $|KK|$ ist. Für $KK = 0$ stehen sie senkrecht aufeinander und verlaufen parallel zu den Achsen.

Bei der späteren Analyse der Windkräfte und Windmomente kann die Entscheidung, welche der beiden Regressionen sachgemäß ist, schwierig sein. Bei ausgeprägter Korrelation ist der Unterschied zwischen den Regressionsfunktionen allerdings vernachlässigbar gering. Hier und folgend ist stets die Regression von der Variablen der Ordinate auf die Variable der Abszisse durchgeführt worden. Die Zahl der Aufpunkte beträgt 34 oder die doppelte Zahl. Dafür muß für gesicherten Zusammenhang bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % $|KK|$ mindestens 0.340 bzw. 0.239 betragen im zweiseitigen Test und 0.288 bzw. 0.201 im einseitigen Test (Tabelle 3).

Die Korrelationsanalyse verlangt, daß die Wertepaare eine zweidimensionale Normalverteilung bilden oder zumindest angenähert bilden. Diese Forderung ist hier und folgend überprüft und bestätigt worden. Auch die Verteilung der Aufpunkte um die Regressionsgerade ist normalverteilt. Das folgt bereits aus der Erfüllung der Grundforderung.

Ein Maß für Unsymmetrie des Schiffs in Längsrichtung ist die relative Längslage des Lateralschwerpunkts, s_L/L_{oa} , (Bild 6 a). Mit zunehmender Schiffslänge rückt der Lateralschwerpunkt nach achtern. Hier prägt sich aus, daß kleinere Schiffe die Aufbauten meistens vor Hauptspant haben, während sie bei langen Schiffen überwiegend achtern liegen. Die Korrelation ist mit $|KK| = 0.64 > 0.340$ signifikant gegen Null. Zwischen der Höhe des Lateralschwerpunkts über der Wasserlinie, bezogen auf die mittlere Höhe des Lateralplans, und der Schiffslänge scheint dagegen kein signifikanter Zusammenhang zu bestehen (Bild 6 b).

Zumindest ist die Hypothese, daß ein Zusammenhang besteht, für den vorliegenden Datensatz mit $|KK| = 0.31 < 0.340$ abzulehnen. Im Mittel ist $s_H/H_M = 0.62$, die Streuung beträgt 0.06.

Eine wichtige Anmerkung betrifft die Art korrelativer Zusammenhänge. Man unterscheidet hauptsächlich zwischen formaler, Inhomogenitäts-, Gemeinsamkeits- und kausaler Korrelation [32]. Formale Korrelation sagt nichts aus über kausale Zusammenhänge. Ein Beispiel dafür, etwas außerhalb des Themas, ist die Zunahme der Größe von Schiffen und Offshorebauwerken während der letzten drei Dekaden. Inhomogenitätskorrelationen sind meist trivial. Eine solche Korrelation ist der Zusammenhang der Schwerpunktslage hinter Hauptspant und vor dem hinteren Lot, die, bezogen auf die Schiffslänge, sich zu $\frac{1}{2}$ ergänzen. Relative mittlere Höhe des Lateralplans und relative Lage des Lateralschwerpunkts der Länge nach, die für sich signifikant von der Schiffslänge abhängen, bilden untereinander eine Gemeinsamkeitskorrelation. In diesem Fall ist allerdings $KK = 0.11 < 0.340$ und damit nicht signifikant gegen Null. Die Grenze zwischen kausaler und Gemeinsamkeitskorrelation ist manchmal fließend. Die Verlagerung des Lateralschwerpunkts mit zunehmender Schiffslänge nach achtern muß als kausale Korrelation eingestuft werden. Kausale Korrelationen werden durch Ausschluß anderer Korrelationen bestätigt.

5 Längs- und Querwiderstand

Der Druckwiderstand eines Objekts wird wesentlich vom Basisdruck (Beiwert c_{pb}) im Nachlauf bestimmt. Der Beitrag der Frontseite ändert sich wenig, gleichgültig ob das Objekt gedrungen oder länglich ist. So betragen Widerstandsbeiwert und Beiwert des Basisdrucks an der querumströmten unendlich langen, ebenen Platte $c_d = 1.98$ und $c_{pb} = -1.13$ und an der Kreisplatte $c_d = 1.17$ und $c_{pb} = -0.42$ [19]. Der Beitrag der Frontseite ist also mit 0.85 und 0.75 für die beiden Objekte nur wenig verschieden. Mit abnehmendem Verhältnis von Länge zu Querabmessung steigt der Basisdruck steil an und unterscheidet sich schon bei Längen von etwa zehn Querabmessungen nur noch wenig vom Wert am gedrungenen Objekt. Bezüglich des zähen Druckwiderstands ist ein Objekt also sehr schnell endlich lang. Daher ist bei Schiffen zu erwarten, daß deren Beiwert des Querwiderstands, CD_q , nur wenig vom Seitenverhältnis abhängt (Bild 7). Die Regression deutet eine Abnahme der Beiwerte an mit zunehmender Streckung (H_M/L_{oa} fallend), für die man jedoch keine Erklärung suchen sollte. Die Korrelation ist nicht signifikant gegen Null ($KK = 0.28 < 0.340$).

Zum Vergleich sind in Bild 7 die Widerstandsbeiwerte von Platte und Zylinder hinzugefügt worden für vergleichbares Seitenverhältnis der halben Breite zur Länge, wobei allerdings zu beachten ist, daß der Widerstand eines allseits umströmten Objekts über dem für das gleiche Objekt mit Bodenplatte liegt. So beträgt der Widerstandsbeiwert der unendlich langen Platte mit Trennplatte $c_d \simeq 1.6$ gegenüber ~ 2.0 und für den Zylinder mit Trennplatte bei $Re \simeq 10^5$ $c_d \simeq 0.6$ gegenüber 1.2.

Der Beiwert des Längswiderstands streut stärker als CD_q (Bild 8). Das sind Effekte des Schiffstyps, die auch nur durch den Schiffstyp zu erfassen sind. In den Verlauf der Widerstandsbeiwerte von längsangeströmten Zylindern mit stumpfer und abgerundeter Front fügen sie sich in der Tendenz ein. Auch hier muß man aber die nur bedingte Vergleichbarkeit mit dem allseits umströmten Objekt beachten. Unterscheidet man den Längswiderstand

Tabelle 4: Beiwerte von Quer- und Längswiderstand sowie Querkraftparameter und Rollmomentenkoeffizient, Anhaltswerte

Schiffstyp	CD_q	CD_{lAF} $\varepsilon = 0$	CD_{lAF} $\varepsilon = \pi$	δ	κ
Autotransporter	0.95	0.55	0.60	0.80	1.2
Bohrschiff	1.00	0.70÷1.00	0.75÷1.10	0.10	1.7
Containerschiff, beladen	0.90	0.55	0.55	0.40	1.4
Fährschiff	0.90	0.45	0.50	0.80	1.1
Fischkutter	0.95	0.70	0.70	0.40	1.1
Forschungsschiff	0.85	0.55	0.65	0.60	1.4
Frachtschiff, beladen/Container an Deck, Aufbau hinter \otimes	0.85	0.65/0.55	0.55/0.50	0.40	1.7/1.4
Gastanker	0.70	0.60	0.65	0.50	1.1
Offshore-Versorgungsschiff	0.90	0.55	0.80	0.55	1.2
Passagierschiff	0.90	0.40	0.40	0.80	1.2
Schnellboot	0.90	0.55	0.60	0.60	1.1
Tanker, beladen/in Ballast, Aufbau hinten	0.70	0.90/0.75	0.55/0.55	0.40	3.1/2.2
Taucherbasisschiff	0.90	0.60	0.80	0.55	1.7
Tender	0.85	0.55	0.55	0.65	1.1
Zerstörer	0.85	0.60	0.65	0.65	1.1
Mittel (34 Objekte)	0.85	0.62	0.61		
Streuung	0.11	0.12	0.13		

nach vorlicher und achterlicher Anströmung (Bild 9), so tritt ein Effekt der üblichen Bauweise von Schiffen deutlich hervor. Während der Widerstandsbeiwert $CD_{lAF}(\varepsilon = 0)$ bei Anströmung von vorn mit der Streckung zunimmt ($KK = -0.44$), ist $CD_{lAF}(\varepsilon = \pi)$ bei Anströmung von achtern davon unabhängig ($KK = 0.09$). Das hat zwei Ursachen: Schiffe sind von hinten kantiger als von vorn, und bei langen Schiffen liegen die Aufbauten meistens hinter Hauptspant, so daß bei Anströmung von achtern das Deck im Windschatten der Aufbauten liegt.

Unterschiede im Seitenverhältnis sind also unbedeutend für die Beiwerte des Windwiderstands. Die Windlast an Schiffen ist zwar typisch für kleines Seitenverhältnis, aber daraus nicht zu erschließen.

Anhaltswerte für Längs- und Querwiderstand als Beiwerte CD_q und CD_{lAF} gibt Tabelle 4. Sie gelten für übliche Bauweise ohne Maßnahmen zur Widerstandsverminderung und für normale Decksladung. Wo Meßwerte für mehrere Schiffe desselben Typs vorlagen, sind Mittelwerte angegeben. Die Tabelle umfaßt nur Schiffstypen dieser Untersuchung. Für Schiffe nicht enthaltener Typen wähle man ein ähnliches Schiff, z.B. Offshoreversorger für Schlepper. Im Mittel für alle Schiffe haben sich folgende Widerstandsbeiwerte ergeben: quer 0.85, Streuung 0.11; längs, Anströmung von vorn, 0.62, Streuung 0.12; Anströmung von achtern, 0.51, Streuung 0.13.

6 Ein Lastmodell

Die Luftströmung am Schiff hat Gemeinsamkeiten mit der Strömung um Platten kleiner Streckung. Hier wie dort verdrängt ein stark verwirbelter Nachlauf (Totwasser) die Strömung. Im mathematischen Modell der Plattenströmung wird angenommen, daß die Flüssigkeit im Totwasser in Ruhe ist. Grenzfall ist die Umströmung der unendlich langen, ebenen Platte mit offenem Totwasser, bekannt als Helmholtz-Kirchhoff-Platte [18, 25].

Die Druckkraft an der Helmholtz-Kirchhoff-Platte ist in dimensionsloser Form gemäß (1) (siehe z.B. [26])

$$CY_{HKP} = \frac{2\pi \sin \varepsilon}{4 + \pi \sin \varepsilon} \quad (14)$$

Der Beiwert der Querkraft ist dann

$$CC_{HKP} = \frac{\pi \sin 2\varepsilon}{4 + \pi \sin \varepsilon} \quad (15)$$

oder als Funktion des Ablenkwinkels $\Delta\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \varepsilon$ und bezogen auf die Druckkraft bei Querströmung, $CD_{qHKP} = 2\pi/(4 + \pi) = 0.880$,

$$\left(\frac{CC}{CD_q}\right)_{HKP} = \frac{1}{2} \frac{\sin 2\Delta\varepsilon}{\frac{4}{4+\pi} + \frac{\pi}{4+\pi} \cos \Delta\varepsilon} \quad (16)$$

Das Giermoment um Plattenmitte als Beiwert gemäß (4) ist

$$CN_{HKP} = \frac{\frac{3}{4}\pi \sin 2\varepsilon}{(4 + \pi \sin \varepsilon)^2} \quad (17)$$

so daß der Giermomentenhebel (6)

$$\left(\frac{x_F}{B}\right)_{HKP} = \frac{3}{16} \frac{\cos \varepsilon}{1 + \frac{\pi}{4} \sin \varepsilon} \quad (18)$$

mit B Breite der Platte.

Bild 10 zeigt Querkraft (a) und Hebel des Giermoments (b) an der Helmholtz-Kirchhoff-Platte und Meßwerte an Platten auf einer Bodenplatte sowie deren Rollmomentenhebel. Dieselbe Auftragung ist in Bild 11 und Bild 12 für das Containerschiff, das Fährschiff und das Offshore-Versorgungsschiff aus Bild 2 gewählt worden. In ihrer Wirkung sind die Strömungen an Platte und Schiff ähnlich. Zwar ist die mathematische Helmholtz-Kirchhoff-Strömung nicht Lösung für die Windkräfte am Schiff, schon wegen der fehlenden Längskraft kann sie es nicht sein. Aber sie weist den Weg zu Lastfunktionen für diese Kräfte.

7 Analyse der Windkräfte

Bei Schräganströmung ist die resultierende Luftkraft gegenüber dem (scheinbaren) Wind um den Winkel $\Delta\varepsilon$ hin zur Schiffsquerrichtung abgelenkt. Dies ist kennzeichnend für alle länglichen Objekte [7]. Bild 13 (oben) zeigt den Verlauf des Ablenkwinkels über dem Anströmwinkel für das Containerschiff, das Fährschiff und das Offshore-Versorgungsschiff.

Zum besseren Vergleich sind die Quadranten vorlicher und achterlicher Anströmung einander überlagert.

Bei Seiten- und Längssymmetrie ist in Längs- und Querströmung $\Delta\varepsilon = 0$. Im Zwischenbereich läßt sich die Ablenkung durch einen Parameter erfassen, der folgend als Ablenkparameter bezeichnet wird. Setzt man den Tangens des Anströmwinkels zum Tangens des Winkels der resultierenden Strömungskraft ins Verhältnis,

$$\frac{\tan \varepsilon}{\tan(\varepsilon + \Delta\varepsilon)} = 1 - a \quad (19)$$

so ist also dieser Ablenkparameter

$$a = 1 - \frac{\tan \varepsilon}{\tan(\varepsilon + \Delta\varepsilon)} \quad (20)$$

Es ist $a = 0$, wenn keine Ablenkung vorliegt (reiner Widerstand, z.B. an einem Kreiszyylinder bei Anströmung in dessen Querschnittsebene), und $a = 1$ für vollständige Ablenkung, wenn die Strömungskraft für alle Anströmwinkel quer zum Objekt steht (reine Seitenkraft, z.B. an einer ebenen Platte bei Vernachlässigung von Reibung). Bild 13 (unten) zeigt die Auswertung von (20) für das Containerschiff, das Fährschiff und den Offshoreversorger.

Aus (19) folgt

$$\Delta\varepsilon = \arctan\left(\frac{\tan \varepsilon}{1 - a}\right) - \varepsilon \quad (21)$$

Bild 14 zeigt die Kurvenschar $\Delta\varepsilon(\varepsilon)$ für $a = \text{const}$ in den Grenzen $0 \geq a \geq 1$.

Der Ablenkparameter läßt sich an der ebenen Platte, auf die ein Flüssigkeitsstrahl gerichtet ist, als Impulsverlustgröße deuten. Der Strahl mit dem Massenstrom Q habe die Geschwindigkeit u und treffe unter dem Winkel ε auf. Für den Strahldruck an der Platte erhält man aus dem Impulssatz das bekannte Ergebnis

$$Y = Q * u * \sin \varepsilon \quad (22)$$

Aus dem Kräftegleichgewicht parallel zur Platte folgt

$$Q_1 - Q_2 = Q * \cos \varepsilon \quad (23)$$

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

$$Q_1 + Q_2 = Q \quad (24)$$

wird

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{1 - \cos \varepsilon}{2}, \quad \frac{Q_2}{Q} = \frac{1 + \cos \varepsilon}{2} \quad (25)$$

Die Strömung erfahre nun einen Impulsverlust entlang der Platte und fließe mit $u' < u$ parallel zur Platte ab, wobei die Aufteilung der Massenströme, Gleichung (25), erhalten bleibe. Die auf die Platte wirkende Kraft ist dann zur Platte geneigt um den Winkel $\varepsilon' = \varepsilon + \Delta\varepsilon$. Man erhält

$$\tan \varepsilon' = \frac{Q * u * \sin \varepsilon}{Q * u * \cos \varepsilon - (Q_2 - Q_1)u'} \quad (26)$$

so daß mit (25)

$$\Delta\varepsilon = \arctan\left(\frac{\tan\varepsilon}{1 - u'/u}\right) - \varepsilon \quad (27)$$

Das aber ist, mit $u'/u = a$, Gleichung (21).

Der Ablenkparameter ändert sich mehr oder weniger mit dem Abströmwinkel. Für das Containerschiff ist er konstant (Bild 13). Es liegt nahe, jeweils im Quadranten des Wind-einfalls einen Parameter $a = const$ mit bester Anpassung an den gemessenen Verlauf der Ablenkung, kurz: gemittelten Ablenkparameter \bar{a} , aus der Bedingung

$$\int_{\text{Quadrant}} (\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon(\bar{a} = const))^2 d\varepsilon = \min \quad (28)$$

anzunehmen. Zwischen diesem Wert und dem Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand bzw. CD_l/CD_q besteht ein enger Zusammenhang (Bild 15). Für verschwindenden Längswiderstand wird $\bar{a} = 1$. Berücksichtigt man das bei der Regression, so lautet die Ausgleichsgerade

$$\bar{a} = 1 - 1.19 \frac{CD_l}{CD_q} \quad (29)$$

Aber auch wenn dieser Grenzwert nicht erzwungen wird, verfehlt die Regressionsgerade ihn nur wenig ($\bar{a} = 0.98$). Der Korrelationskoeffizient ist dann -0.79.

Mit dem Ansatz

$$CX = -CD_l \frac{\cos\varepsilon}{f(\varepsilon)}, \quad CY = CD_q \frac{\sin\varepsilon}{f(\varepsilon)} \quad (30)$$

wobei $f(\varepsilon)$ eine noch näher zu bestimmende Funktion des Anströmwinkels ist, erhält man aus (19)

$$\bar{a} = 1 - \frac{CD_l}{CD_q} \quad (31)$$

Erweitert man (31) zu

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

so fragt sich, wovon der Parameter α , folgend Deflektionskoeffizient genannt, abhängt. Das Widerstandsverhältnis hat darauf keinen Einfluß; $|KK| = 0.18 < 0.239$ ist nicht signifikant gegen Null (Bild 16). Im Mittel ist $\alpha = 1.21$, die Streuung beträgt 0.40. In der Regel sind die α -Werte verschieden für vorliche und achterliche Anströmung. Das Verhältnis von höherem zu niedrigerem Wert ist im Mittel 1.24 (Bild 17). Der niedrigere der beiden Werte ist im Mittel $\bar{\alpha}_1 = 1.06$ (Streuung 0.29) und der höhere $\bar{\alpha}_2 = 1.37$ (Streuung 0.43). Meistens tritt der höhere Wert bei achterlicher Anströmung auf. Ausnahmen waren ein Bohrschiff, herkömmliche Stückgutfrachter und ein Tanker älterer Bauart. Man kann vermuten, daß das mit dem abgerundeten Heck dieser Schiffe zu tun hat. Heute sind die Heckformen kantig.

Der Deflektionskoeffizient ist ein Kennwert für das Längskraftmaximum. Die größte Längskraft, Beiwert $|CX|_{max}$, tritt meist unter Schräganströmung auf, und zwar gehäuft zwischen 10 und 30 Grad mit der Längsrichtung (Bild 18). Mit zunehmendem Winkel des Maximums nimmt $|CX|_{max}/CD_l$ im Mittel zu ($KK = 0.54 > 0.201$). Das Mittel der bezogenen Längskraftmaxima ist 1.22 (Streuung 0.21). Der Beladungszustand hat einen starken Einfluß auf

das Maximum. So wurde an einem Containerschiff mit Staurahmen (**CON0202BN**), die im Falle des Schiffs ohne Container an Deck wie ein Schaufelgitter wirken, ein Verhältnis $|CX|_{max}/CD_l$ von 1.25 bei vorlichem Wind und 1.72 bei achterlichem Wind gemessen. Die entsprechenden Werte für ein ähnliches Schiff ohne Staurahmen betragen 1.08 und 1.21. Ein besonders hoher Längskraftbeiwert von 2.15 CD_l ist an einem Cargo/Containerschiff für achterlichen Wind gemessen worden (**CON0301BN**).

Nach Bild 19 ist

$$\alpha \simeq 1.7 \frac{|CX|_{max}}{CD_l} - 0.8 \quad (33)$$

Der Korrelationskoeffizient ist 0.89; die Streuung um die Regressionsgerade beträgt 0.18. Ferner sind α und der Anströmwinkel des Maximums, wenn auch mit $KK = 0.55$ schwach, korreliert (Bild 20).

Ein besonderer Wert der Windlast ist das Querkraftmaximum. Es liegt im Mittel bei Anströmwinden von 45.0 Grad mit der Längsrichtung; die Streuung beträgt 3.4 Grad (Bild 21). Man erkennt eine schwache Verschiebung zu kleineren Winkeln mit zunehmendem $|CC|_{max}/CD_q$ ($|KK| = 0.42 > 0.239$). Zum Vergleich: an der Helmholtz-Kirchhoff-Platte sind es 39.3 Grad bei $|CC|_{max}/CD_q = 0.584$. Mit (2) und (30) wird

$$CC = CD_q * \frac{1}{2} \left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right) \frac{\sin 2\varepsilon}{f(\varepsilon)} \quad (34)$$

oder mit (31), wobei $a = \bar{a}$, und bezogen auf den Querwiderstand,

$$\frac{CC}{CD_q} = \frac{\bar{a} \sin 2\varepsilon}{2 f(\varepsilon)} \quad (35)$$

Einen unteren Wert erhält man für das Querkraftmaximum, wenn Längs- und Seitenkraft dem Cosinus bzw. Sinus des Anströmwinkels folgen, d.h. $f(\varepsilon) = 1$. Das trifft z.B. für **TAN0202BN**, den Tanker in Ballast, in etwa zu. Man erhält

$$\frac{|CC|_{max}}{CD_q} \geq \frac{\bar{a}}{2} \quad (36)$$

Einen oberen Wert gewinnt man durch folgende Betrachtung (siehe dazu den Verlauf der Seitenkraft am Fährschiff **FER0201BN**). Beiwerte der Seitenkraft, $CY \simeq CD_q / \sin \varepsilon$, bei Anströmung um die Querrichtung werden erreicht und nur selten überschritten. Dabei tritt im Quadranten des Windeinfalls stets ein Wechsel in der Richtung der Längskraft auf, so daß $\varepsilon + \Delta\varepsilon > \pi/2$. Vernachlässigt man den Schub des Windes in diesem Bereich und nimmt statt dessen vollständige Ablenkung $\varepsilon + \Delta\varepsilon = \pi/2$ an, so wird

$$\frac{CC}{CD_q} \simeq \frac{CY}{CD_q} \cos \varepsilon \simeq \frac{1}{\tan \varepsilon} = \tan \Delta\varepsilon \quad (37)$$

Aus (21) erhält man mit $\varepsilon = \varepsilon_{|CC|_{max}} = \pi/4$

$$\Delta\varepsilon_{max} = \arctan \frac{\bar{a}}{2 - \bar{a}} \quad (38)$$

so daß

$$\frac{|CC|_{max}}{CD_q} \leq \frac{\bar{a}}{2 - \bar{a}} \quad (39)$$

Die Gleichungen (36) und (39) kann man verallgemeinern zu

$$\frac{|CC|_{max}}{CD_q} = \frac{\bar{a}}{2 - \delta * \bar{a}} \quad (40)$$

mit dem Querkraftparameter δ meist zwischen 0 und 1. Tabelle 4 gibt Anhaltswerte.

Damit sind die Windkräfte am Schiff auf Längs- und Querwiderstand bzw. CD_{LAF} und CD_q und den Parameter des Querkraftmaximums, δ , zurückgeführt.

Bild 22 bestätigt die Lage des bezogenen Querkraftmaximums innerhalb der Grenzen von (36) und (39). Als Abszisse ist $\bar{a}/(2 - \delta * \bar{a})$ mit einem mittleren Querkraftparameter $\delta = 0.5$ gewählt worden. Wie man aus Bild 23 erkennt, nimmt der Querkraftparameter in der Tendenz ab mit zunehmendem Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand, doch hauptsächlich hängt er vom Schiffstyp ab. Deshalb auch sind in diesem Bild die Aufpunkte nach Schiffstypen unterschieden. Im Mittel ist $\delta = 0.48$, Streuung 0.25. Man findet keine hohen Werte bei größerem Verhältnis CD_l/CD_q , aber durchaus kleine Werte δ bei kleinen Verhältniswerten. Dies hat mit dem Schiffstyp zu tun. So ist $\delta \simeq 0.8$ an Schiffen mit hoher, geschlossener Lateralfäche wie Autotransportern und Fährschiffen, jedoch nur etwa 0.4 an Containerschiffen mit voller Ladung bei gleichem CD_l/CD_q und wohl gleicher, aber unterbrochener Lateralfäche durch die Gänge zwischen den Containerstapeln. Man kann δ annähern durch

$$\delta \simeq k_\delta (1.0 - \frac{CD_l}{CD_q})^2 \quad (41)$$

Im Mittel ist $k_\delta \simeq 0.75$.

8 Analyse der Windmomente

Die Windmomente reagieren im allgemeinen stärker auf Besonderheiten der Schiffsaufbauten als die Windkräfte. Zusammenhänge sind daher weniger scharf korreliert. Ein ausgeprägter Zusammenhang besteht jedoch zwischen dem Hebel des Giermoments bei Seitenwind und der Lage des Lateralschwerpunkts der Länge nach, s_L . Nach Bild 24 geht die Momentenachse praktisch durch den Lateralschwerpunkt. Der Korrelationskoeffizient ist 0.90, die Streuung um die Regressionsgerade beträgt 0.023.

Das Giermoment um die Momentenachse bei Querströmung ist

$$\Delta N = N - Y * x_{Fq} \quad (42)$$

oder dimensionslos

$$\Delta CN = CN - CY * \frac{x_{Fq}}{L_{oa}} \quad (43)$$

mit x_{Fq} Momentenhebel bei Querströmung. Entsprechend (6) lautet der Hebel des Giermoments

$$\frac{\Delta x_F}{L_{oa}} = \frac{N}{Y * L_{oa}} - \frac{x_{Fq}}{L_{oa}} = \frac{CN}{CY} - \frac{x_{Fq}}{L_{oa}} \quad (44)$$

Der Verlauf dieses Hebels ist bereits in Bild 12 gezeigt worden.

Zwei Eigenschaften von Δx_F fallen auf: Die Änderung des Hebels $(dx_F/d\varepsilon)_q = (dx_F/d\varepsilon)_{\varepsilon=\pi/2}$ bei quereinfallendem Wind ist für alle Schiffe praktisch gleich. Im Mittel ist

$$\frac{1}{L_{oa}} \left(\frac{dx_F}{d\varepsilon} \right)_q = -0.18 \quad (45)$$

Aus dem Kollektiv fiel nur ein Schiff, und zwar ein Bohrschiff mit einem Wert von ~ -0.10 deutlich heraus. Aus (18) erhält man für die Helmholtz-Kirchhoff-Platte -0.105. Dieser Wert scheint auch für reale Platten zu gelten (Bild 10 b).

Die zweite, weniger ausgeprägte Eigenschaft betrifft den Verlauf des Hebels über dem Anströmwinkel. Im allgemeinen ist Δx_F bei vorlichem Wind größer als bei achterlichem Wind immer dann, wenn der Schwerpunkt der Lateralfäche vor Hauptspant liegt, und umgekehrt. Dies kann man in Verallgemeinerung von (18) durch einen Koeffizienten γ , folgend Giermomentenparameter, erfassen:

$$\Delta x_F = \Delta x_{Fl} \frac{\cos \varepsilon}{1 + \gamma * \sin \varepsilon} \quad (46)$$

Es ist $\Delta x_{Fl} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0, \pi} \Delta x_F$ der Hebel bei Längsströmung. Dieser Grenzhebel läßt sich nicht messen, aber durch Extrapolation gewinnen. Für $\gamma = 0.618$ (aus $(\Delta x_F/d\varepsilon)_{\varepsilon=0} = (\Delta x_F/d\varepsilon)_{\varepsilon=\pi/2}$) ändert sich Δx_F praktisch linear. Wenn $\gamma > 0.618$, wächst der Hebel überproportional, und umgekehrt. Für die Helmholtz-Kirchhoff-Platte ist $\gamma = \pi/4 = 0.785$. Giermomentenparameter und Grenzhebel sind durch

$$\gamma = \left| \frac{\Delta x_{Fl}}{(dx_F/d\varepsilon)_q} \right| - 1 \quad (47)$$

miteinander verknüpft, so daß

$$\Delta x_F = \left| \left(\frac{dx_F}{d\varepsilon} \right)_q \right| (1 + \gamma) \frac{\cos \varepsilon}{1 + \gamma * \sin \varepsilon} \quad (48)$$

Bild 25 zeigt den Giermomentenparameter für vorlichen (a) und achterlichen Wind (b) über der Lage des Lateralschwerpunkts gegenüber Hauptspant. Die Werte streuen stark. Bei vorlicher Anströmung ändert sich der Hebel meistens unterproportional mit dem Anströmwinkel ($\gamma < 0.618$). Giermomentenparameter und Schwerpunktslage sind schwach positiv korreliert ($KK = 0.38 > 0.340$). Bei achterlicher Anströmung ist die Korrelation negativ ($||KK| = 0.56 > 0.340$). Hier ändert sich der Hebel mit dem Anströmwinkel überproportional bei Schwerpunktslage hinter Hauptspant ($\gamma > 0.618$) und unterproportional bei Schwerpunktslage vor Hauptspant. Während sich bei vorlichem Wind nur etwa 18 % der Schwankungen von γ auf die Schwerpunktslage zurückführen lassen, sind es bei achterlichem Wind 55 %. Mit (47) gilt

$$|\Delta x_{Fl}| = 0.18 L_{oa} (1 + \gamma) \quad (49)$$

Der Rollmomentenhebel z_F ändert sich bei den meisten Schiffen wenig mit dem Anströmwinkel. Signifikante Unterschiede im Verlauf, die eine andere Annahme als Unabhängigkeit erforderten, gibt es nicht. Bild 12 zeigt den Giermomentenhebel in Beispielen.

Ein Kennwert für das Rollmoment ist der Hebel bei Wind um die Querrichtung, z_{Fq} , bezogen auf die Höhe des Lateralschwerpunkts über der Schwimmwasserlinie, folgend Rollmomentenfaktor genannt:

$$\kappa = \frac{z_{Fq}}{s_H} \quad (50)$$

Dieser Wert ist in Bild 26 aufgetragen. Er hängt wesentlich vom Schiffstyp ab; deshalb sind die Aufpunkte durch den Schiffstyp kenntlich gemacht. An Platten auf einer Bodenplatte ist κ etwas kleiner als 1 (Bild 10). Werte $\kappa \simeq 1$ beobachtet man nicht nur an schlanken Schiffen, aber $\kappa > 1$ wird nur bei breiteren Schiffen angetroffen. Vertikale Kraftanteile haben einen starken Einfluß auf das Rollmoment. Bestätigt wird das durch Messungen an einem Quader ($B/L = 0.15$) mit und ohne Schanzkleid. Die Meßwerte sind in Bild 26 eingefügt. Im Mittel nimmt κ zu mit dem Verhältnis von Schiffsbreite zu mittlerer Schiffshöhe, B/H_M . Anhaltswerte enthält Tabelle 4.

9 Zeichnerische Analyse

Die Windlastparameter sind in dieser Untersuchung durch rechnerische Regression ermittelt worden. Man kann sie auch zeichnerisch gewinnen, meistens in guter Annäherung, aus einer besonderen Auftragung (kennzeichnende Auftragung) der Windlast, die in Teilen bereits verwendet worden ist. Bild 27 zeigt diese Auftragung für das Containerschiff **CON0101BN**: auf den Querwiderstand bezogene Querkraft über dem Ablenkwinkel (a), Ablenkwinkel über dem Anströmwinkel (b), Hebel des Giermoments und des Rollmoments über dem Anströmwinkel (c) und Ablenkparameter über dem Anströmwinkel (d).

Die Auswertung ist wie folgt. Die Gleichung des maximalen Ablenkwinkels für $a = const$ ist (siehe Bild 14)

$$\Delta\varepsilon_{max} = \frac{\pi}{2} - 2\varepsilon \quad (51)$$

so daß mit (21) und $a = \bar{a}$

$$\bar{a} \simeq \frac{2 \sin \Delta\varepsilon_{max}}{1 + \sin \Delta\varepsilon_{max}} \quad (52)$$

Aus (32) erhält man den Deflektionskoeffizienten

$$\alpha = \frac{1 - \bar{a}}{CD_l/CD_q} \quad (53)$$

und aus (40) den Querkraftparameter

$$\delta = \frac{2}{\bar{a}} - \frac{1}{|CC|_{max}/CD_q} \quad (54)$$

oder mit (52)

$$\alpha \simeq \frac{1}{CD_l/CD_q} \frac{1 - \sin \Delta\varepsilon_{max}}{1 + \sin \Delta\varepsilon_{max}}, \quad \delta \simeq \frac{1 + \sin \Delta\varepsilon_{max}}{\sin \Delta\varepsilon_{max}} - \frac{1}{|CC|_{max}/CD_q} \quad (55)$$

Der maximale Ablenkwinkel $\Delta\varepsilon_{max}$ ist senkrechte Tangente und das bezogene Querkraftmaximum $|CC|_{max}/CD_q$ horizontale Tangente an die Querkraftschleife in Bild 27a.

Tabelle 5: Windlastparameter für das Containerschiff CON0101BN bei Wind von Backbord aus der zeichnerischen Analyse

	vorlicher Wind	achterlicher Wind
CD_q		0.87
CD_{lAF}	0.48	0.39
\bar{a}	0.86	0.83
α	1.19	1.80
δ	0.33	0.24
γ	0.56	0.28
κ		1.24

Der Giermomentenparameter γ wird durch Ausgleich des Giermoments ermittelt. Zeichnerisch kann man ihn annähern über den bezogenen Grenzhebel, x_{Fl}/L_{oa} , in Bild 27c; γ folgt dann aus (47).

Der Rollmomentenfaktor κ wird insgesamt für vorlichen und achterlichen Wind gebildet (Bild 27c) und, wenn nötig, nach Backbord- und Steuerbordanströmung unterschieden, z.B. am Schiff mit Schlagseite.

Beispiel: Für das Containerschiff CON0101BN (Länge $L_{oa} = 210.75$ m, Breite $B = 30.50$ m, Lateralfäche $A_L = 3751.1$ m², Frontschattenfläche $A_F = 802.0$ m², Lage des Lateralschwerpunkts: $s_L = -3.87$ m (hinter Hauptspant), $s_H = 10.08$ m über der Schwimmwasserlinie) erhält man aus Bild 27 die Parameterwerte in Tabelle 5.

10 Windlastfunktionen

Für $f(\varepsilon)$ in (30) wird angesetzt

$$f(\varepsilon) = 1 + B' * \sin^m \varepsilon * \cos^n \varepsilon \quad (56)$$

Nach Bild 21 liegt das Maximum der Querkraft im Mittel bei 45 Grad. Die Funktion $f(\varepsilon)$ kann also als symmetrisch um $\pi/4$ angenommen werden, so daß $m = n$. Eine Optimierung der Exponenten hat $m = n \simeq 2$ ergeben [6]. Man erhält

$$f(\varepsilon) = 1 + B * \sin^2 2\varepsilon \quad (57)$$

Somit wird das Maximum der Querkraft, Gleichung (35),

$$\frac{|CC|_{max}}{CD_q} = \frac{\bar{a}}{2} \frac{1}{1+B} \quad (58)$$

Dies ergibt zusammen mit (40)

$$B = -\frac{1}{2} \delta * \bar{a} \quad (59)$$

Für \bar{a} ist die Basislösung Gleichung (31) zu nehmen, so daß in (30)

$$f(\varepsilon) = 1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right) \sin^2 2\varepsilon \quad (60)$$

zu setzen ist. Längs- und Querkraft sind voneinander abhängig.

Damit erhält man für Windlängskraft und Windseitenkraft die dreiparametrischen Lastfunktionen (Parameter $CD_l = CD_{lAF} * A_F/A_L$, CD_q und δ)

$$CX = -CD_l \frac{\cos \varepsilon}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right) \sin^2 2\varepsilon}, \quad CY = CD_q \frac{\sin \varepsilon}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right) \sin^2 2\varepsilon} \quad (61)$$

oder mit (41)

$$CX = -CD_l \frac{\cos \varepsilon}{1 - \frac{1}{2} k_\delta \left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right)^3 \sin^2 2\varepsilon}, \quad CY = CD_q \frac{\sin \varepsilon}{1 - \frac{1}{2} k_\delta \left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right)^3 \sin^2 2\varepsilon} \quad (62)$$

Werte für CD_{lAF} , CD_q und δ enthält Tabelle 4, k_δ gewinnt man aus Bild 23.

Im oberen Bereich der δ -Werte ist $k_\delta \simeq 1.0$ und im Mittel 0.75. Wenn man δ nicht beziffern kann oder will, verwende man in (64) für k_δ einen geeigneten festen Wert. Die dann zweiparametrischen Lastfunktionen der Windkraft dürften vielfach reichen. Sie sind in Bild 28 für $k_\delta = 1.0$ aufgetragen zusammen mit den folgend formulierten Lastfunktionen der Windmomente, Gleichung (67).

Ein allgemeiner Ansatz für den Giermomentenhebel ist mit (48) und $x_{Fq} = s_L$

$$x_F = s_L + \left| \left(\frac{dx_F}{d\varepsilon} \right)_q \right| (1 + \gamma) \frac{\cos \varepsilon}{1 + \gamma * \sin \varepsilon} \quad (63)$$

Für $\gamma = 0.618$ ändert sich der Hebel praktisch linear. Dafür kann man einfacher schreiben

$$x_F = s_L + \left(\frac{dx_F}{d\varepsilon} \right)_q \left(\varepsilon - \frac{\pi}{2} \right) \quad (64)$$

so daß mit (45)

$$x_F = s_L - 0.18 L_{oa} \left(\varepsilon - \frac{\pi}{2} \right) \quad (65)$$

Linearer Verlauf des Giermomentenhebels kann in guter Annäherung für alle Schiffe angenommen werden. In diesem Fall ist für das Giermoment kein weiterer Parameter nötig.

Der Rollmomentenhebel ist unabhängig von ε oder wird als unabhängig angenommen:

$$z_F = \kappa * s_H \quad (66)$$

Mit (6) und (7) lauten die Lastfunktionen von Windgiermoment und Windrollmoment

$$CN = CY \left(\frac{s_L}{L_{oa}} - 0.18 \left(\varepsilon - \frac{\pi}{2} \right) \right), \quad CK = CY * \kappa * \frac{s_H}{H_M} \quad (67)$$

mit CY aus (61) oder (62).

Zur Berechnung der Windlast an einem Schiff sind also vier Parameter zu schätzen, die Widerstandsbeiwerte CD_q und CD_{lAF} sowie δ für das Querkraftmaximum und κ für das Rollmoment bei quereinfallendem Wind. Anhaltswerte gibt Tabelle 4; δ kann auch aus Bild 23 und κ aus Bild 26 entnommen werden.

Beispiel: Schätzen der Windlast an einem Forschungsschiff und Vergleich mit Meßwerten (RES0201BN) [9]. Die Daten des Schiffs sind: Länge $L_{oa} = 55.00$ m, Breite $B =$

12.5 m, Lateralfäche $A_L = 434.8 \text{ m}^2$, Frontschattenfläche $A_F = 160.7 \text{ m}^2$, Lage des Lateralschwerpunkts $s_L=1.48 \text{ m}$ vor Hauptspant, $s_H=5.10 \text{ m}$ über der Schwimmwasserlinie (siehe Generalplan in Bild 29). Durch das seitlich vorgezogene Arbeitsdeck auf Steuerbord sind die Aufbauten des Schiffs unsymmetrisch. Daher sind die Windlastbeiwerte etwas unterschiedlich für Anströmung von Backbord und Steuerbord. Die Parameterwerte für die Rechnung sind Tabelle 4 entnommen:

	vorlicher Wind	achterlicher Wind
CD_q		0.85
CD_{lAF}	0.55	0.65
δ	0.60	0.60
κ		1.40

In der kennzeichnenden Auftragung Bild 29 werden die Merkmale des Lastansatzes sichtbar: Konstanter Ablenkparameter $\bar{a} = 1 - CD_l/CD_q$, linearer Verlauf des Giermomentenhebels und konstanter Rollmomentenhebel. Bild 30 zeigt die Windlast am Schiff im Vergleich mit den Meßwerten. Die Lastfunktion der Längskraft ist auf die Frontschattenfläche bezogen. Dadurch erscheinen Differenzen um A_L/A_F , und damit um das 2.7-fache überhöht gegenüber denen der Seitenkraft.

Die Windkräfte und Windmomente am Schiff erhält man aus

$$X = CX * \frac{\rho}{2} u^2 * A_L, \quad Y = CY * \frac{\rho}{2} u^2 * A_L \quad (68)$$

$$N = CN * \frac{\rho}{2} u^2 * A_L * L_{oa}, \quad K = CK * \frac{\rho}{2} u^2 * A_L * H_M \quad (69)$$

mit der Geschwindigkeit des scheinbaren Windes

$$u = \sqrt{u_W^2 + v_S^2 + 2u_W * v_S * \cos \beta} \quad (70)$$

wobei u_W die wahre Windgeschwindigkeit und v_S die Schiffsgeschwindigkeit ist; β ist der Winkel des wahren Windes mit der Schiffslängsachse.

11 Verfeinerung

Schiffe lassen sich drei Grundformen zuordnen: vielgestaltig/längssymmetrisch, vielgestaltig/längsunsymmetrisch und quaderförmig kompakt. Das Containerschiff **CON0101BN**, der Offshoreversorger **SUP0101BN** und das Fährschiff **FER0201BN**, die zuvor als Demonstrationsbeispiele dienten, sind dafür typische Vertreter.

Die Längskraft ist aerodynamisches Abbild der Schiffsform (Bild 2). Verfeinerungen der Lastfunktionen betreffen im wesentlichen diese Komponente. Deshalb sollte man Feinheiten nur dann anbringen, wenn es auf die Windlängskraft besonders ankommt.

- **Form 1:** vielgestaltig/längssymmetrisch.
Die Längskraft wechselt die Richtung bei quereinfallendem Wind ($CX_{AF}(\varepsilon = 0) = 0$).

Dies findet man an allen vielgestaltigen, wesentlich längssymmetrischen Schiffen. Kriterium dafür ist Lage des Lateralschwerpunkts um Hauptspant ($s_L \simeq 0$). Der Ablenkparameter ist praktisch konstant (Bild 13 unten). Dieser Fall liegt den Lastfunktionen (61) zu Grunde.

- **Form 2:** vielgestaltig/längsunsymmetrisch.
Die Längskraft wechselt die Richtung im Quadranten des Windeinfalls, so daß $CX_{AF}(\varepsilon = 0) \neq 0$. Dies ist der Fall bei allen vielgestaltigen, wesentlich längsunsymmetrischen Schiffen ($s_L \neq 0$). Trotz starker Streuung ist ein Zusammenhang zwischen dem Winkel des Windeinfalls, bei dem der Wechsel erfolgt, und dem Abstand des Lateralschwerpunkts von Hauptspant erkennbar (Bild 31). Die Korrelation ist signifikant gegen Null ($|KK| = 0.58 > 0.374$ bei 28 Aufpunkten im zweiseitigen Test und 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit). Liegt der Lateralschwerpunkt vor Hauptspant, so erfolgt der Wechsel im Mittel bei vorlichem Wind, und umgekehrt. Die Streuung um die Regressionsgerade beträgt 9.1 Grad. Eine Windlängskraft entgegen der Längsströmung bedeutet $a > 1$. Eine Längskraft bei Queranströmung läßt den Ablenkparameter über alle Grenzen anwachsen (Bild 13 unten).
- **Form 3:** quaderförmig kompakt.
Die Längskraft wechselt innerhalb des Quadranten des Windeinfalls die Richtung, aber es ist $CX_{AF}(\varepsilon = 0) = 0$. Der Wechsel erfolgt bei etwa 30 Grad um die Querachse. Es entsteht also bereits Schub bei vorlichem Wind und noch Widerstand bei achterlichem Wind. Dies ist typisch für Schiffe mit quaderförmigem Aufbau. Der Ablenkparameter überschreitet den Wert Eins und nähert sich für quereinfliegenden Wind einem Grenzwert (Bild 13 unten). Dieser Wert muß für vorlichen und achterlichen Wind nicht gleich sein.

Es gibt Übergänge zwischen diesen Formen. Im allgemeinen ist die Abgrenzung bei den neueren Schiffen schärfer als bei Schiffen älterer Bauart. Ein typisches Beispiel sind die heutigen Fährschiffe mit ihren extrem quaderförmigen Aufbauten. Aber schon bei den Fährschiffen älterer Bauart findet man kaum einen Unterschied zum Kraftverlauf am Quader, wie Vergleichsmessungen zeigen (Bild 32). Ähnlich verhält es sich bei einem ausgesprochen vielgestaltigen längssymmetrischen Schiff im Vergleich mit einem Prisma (Bild 33). Dies ist zugleich ein Hinweis, welchen Einfluß Einzelheiten des Schiffs auf den Verlauf der Windlast haben oder besser: wie wenig wichtig Feinheiten des Objekts im Modellmaßstab sein können.

Eine erste Verfeinerung betrifft das ausgeprägte Maximum der Längskraft bei Schräganströmung. Die Lastfunktion für CX , Gleichung (61), zeigt kein oder allenfalls ein schwaches Extremum. Eine bessere Anpassung läßt sich durch

$$CX' = CX/f(\varepsilon) \quad (71)$$

mit

$$f(\varepsilon) = 1 + C * \sin \varepsilon * \cos^n \varepsilon \quad (72)$$

erreichen, wobei der Extremwert der Funktion $f(\varepsilon)$ so gewählt wird, daß sich für gegebene Schräganströmung das bekannte oder geschätzte $|CX|_{max}$ ergibt. Die Schwierigkeit liegt in der Vorhersage dieses Wertes oder des dafür kennzeichnenden Parameters α , sofern man nicht Mittelwerte verwendet. Der Ablenkparameter bleibt praktisch unverändert.

Das Extremum von $f(\varepsilon)$ liegt bei

$$\varepsilon = \arccos \sqrt{\frac{n}{n+1}} \quad (73)$$

Dies eingesetzt in (71) ergibt

$$\frac{|CX|_{max}}{CD_l} \simeq \frac{1}{1 + C \sqrt{\left(1 - \frac{n}{n+1}\right) \left(\frac{n}{n+1}\right)^n}} \quad (74)$$

so daß

$$C = -\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{n}{n+1}\right) \left(\frac{n}{n+1}\right)^n}} \left(1 - \frac{1}{|CX|_{max}/CD_l}\right) \quad (75)$$

Für $n = 3, 4, 5$ erhält man aus (73) $\varepsilon_{CXmax} = 30.0, 26.6$ und 24.1 Grad. Ausgeprägte Maxima der Längskraft treten nach Bild 18 gehäuft zwischen etwa 20 und 30 Grad auf. Gute Ergebnisse wurden mit $n = 3$ erzielt. Dafür lautet (71)

$$CX' = \frac{CX}{1 - 3.1 \left(1 - \frac{1}{|CX|_{max}/CD_l}\right) \sin \varepsilon * \cos^3 \varepsilon} \quad (76)$$

$|CX|_{max}/CD_l$ kann nach (33) durch den Deflektionskoeffizienten α ersetzt werden:

$$\frac{|CX|_{max}}{CD_l} \simeq 0.6(\alpha + 0.8) \quad (77)$$

Beispiel: Für das Containerschiff **CON0101BN** (Länge $L_{oa} = 210.75$ m, Breite $B = 30.50$ m, Lateralfäche $A_L = 3751.1$ m², Frontschattenfläche $A_F = 802.0$ m², Lage des Lateralschwerpunkts: $s_L = -3.87$ m (hinter Hauptspant), $s_H = 10.08$ m über der Schwimmwasserlinie) werden die Parameterwerte aus Tabelle 5 übernommen. Bild 34 zeigt das Ergebnis der Rechnung.

Für die Formen **2** und **3** kann man die Windlastfunktionen wie folgt verfeinern. Die resultierende horizontale Windkraft aus (61), Beiwert

$$CT = \frac{\sqrt{CD_l^2 * \cos^2 \varepsilon + CD_q^2 * \sin^2 \varepsilon}}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_l}{CD_q}\right) \sin^2 2\varepsilon} \quad (78)$$

wird beibehalten und wieder in Komponenten zerlegt:

$$CX = -CT * \cos(\varepsilon + \Delta\varepsilon), \quad CY = CT * \sin(\varepsilon + \Delta\varepsilon) \quad (79)$$

mit $\Delta\varepsilon$ aus (21) und $a = a(\varepsilon)$. Für den gemittelten Ablenkparameter wird (31) angenommen.

Form 2: Für den Ablenkparameter wird angesetzt

$$a = A + \frac{B}{\cos \varepsilon} \quad (80)$$

mit positivem Koeffizienten B bei Richtungswechsel der Längskraft im Quadranten und negativem $B = B'$ im Quadranten ohne Richtungswechsel. Aus $a = 1$ für Vorzeichenwechsel von X bei $\varepsilon(X = 0) = \varepsilon_0$ folgt

$$B = (1 - A) \cos \varepsilon_0 \quad (81)$$

so daß

$$a = A + (1 - A) \frac{\cos \varepsilon_0}{\cos \varepsilon} \quad (82)$$

Nach Bild 31 kann

$$\varepsilon_0 \simeq (0.5 + 0.9 \frac{s_L}{L_{oa}}) \pi \quad (83)$$

angenommen werden.

Für den Ablenkwinkel wird (28) gefordert. Daraus folgt mit \bar{a} aus (32) der Koeffizient A und schließlich B aus (81).

Aus (79) wird unter Verwendung von (80) die Längskraft bei Queranströmung berechnet:

$$|CX_{\pi/2}| = CD_q * \cos(\arctan(\lim_{\varepsilon \rightarrow \pi/2} \frac{\tan \varepsilon}{1 - (A + \frac{B}{\cos \varepsilon})})) = \frac{B}{\sqrt{1 + B^2}} \quad (84)$$

Aus der entsprechenden Beziehung für nun bekanntes $|CX_{\pi/2}|$ folgt für den Quadranten ohne Vorzeichenwechsel von X

$$B' = - \frac{|CX_{\pi/2}|/CD_q}{\sqrt{1 - (\frac{|CX_{\pi/2}|}{CD_q})^2}} \quad (85)$$

so daß für diesen Quadranten

$$a' = A' - \frac{|CX_{\pi/2}|/CD_q}{\sqrt{1 - (\frac{|CX_{\pi/2}|}{CD_q})^2}} \frac{1}{\cos \varepsilon} \quad (86)$$

Wieder liefert (28) für bekanntes \bar{a}' den Koeffizienten A' .

Beispiel: Verfeinerte Windlastfunktionen für ein längsunsymmetrisches Schiff, das Offshore-Versorgungsschiff (SUP0107BN), und Vergleich mit Meßwerten. Die Daten des Schiffs sind: Länge $L_{oa} = 61.00$ m, Breite $B = 13.00$ m, Lateralfäche $A_L = 260.3$ m², Frontschattenfläche $A_F = 110.1$ m², Lage des Lateralschwerpunkts $s_L = 7.12$ m vor Hauptspant, $s_H = 3.14$ m über der Schwimmwasserlinie. Die Windlastparameter werden von SUP0201BN übernommen:

	vorlicher Wind	achterlicher Wind
CD_q		0.92
CD_{IAF}	0.55	0.82
δ	0.56	0.43
κ		1.20

Bild 35 zeigt das Ergebnis der Rechnung. Die Lastfunktion der Längskraft ist bezüglich der Frontschattenfläche angegeben. Dadurch erscheinen Differenzen um das 2.4-fache überhöht

gegenüber denen der Seitenkraft. Der Ablenkparameter folgt weitgehend dem experimentellen Verlauf (Bild 35 unten), doch der Längskraftverlauf bei vorlichem Wind wird etwas unruhig.

Form 3: Für den Ablenkparameter wird angesetzt

$$a = A - B * \cos 2\varepsilon \quad (87)$$

mit positivem Koeffizienten B . Aus $a = 1$ für Vorzeichenwechsel von X bei $\varepsilon(X = 0) = \varepsilon_0$ folgt

$$B = \frac{A - 1}{\cos 2\varepsilon_0} \quad (88)$$

so daß

$$a = A + (1 - A) \frac{\cos 2\varepsilon}{\cos 2\varepsilon_0} \quad (89)$$

Es kann $\varepsilon_0 = 60$ Grad angenommen werden (30 Grad um die Querrichtung).

Auch hier wird für $\Delta\varepsilon$ Gleichung (28) gefordert. Daraus folgt mit \bar{a} aus (31) der Koeffizient A und schließlich B aus (88). Die Rechnung wird für vorlichen und achterlichen Wind durchgeführt.

Beispiel: Verfeinerte Windlastfunktionen für ein quaderförmig kompaktes Schiff, das Fährschiff (**FER0201BN**), und Vergleich mit Meßwerten. Die Daten des Schiffs sind: Länge $L_{oa} = 143.90$ m, Breite $B = 17.35$ m, Lateralfläche $A_L = 2125.8$ m², Frontschattenfläche $A_F = 325.3$ m², Lage des Lateralschwerpunkts $s_L = 1.36$ m vor Hauptspant, $s_H = 8.15$ m über der Schwimmwasserlinie. Die Windlastparameter werden von **FER0201BN** übernommen:

	vorlicher Wind	achterlicher Wind
CD_q		0.88
CD_{lAF}	0.45	0.47
δ	0.80	0.74
κ		1.00

Bild 36 zeigt das Ergebnis der Rechnung. Die Lastfunktion der Längskraft ist bezüglich der Frontschattenfläche angegeben. Dadurch erscheinen Differenzen um das 6.5-fache überhöht gegenüber denen der Seitenkraft. Der Ablenkparameter folgt dem experimentellen Verlauf (Bild 36 unten).

12 Einfluß eines Windgradienten

Bisher wurde das Schiff in gleichförmiger Luftströmung betrachtet. Für schnelle Schiffe bei mäßigem Wind trifft das zu. Hauptursache der Luftkräfte ist hier der Fahrtwind. Schnelle Schiffe fahren gewissermaßen vorwiegend 'hoch am Wind'. Bei langsam fahrendem Schiff und besonders am Schiff ohne Fahrt ist dagegen der örtliche Wind Ursache der Luftkräfte. Natürlicher Wind aber ist durch Turbulenz und Gradienten vom Fahrtwind verschieden. Beide Windeigenschaften, die an sich untrennbar miteinander verbunden sind, haben einen deutlichen Einfluß.

Besondere Aufmerksamkeit verdient das Schiff bei langsamer Fahrt mit eingeschränkter Manövrierfähigkeit etwa in Häfen, auf Kanälen oder beim Schleusen. Örtliche Windverhältnisse können den Schiffsverkehr derart beeinträchtigen, daß Windschutzmaßnahmen nötig sind [38, 27].

Die Turbulenzintensität des Windes (Wurzel aus der Varianz durch mittlere Geschwindigkeit) ist über See etwa 0.1 und liegt damit um eine Größenordnung über der üblichen Turbulenzintensität des Luftstroms von Windkanälen. Aus Messungen an einfachen Körperformen (z.B. [31]) ist bekannt, daß Turbulenz auch auf den Strömungswiderstand scharfkantiger Objekte, die gemeinhin als kennzahlunempfindlich gelten, einen beträchtlichen Einfluß haben kann. Zurückzuführen ist dieser Sachverhalt auf veränderten Impulsaustausch am Objekt durch die Turbulenz der Strömung. Das kann widerstandsvermindernd sein, aber den Widerstand auch erhöhen, so daß die Abschätzung des Turbulenzeinflusses im allgemeinen unsicher ist. Vergleichsmessungen an Schiffsmodellen in turbulenzarmer und stark turbulenter Strömung (Turbulenzintensität ~ 0.04) haben bei den Windkräften generell eine Zunahme ergeben und bei den Windmomenten eine, wenn auch geringe, Verminderung. Bild 37 zeigt Meßergebnisse für das Fährschiff **FER0201BN** im Vergleich mit der Messung ohne Turbulenzgitter (Turbulenzintensität ~ 0.005).

Messungen in Strömungen mit Gradienten entsprechend den Verhältnissen bei Starkwind über See (völliges Windprofil) sowie über offenem Gelände (weniger völliges Windprofil), erzeugt durch Stabgitter in der Austrittsdüse des Windkanals, haben ergeben, daß sich der Verlauf der Windkräfte und Windmomente über dem Anströmwinkel gegenüber dem Verlauf bei gleichförmiger Anströmung praktisch nicht ändert. Den Nachweis liefert Bild 38 für das Containerschiff **CON0101BN**. Man kann das Ergebnis auch so formulieren: Der natürliche Wind verändert das Lastniveau, nicht aber die Lastfunktion. Erklären läßt es sich mit der intensiven Vermischung der Luft und dem damit verbundenen Druckausgleich auf der Leeseite des Schiffs.

Anders verhält es sich bei räumlich stark ungleichförmiger Strömung z.B. in natürlichem Windschutz oder hinter Windschutzbauten. Dazu wurden Windkanalversuche durchgeführt mit einer Windschutzvorrichtung, die aus einer gezähnten Leiste als Modell 1:150 einer Plattenreihe bestand (Windschutz mit belüftetem Nachlauf, siehe Bild 39). Die Abmessungen der Leiste waren abgestimmt auf einen Autotransporter (**CAR0101BN**, Länge 190.7 m, mittlere Höhe 22.3 m), der im Abstand von 168 m, etwa in Schiffslänge, vor dem Windschutz ein Drehmanöver ausführt: Höhe 7.5 m, Breite 6.0 m, Abstand 3.0 m, mittlere Höhe 5.0 m. Auf eine Modellierung natürlicher Verhältnisse des Niveaus von Wasser und Land wurde verzichtet, damit im Drehbereich des Schiffs, wie im natürlichen Wind, der statische Druck im Nachlauf konstant blieb.

Bild 39 zeigt das Strömungsprofil, bezogen auf die ungestörte Geschwindigkeit u_0 , bei Rücklagen x_R von 12.3, 22.3 und 32.3 mittleren Höhen H_{RM} des Windschutzes. In Bild 40 sind die Geschwindigkeitsprofile dimensionslos als Geschwindigkeitsdelle $(1 - u/u_0)$ aufgetragen, wobei mit der Wurzel aus der Rücklage normiert worden ist, wie im ebenen Fall eines Nachlaufs mit freier Turbulenz [33].

Beim Drehmanöver im Windschutz durchläuft das Schiff eine stark turbulente, inhomogene Strömung, die sich zusätzlich über die Schiffslänge ändert. Das verändert den Verlauf der Windlast gegenüber gleichförmiger Strömung (Bild 41). Doch dies sind Effekte der

Umströmung, die beim Schiff im Windschutz, bei dem es um Größe bzw. Verminderung der Windkräfte geht, zweitrangig sind.

Bei ungleichförmiger Anströmung des Schiffs kommt es also im wesentlichen darauf an, die Beiwerte von Längs- und Querwiderstand, CD_l und CD_q , neu zu bestimmen. Die Lastfunktionen bleiben erhalten bzw. werden beibehalten. Das Ergebnis kann für das Schiff im natürlichen Wind geringfügig und daher für Belange einer Schätzung unbedeutend sein, weil die Referenzgeschwindigkeit des Windes, die generell für 10 m Höhe angegeben wird, zufällig einen geeigneten Bezugsstaudruck liefert. Es bleibt aber die grundsätzliche Frage, wie man bekannte Windlast von gleichförmiger Strömung auf ungleichförmige Anströmung umrechnet.

Wesentlich für die Windkräfte und Windmomente ist nun ein gemittelter Staudruck. Wie *Wieghardt* [42] für Oberflächenstörungen in turbulenter Reibungsschicht gezeigt hat, läßt sich der Widerstandsbeiwert durch einen mittleren Staudruck über die Objekthöhe auf den Wert in gleichförmiger Strömung zurückführen (Beiwertreduktion). Wie der Bezugsstaudruck für Schiffe im Wind auch lauten mag, man erhält so aus bekannten Werten CD_q und CD_l für gleichförmige Strömung die Beiwerte von Quer- und Längswiderstand in ungleichförmiger Strömung

$$CD_{q\text{red}}, CD_{l\text{red}} \simeq (CD_q, CD_l) \frac{q_*}{q_h} \quad (90)$$

Es ist q_* der Bezugsstaudruck und q_h der Staudruck der ungleichförmigen Strömung in der Höhe h . Dies sind die neuen Widerstandsbeiwerte in den Windlastfunktionen. Ob die Beiwerte von Quer- und Längswiderstand mit demselben Staudruck umgerechnet werden, bleibe im Augenblick offen.

Besonders einfach ist der Fall des Schiffs ohne Fahrt oder, wenn der Fahrtwind gegenüber dem Wind ohne Bedeutung ist. Das Profil des natürlichen Windes wird in der Bauwerksaerodynamik durch das Potenzgesetz (z.B.[29])

$$u_W(z) = u_W(z = h) * \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (91)$$

angenähert, allgemein mit $u_W(z = h) = u_{10}$, der mittleren Windgeschwindigkeit in $h=10$ m Höhe (Standardhöhe des Windes). Das gilt auch für anzunehmende seltene maximale Geschwindigkeiten des Windes als Bemessungsgeschwindigkeit. Basisgeschwindigkeit $u_{10\text{Basis}}$ ist das Stundenmittel des Windes im ausgeprägt flachen Minimum seiner Schwankungsenergie [20]. Der Windstärke in Beaufort (Bft) entspricht die Windgeschwindigkeit

$$u_{10\text{Basis}} = 0.836 \frac{\text{m}}{\text{s}} * (\text{Bft})^{\frac{3}{2}} \quad (92)$$

Unterhalb 10 m Höhe wird fallweise konstante Geschwindigkeit $u_W = u_{10}$ angenommen (z.B. [14]).

Bei anhaltend starkem Wind $u_{10} \geq \sim 10$ m/s ist die Luft über See gut durchmischt und daher praktisch neutral geschichtet [43]. Hierfür kann $n \simeq 8$ bis 12 genommen werden. Ein geeigneter Mittelwert ist $n = 10$. Bei schwächerem Wind ist die Schichtung der Luft über See meistens labil. Das Windprofil ist dann weniger völlig und, gemittelt über die Höhe, besser durch $n \simeq 5$ bis 6 anzunähern. Für Wind in weiträumigen Häfen wird man mit

Werten etwa zwischen $n = 4$ wie für städtische Bebauung und $n = 6$ für offenes Gelände rechnen können [35]. Die Messungen im Windkanal wurden mit $n=10$ und 5 durchgeführt.

Eine gewisse Schwierigkeit entsteht bei der Festlegung der Höhe von Schiffen. Hier bietet sich die mittlere Höhe H_M als Quotient von Fläche und Länge an. Für das Potenzgesetz (91) wird der mittlere Staudruck über diese Höhe, bezogen auf den Staudruck in Bezugshöhe,

$$\frac{\bar{q}_{HM}}{q_h} = \frac{n}{n+2} \left(\frac{H_M}{h} \right)^{\frac{2}{n}} \quad (93)$$

Damit lautet der Beiwert des Querwiderstands bezüglich Staudruck des Windes in Standardhöhe für das Schiff ohne Fahrt

$$CD_{qn} \simeq \frac{n}{n+2} \left(\frac{H_M}{10\text{m}} \right)^{\frac{2}{n}} * CD_q \quad (94)$$

Beim Rollmoment kann man noch berücksichtigen, daß der Hebel des mittleren Staudrucks im Wind sich erhöht gegenüber dem Wert in gleichförmiger Strömung um $(n+2)/(n+1)$, so daß für den Rollmomentenbeiwert gilt

$$CK_n \simeq \frac{n}{n+1} \left(\frac{H_M}{10\text{m}} \right)^{\frac{2}{n}} * CK \quad (95)$$

Die Zunahme des Rollmomentenfaktors mit dem Exponenten $1/n$ spricht dafür. Der Hebel des Giermoments ändert sich nicht.

Bei hohen Schiffen sind der mittlere Staudruck des Windes über H_M und der Staudruck des Mittelwindes praktisch gleich.

Die Nachprüfung von (90) für den Querwiderstand einer quadratischen und einer dreieckförmigen Platte aus [4] zeigt, daß nach Berücksichtigung des Gradienten ein deutlicher Einfluß der Objektform bleibt. In Bild 42 sind die reduzierten Widerstandsbeiwerte der beiden Platten aufgetragen über

$$\delta_I = \int_H \left(1 - \left(\frac{u(z)}{u_H} \right)^2 \right) dz \quad (96)$$

Für (91) wird

$$\frac{\delta_I}{H} = \frac{2}{n+2} \quad (97)$$

so daß $\delta_I/H = 0.167$ und 0.286 für $n = 10$ bzw. 5 . Offenbar ist für die Dreieckplatte der mittlere Staudruck über deren Höhe ein geeigneter Bezugswert. Nähme man hier, der für Schiffe sinnvollen, weil eindeutigen, Annahme folgend, als Bezugswert den Staudruck über die mittlere Höhe, so würde der Einfluß des Windgradienten erheblich unterschätzt.

In Bild 43 werden die reduzierten Beiwerte des Querwiderstands von Schiffen in Strömung mit Gradienten mit den Werten für gleichförmige Strömung verglichen. Bezugswert ist der Staudruck über die mittlere Höhe. Im Mittel liegen die Beiwerte über den Werten für gleichförmige Strömung. Dies bedeutet, den Einfluß eines Windgradienten unterschätzen, wenn man von den Werten in gleichförmiger Strömung ausgeht. Tabelle 6 gibt das Mittel der Beiwerte, bezogen auf den Wert in gleichförmiger Strömung, und deren relative Streuung. Ein weiterer möglicher Bezugswert ist der mittlere Staudruck über der Lateralfäche. Die

Tabelle 6: Relatives Mittel und relative Streuung des reduzierten Querwiderstands von Schiffen

	Bezugsstaudruck	\bar{q}_{HM}	\bar{q}_{AL}	\bar{q}_{mix}
1/10-Profil	$\overline{CD}_{q\ red}/CD_q$	1.043	1.010	0.974
	$\sigma/\overline{CD}_{q\ red}$	0.10	0.09	0.10
1/5-Profil	$\overline{CD}_{q\ red}/CD_q$	1.142	1.082	1.002
	$\sigma/\overline{CD}_{q\ red}$	0.20	0.17	0.16
Windschutz	$\overline{CD}_{q\ red}/CD_q$	1.336	1.283	0.985

Reduktion ist im Mittel etwas besser, doch auch damit wird der Einfluß des Gradienten unterschätzt. Das gilt insbesondere für das Schiff im Windschutz.

Die Geschwindigkeit im Windschutz ändert sich zu stark, als daß der mittlere Zustrom den Unterdruck (Basisdruck) am Schiff, bestimmen könnte. Entscheidend für den Basisdruck ist offenbar die Geschwindigkeit über dem Schiff. Ein Maß dafür ist die Geschwindigkeit in der mittleren Höhe. Teilt man den Bezugsstaudruck auf nach den Beiträgen von Luv- und Leeseite zum Querwiderstand, nach Vergleichswerten von Platten etwa 2/3 und 1/3,

$$\bar{q}_{mix} = 0.65\bar{q}_{HM} + 0.35q_{HM} \quad (98)$$

so stimmen reduzierter Beiwert und Beiwert des Querwiderstands im Mittel überein, auch für ungleichförmige Strömung (Tabelle 6). Bild 44 zeigt das Kollektiv der reduzierten Beiwerte im Vergleich mit den Werten für gleichförmige Strömung.

In Bild 45 sind die Windlastbeiwerte für den Autotransporter **CAR0101BN** im Windschutz für vorliche bis achterliche Anströmung mit (98) reduziert worden. Während die Beiwerte der Seitenkraft jetzt gut mit den Werten für gleichförmige Strömung übereinstimmen, ist das für die Längskraft nicht der Fall. Die immer noch erhöhten Werte gegenüber gleichförmiger Strömung kann man so interpretieren, daß die Längskraft von der Geschwindigkeit über dem Schiff beherrscht wird. Demnach wäre für den Längswiderstand der Staudruck der Strömung in der mittleren Höhe besser geeignet. Bestätigt wird das durch Bild 46. Es zeigt Beiwerte des Längswiderstands reduziert mit dem mittleren Staudruck über der mittleren Höhe (a) und mit dem Staudruck in der mittleren Höhe (b). Tabelle 7 enthält das Mittel der Beiwerte, bezogen auf den Wert in gleichförmiger Strömung, und deren relative Streuung.

Am fahrenden Schiff ist das Profil des scheinbaren Windes verwunden. Hier kann man eine koplanare Überlagerung von Wind und Fahrtwind wählen mit der Richtung des scheinbaren Windes in der mittleren Höhe des Lateralplans.

Tabelle 7: Relatives Mittel und relative Streuung des reduzierten Längswiderstands von Schiffen

	Bezugsstaudruck	\bar{q}_{HM}	q_{HM}
1/10-Profil	$\overline{CD}_{l\text{red}}/CD_l$	1.123	0.936
	$\sigma/\overline{CD}_{l\text{red}}$	0.13	0.10
1/5-Profil	$\overline{CD}_{l\text{red}}/CD_l$	1.334	0.954
	$\sigma/\overline{CD}_{l\text{red}}$	0.29	0.15

13 Das Schiff mit Schlagseite

Die Untersuchung galt soweit ausschließlich dem aufrecht schwimmenden Schiff. Die Frage, welchen Einfluß eine Schräglage auf die Windlast hat, stellt sich besonders im Havariefall. Das intakte Schiff im Seegang kann bezüglich der Wirkung des Windes in statischer aufrechter Schwimmelage angenommen werden. Der Einfluß kleiner Neigungswinkel ist gering. Ob das auch für starke Schlagseite bzw. große Rollwinkel gilt, ist zu untersuchen.

Über die Windlast am Schiff mit Schlagseite ist bis heute wenig bekannt. Unsicherheit besteht besonders beim Rollmoment. Das zeigen auch die unterschiedlichen Annahmen zum Rollmoment bei Seitenwind [22]. *Rahola* [30] setzte das krängende Windmoment proportional zur Windschattenfläche des geneigten Schiffs. Dies ergibt anfänglich einen Anstieg mit zunehmender Neigung gegenüber dem Wert bei aufrechter Schwimmelage. Die meisten Aufsichtsbehörden nehmen Unabhängigkeit vom Neigungswinkel an im Bereich relevanter Krängungen bis etwa 50 Grad. Von Segelschiffen ist die \cos^2 -Abhängigkeit bekannt. Diese Funktion wird gelegentlich auch für andere Schiffe genommen. Breitere Verwendung findet die empirische Funktion [41]

$$K_q(\varphi) = K_q(\varphi = 0^\circ) * (0.75\cos^3\varphi + 0.25) \quad (99)$$

wobei φ der Neigungswinkel (Krängungs-, Rollwinkel) ist. Sie beruht auf Windkanalmessungen am Modell kleinerer Schiffe [24] und hat den Vorzug, daß sie für das Schiff in extremer Schräglage bis zur Seitenlage zumindest keine unsinnigen Werte liefert. K_q ist das Rollmoment bei Seitenwind. Alle Ansätze gelten dem kritischen kenternden Moment bei Krängung nach Lee.

Autotransporter und die heutigen Fährschiffe sind durch ihre Höhe und große Lateralfäche besonders empfindlich für Seitenwind. Aber auch vollbeladene Containerschiffe zählen dazu. In den nationalen Vorschriften der Bundesrepublik Deutschland zur Schwimmstabilität ist ein krängendes Moment durch Wind nur bei Fahrgastschiffen anzunehmen [36], während es sonst mittelbar etwa über das *Rahola*-Kriterium [22] berücksichtigt wird. Allerdings überprüft der Germanische Lloyd bei unkonventionellen Schiffen (Containerschiffe, Autotransporter u.a.) die Annahmen und fordert gegebenenfalls höhere Stabilitätswerte.

Am Modell eines modernen Fährschiffs (**FER0301BN**, Baujahr 1989, [2]) sind die Windkräfte und Windmomente sowohl in aufrechter als auch in 15 Grad und 30 Grad geneigter Schwimmelage gemessen worden [11]. Bild 47 zeigt die Kraft- und Momentenbei-

werte für Krängung nach Luv und Bild 48 für Krängung nach Lee, jeweils einschließlich der Werte für die aufrechte Schwimmelage. Die Windlastbeiwerte sind in üblicher dimensionsloser Form aufgetragen. Bezugsgrößen sind die Werte des aufrecht schwimmenden Schiffs, Länge über alles $L_{oa}=161$ m, Lateralfäche $A_L=4223.3$ m², Frontschattenfläche $A_F=898.2$ m², mittlere Höhe $H_M = A_L/L_{oa}=26.2$ m.

Ob und wie die Lastfunktionen am geneigten Schiff sich ändern, erkennt man in der kennzeichnenden Auftragung Bild 49 und Bild 50. Am stärksten betroffen ist der Hebel des Rollmoments. Sonst ändert sich wenig. Insbesondere der Giermomentenhebel ist praktisch unverändert.

Die Versuchsergebnisse rechtfertigen den Produktansatz

$$CF(\varepsilon, \varphi) = f_{CF}(\varphi) * CF(\varepsilon) \quad (100)$$

wobei CF für die Beiwerte der Windlastkomponenten X , Y , N und K steht. $CF(\varepsilon)$ ist durch die Lastfunktionen (61) und (67) gegeben. Bezugsfläche ist die Lateralfäche bei aufrechter Schwimmelage. Die Funktion $f_{CF}(\varphi)$ ist dann das Verhältnis der Windlasten bei Seitenwind (Index q) am geneigten und am aufrecht schwimmenden Schiff:

$$\begin{aligned} f_{CX} &= 1 && \text{für die Längskraft} \\ f_{CY} &= \frac{CD_q(\varphi)}{CD_q(\varphi=0^\circ)} && \text{für die Seitenkraft} \\ f_{CN} &= \frac{CD_q(\varphi)}{CD_q(\varphi=0^\circ)} && \text{für das Giermoment} \\ f_{CK} &= \frac{CK_q(\varphi)}{CK_q(\varphi=0^\circ)} && \text{für das Rollmoment} \end{aligned} \quad (101)$$

Bild 51 zeigt das Ergebnis der Analyse. Darin sind der gemittelte Ablenkparameter \bar{a} und der Querkraftparameter δ über dem Krängungswinkel aufgetragen. Der Ablenkparameter unterscheidet sich kaum für vorliche und achterliche Anströmung und ist praktisch unabhängig von der Krängung, ob nach Luv oder nach Lee, im untersuchten Bereich. Er folgt (31): Das mittlere Verhältnis $\bar{a}/(1 - CD_l/CD_q)$, gebildet insgesamt für das Schiff in aufrechter und gekrängter Schwimmelage, ist 1.01 mit einer Streuung von 0.002. Hohe Maxima der Querkraft entstehen bei ausgeprägt konischem Wirbel am schräg umströmten Schiff. Am Fährschiff ist das der Fall. Mit Krängung nach Lee wird dieser Wirbel schwächer und mit Krängung nach Luv stärker, entsprechend fällt und steigt δ .

Bild 52 zeigt den Rollmomentenfaktor κ und den Rollmomentenbeiwert bei Windeinfall um die Querrichtung, CK_q , in Abhängigkeit vom Krängungswinkel. Obwohl die Seitenkraft sich kaum ändert bei Krängung nach Lee und damit ihr Beitrag zum Rollmoment gleichbleibt, nimmt das Moment stark ab. Das bedeutet aufrichtende Wirkung der vertikalen Windkraft am Schiff. Der Auftrieb am Schiff macht etwa zwischen 30 und 50 % der Seitenkraft aus.

In Bild 53 ist das Rollmoment K_q bei quer einfallendem Wind, bezogen auf den Wert $K_q(\varphi = 0)$, über dem Krängungswinkel aufgetragen. Hinzugefügt sind Werte für ein älteres Kreuzfahrtschiff [17] und einen Zerstörer [37]. Ferner sind Vergleichsmessungen an einem Quader (Länge 100 cm, Breite 15 cm Höhe 15 cm Tiefgang 4.5 cm) eingetragen (siehe **OBJ0101BN** und **OBJ0101SN**). Der Quader wurde bis zur Seitenlage gekrängt. In

extremer Schräglage taucht bei Schiffen die Kimm aus. Deshalb war der Quader mit Kimm versehen worden (Kimmradius 1.5 cm). Bei Neigung nach Lee verhält sich das Rollmoment nicht anders als am Fährschiff: Es nimmt ab. Überraschend nimmt es aber auch bei Neigung nach Luv ab, während es an den Schiffen zunächst zunimmt. Am gekrängten wie am aufrecht schwimmenden Schiff ist es das Rollmoment, das von allen Komponenten der Windlast am empfindlichsten auf die Luftströmung an den Aufbauten reagiert.

Schließlich ist in Bild 53 noch eine empirische Funktion eingefügt worden für Krängung nach Luv und nach Lee:

$$\frac{K_q(\varphi)}{K_q(\varphi = 0^\circ)} = 1 - 0.40 \sin^2 \varphi - 0.23 \sin 2\varphi \quad (102)$$

Mit den verfügbaren Daten ist es für eine abschließende Bewertung der Ansätze zu früh. Anders ist es bei mäßiger Krängung nach Lee. Hierfür ist es gleich, welche der gebräuchlichen Funktionen man wählt. Der sogenannte Panikwinkel für Fahrgastschiffe beträgt 12 Grad.

Läßt man bei Fragen der Sicherheit sinkendes Windrollmoment zu mit zunehmendem Krängungswinkel, so sollte bedacht werden, daß der Höchstwert nicht unbedingt bei quer einfallendem Wind zu erwarten ist, und dies multiplikativ durch einen Aufschlag berücksichtigt werden. Aus der Lastfunktion (67) erhält man den in Bild 54 dargestellten Zusammenhang von maximalem Rollmoment und Windlastparametern. Dafür ist im Bereich üblicher $\delta * \bar{a}$ -Werte in guter Annäherung

$$\frac{K_{max}}{K_q} = 1 + 0.055(4 \delta * \bar{a} - 1)^2 \quad (103)$$

sofern $\delta * \bar{a} > 0.25$, sonst 1. Offenbar ist (103) für Schiffe mit hoher, geschlossener Lateralfäche eine obere Grenze. Das Produkt aus δ und \bar{a} nimmt zu bei Krängung nach Luv und ab bei Krängung nach Lee; \bar{a} steht hier für (31). Die am Fährschiff gemessenen Maximalwerte sind durch Werte für weitere Fähren, Autotransporter und ein Kreuzfahrtschiff ergänzt worden. Die Werte streuen, wie man es vom Windrollmoment gewohnt ist. Dennoch sind Maximalwert und Windlastparameter mit $KK = 0.56$ (quadratisch) korreliert (Mindestwert 0.444 bei 20 Aufpunkten im zweiseitigen Test und 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit). Der Hebel des Rollmoments für diese Schiffe, deren Verhältnis von Breite zu mittlerer Höhe meist eben über 1 liegt, ist in aufrechter Schwimmelage praktisch gleich der Höhe des Lateralschwerpunkts (Bild 26). Es ist $\kappa = 1.05 \pm 0.09$, d.h. zwei Drittel aller Werte sind innerhalb der angegebenen schmalen Grenzen zu erwarten.

An Containerschiffen, deren Lateralfäche zwar groß, aber wegen der Gänge zwischen den Containerstapeln nicht geschlossen ist, tritt das maximale Rollmoment bei Seitenwind auf. An den stark längsunsymmetrischen Schiffen findet man das maximale Rollmoment bei vorlicher Lage des Lateralschwerpunkts in vorlichem Wind und umgekehrt (siehe Bild 2).

Im Windkanal ist das Schiffsmodell über einer ebenen Platte angebracht, welche die Wasseroberfläche darstellt. Das Schiff aber befindet sich bei Wind in bewegter See. Es bleibt noch die Frage zu beantworten, welchen Einfluß die Schiffsbewegung in Wellen, insbesondere starkes Rollen, auf die Luftkräfte hat. Bei quasistationärer Betrachtung und mit der Anströmgeschwindigkeit in der mittleren Höhe des Lateralplans durch Rollen bei ruhender Luft,

$$\dot{y}_{HM}(t) = \dot{y}_{0HM} * \sin \omega t \quad (104)$$

mit $\dot{y}_{0HM} = \omega * H_M * \sin \varphi_0$ Geschwindigkeitsamplitude, φ_0 Amplitude und ω Kreisfrequenz der Rollbewegung, kann man die Seitenkraft im Wind abschätzen mit

$$Y(t) \simeq CY * \frac{\rho}{2} (u_W + \dot{y}_{HM}(t)) |u_W + \dot{y}_{HM}(t)| * A_L \quad (105)$$

Der Wind wird als stetig angenommen.

Für $\dot{y}_{0HM} \leq u_W$ erhält man im zeitlichen Mittel

$$\bar{Y} = CY \frac{\rho}{2} u_W^2 (1 + \frac{1}{2} (\frac{\dot{y}_{0HM}}{u_W})^2) \quad (106)$$

In gleichem Maße ändert sich das Windrollmoment, unveränderten Rollmomentenhebel angenommen.

Rollen im Seitenwind führt zu einer Erhöhung der mittleren Seitenkraft. Aber dieser Effekt ist nicht groß, wie das Beispiel eines Forschungsschiffs ($L_{oa}=97.5$ m, $A_L=1094\text{m}^2$, $H_M=11.2$ m) zeigt. Für stürmischen Wind (8 Bft=19 m/s) und relativ kurze Windsee, in der das Schiff mit einer Periode von 6 s eine Rollamplitude von etwa 20 Grad erreicht, erhält man $\dot{y}_{0HM}/u_W=0.04$ und damit aus (106) lediglich eine Erhöhung der Seitenkraft um $\sim 2\%$, d.h. der Effekt der Rollbewegung ist ohne Bedeutung. Was die Windwirkung betrifft, kann man das Schiff in schwerer See behandeln, als ob es sich durch ruhiges Wasser bewegt. Das entspricht den Versuchsbedingungen im Windkanal.

14 Manöver im Wind

Am manövrierenden Schiff kann der Wind die Kräfte beherrschen. Manöver im Wind sind eine von vielen Anwendungsmöglichkeiten der Windlastfunktionen. Das Schiff macht keine Fahrt oder fährt sehr langsam. Die Windkräfte sind statisch oder können als quasistatisch angenommen werden. Beispiele sind das Einlaufen in Schleuse und Fährbett, das Wenden mit Schlepperhilfe und das Drehen bzw. Stützen im Wind.

Zwei Fälle werden näher betrachtet: das antriebs- und steuerlos im Wind treibende Schiff und das gestützt driftende bzw. positionierte Schiff. Im zweiten Fall drehe das Schiff oder werde so langsam gedreht, daß durch die Drehung entstehende Kräfte unbeachtet bleiben können. Man erhält (Bild 55):

$$X + X_R + V_x + H_x = 0 \quad (107)$$

$$Y + Y_R + V_y + H_y = 0 \quad (108)$$

$$N + N_R + x_V * V_y + x_H * H_y = 0 \quad (109)$$

Der Index R bezeichnet hier und folgend das Schiff unter Wasser. V im Abstand x_V (positiv) vor Hauptspant ist eine Kraft vorn durch Strahlapparat oder Schlepper und H im Abstand x_H (negativ) hinter Hauptspant eine Kraft achtern durch Antrieb, Strahlapparat oder Schlepper. Deren Komponenten haben den Index x, y in Längs- bzw. Querrichtung.

Am schiebenden Schiff zeigen die Strömungskräfte am Rumpf die gleiche typische Abhängigkeit vom Anströmwinkel wie die Windkräfte. In Bild 56 sind Messungen am jachtähnlichen Rumpf eines Frachtseglers (Indosail) aus Schrägschleppversuchen [23] wiedergegeben.

Es liegt daher nahe, für die Reaktionskräfte unter Wasser im Zusammenwirken mit den Windkräften die Funktionen (61) und (64) zu verwenden mit den entsprechenden Parameterwerten für den Schiffsrumpf. Bild 58 zeigt die Längskraft und die Seitenkraft sowie das Giermoment am Rumpf des Frachtseglers in kennzeichnender Auftragung und Bild 58 am Rumpf eines Forschungsschiffs aus Messungen im Windkanal [39].

Feine Schiffslinien unter Wasser ergeben kleine Verhältniszahlen von Längs- zu Querwiderstand und damit starke Ablenkung der resultierenden Kraft bei Schräganströmung. An den beiden Schiffen macht der Längswiderstand zwei bis drei Prozent des Querwiderstands aus. Der gemittelte Ablenkparameter liegt um 0.95. Der Querkraftparameter ist 0.49 am Frachtsegler und 0.55 am Forschungsschiff.

Der einfachste Anwendungsfall ist das quer zum Wind treibende Schiff. Das trifft zu, wenn die Lateralschwerpunkte über und unter Wasser etwa übereinanderliegen. Aus dem Gleichgewicht der Seitenkräfte Y und Y_R , mit Berücksichtigung der Drift, Geschwindigkeit v_q :

$$CD_q * \frac{\rho}{2}(u_W - v_q)^2 * A_L = (CD_q * \frac{\rho}{2}v_q^2 * A_L)_R \quad (110)$$

folgt

$$\frac{v_q}{u_W} = \frac{\alpha_v}{1 + \alpha_v}, \quad \alpha_v = \sqrt{\frac{\rho * CD_q * A_L}{(\rho * CD_q * A_L)_R}} \quad (111)$$

Haupteinflußgröße ist das Verhältnis der Lateralfächen über und unter Wasser. Es ist mit nahezu 5 besonders hoch für die heutige Generation der Fährschiffe. Diese Schiffe verdriften quer mit rund 1/10 der Windgeschwindigkeit. Im Mittel ist (Bild 59)

$$\frac{v_q}{u_W} = 0.039 \sqrt{\frac{A_L}{L_{pp} * \bar{T}}} \quad (112)$$

mit \bar{T} mittlerer Tiefgang. Das 1.24-fache dieses Wertes, entsprechend Mittelwert plus 3.1*Streuung, wird bei den untersuchten konventionellen Schiffen mit 99.9 % Wahrscheinlichkeit nicht überschritten. Ein griffiger oberer Wert ist $\frac{1}{20} \sqrt{A_L/(L_{pp} * \bar{T})}$. Die Streuung um die Regressionsgerade beträgt 0.003, der Korrelationskoeffizient ist 0.97.

Beispiel: Das Fährschiff **FER0301BN** treibe manövrierunfähig im Meer. Wie groß ist die Driftgeschwindigkeit? Lateralfäche, Länge zwischen den Loten und (mittlerer) Tiefgang sind $A_L = 4223.3 \text{ m}^2$, $L_{pp} = 144.0 \text{ m}$ und $T = 6.1 \text{ m}$. Das Schiff drifftet quer. Die Driftgeschwindigkeit, bezogen auf die Windgeschwindigkeit, beträgt $v_q/u_W = 0.11$.

Schiffe mit ausgesprochener Unsymmetrie der Lateralfäche, so daß also die Längslage der Lateralschwerpunkte über und unter Wasser stark differiert, driften nicht quer. Dies ist in der Regel ohne Belang, gewinnt aber an Bedeutung, wenn ein Schiff z.B. als Arbeitsplattform dient. So sollten Forschungsschiffe bei der Arbeit über die Seite möglichst quer driften.

Den Windkräften und dem Windgiermoment am Schiff steht die Reaktion am Rumpf entgegen:

$$X + X_R = 0, \quad Y + Y_R = 0, \quad N + N_R = 0 \quad (113)$$

Mit dem denkbar einfachen Ansatz

$$X = -CD_l * \cos \varepsilon * q * A_L \quad (114)$$

$$Y = CD_q * \sin \varepsilon * q * A_L \quad (115)$$

aus (61) mit $\delta = 0$ und, unter Verwendung von (48) mit $\gamma = 0$,

$$N = (s_L + |(\frac{dx_F}{d\varepsilon})_q| * \cos \varepsilon) * Y \quad (116)$$

erhält man

$$CD_l * \cos \varepsilon * q * A_L + CD_{lR} * \cos \varepsilon_R * q_R * A_{LR} = 0 \quad (117)$$

$$CD_q * \sin \varepsilon * q * A_L - CD_{qR} * \sin \varepsilon_R * q_R * A_{LR} = 0 \quad (118)$$

$$(s_L + |(\frac{dx_F}{d\varepsilon})_q| * \cos \varepsilon) + (s_{LR} + |(\frac{dx_F}{d\varepsilon})_{qR}| * \cos \varepsilon_R) = 0 \quad (119)$$

Genaugenommen ist ε nun der Einfallswinkel des wahren Windes.

Aus dem Gleichgewicht der Kräfte folgt

$$\tan \varepsilon_R = -\tau * \tan \varepsilon \quad (120)$$

und aus dem Momentengleichgewicht

$$\cos \varepsilon_R = -(\sigma + \cos \varepsilon) \quad (121)$$

mit den Abkürzungen

$$\tau = \frac{(CD_l/CD_q)_R}{CD_l/CD_q}, \quad \sigma = \frac{s_L - s_{LR}}{|(\frac{dx_F}{d\varepsilon})_q|} \quad (122)$$

Man beachte, daß die Beiwerte des Längswiderstands bezüglich der Lateralfläche zu nehmen sind.

Die Bestimmungsgleichung für den Windeinfallswinkel lautet damit

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \tau^2 * \tan^2 \varepsilon}} = -(\sigma + \cos \varepsilon) \quad (123)$$

oder, ausgedrückt durch den Windeinfallswinkel um die Querrichtung, $\varepsilon' = \frac{\pi}{2} - \varepsilon$,

$$\frac{\tan \varepsilon'}{\sqrt{\tau^2 + \tan^2 \varepsilon'}} = -(\sigma + \sin \varepsilon') \quad (124)$$

Diese Gleichung läßt sich in der Form

$$\varepsilon' = -\arctan \left[(\sigma + \sin \varepsilon') \sqrt{\tau^2 + \tan^2 \varepsilon'} \right] \quad (125)$$

zügig lösen mit $\varepsilon' = -\sigma * \tau$ als Anfangswert und dem Mittel aus vorheriger und neuer Lösung als verbesserten Wert. Der Driftwinkel ist nach (120)

$$\varepsilon'_R = \arctan\left(\frac{\tan \varepsilon'}{\tau}\right) \quad (126)$$

Der Windeinfallswinkel ε' ist in Bild 60 über der horizontalen Distanz der Lateralschwerpunkte über und unter Wasser aufgetragen.

Für die Driftgeschwindigkeit erhält man aus (117) und (118) gegenüber dem Wert bei Querdrift

$$\frac{v}{v_q} = \left(\cos^2 \varepsilon' + \frac{\sin^2 \varepsilon'}{\tau^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (127)$$

Für übliche Schiffsformen können die Winkel von Windeinfall und Drift und der Driftwinkel gegenüber dem Wind sowie die Driftgeschwindigkeit grob angenähert werden durch

$$\varepsilon' [\text{rad}] \simeq 0.9 \sigma * \tau = 5.0 \frac{(CD_l/CD_q)_R}{CD_l/CD_q} * \frac{s_L - s_{LR}}{L_{oa}} \quad (128)$$

$$\varepsilon'_R [\text{rad}] \simeq -\frac{\varepsilon'}{\tau} = -5.0 \frac{s_L - s_{LR}}{L_{oa}} \quad (129)$$

$$|\Delta\varepsilon_{\text{Drift}}| \simeq |\varepsilon'| * (1 - \tau) = 5.0 \left| \frac{s_L - s_{LR}}{L_{oa}} \right| * \left(1 - \frac{(CD_l/CD_q)_R}{CD_l/CD_q} \right) \quad (130)$$

$$\frac{v}{v_q} \simeq \left(1 + \left(\frac{\varepsilon'}{\tau} \right)^2 \right)^{\frac{1}{4}} = \left(1 + 25.0 \left(\frac{s_L - s_{LR}}{L_{oa}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (131)$$

Gleichung (128) entspricht dem Anfangswert zur Lösung von (125). Es wurde (45) verwendet. Gleichung (131) folgt dann aus (127).

Beispiel: Driftgeschwindigkeit und Driftwinkel des Offshoreversorgers SUP0101BN. Es ist $\alpha_v = 0.048$, $\tau = 0.135$ und, mit $(s_L - s_{LR})/L_{oa} = 0.130$, $\sigma = 0.722$. Der Winkel des Windeinfalls zur Querrichtung ist $\varepsilon' = -6.0$ Grad (-5.0 Grad), der Driftwinkel beträgt $\varepsilon'_R = 38.0$ Grad (37.2 Grad), so daß $|\Delta\varepsilon_{\text{Drift}}| = 32.0$ Grad (32.2 Grad). Gegenüber Querdrift erhält man $\frac{v}{v_q} = 1.12$ (1.09). In Klammern hinzugefügt sind die Werte aus den Näherungsformeln (128) bis (131). Das Schiff driftet mit 5 % der Windgeschwindigkeit.

Um ein Schiff auf Position und Kurs zu halten, ist der Ausgleich von sowohl Windkraft als auch Windgiermoment erforderlich. Das geschieht durch Schub vorn und achtern. Der Längsschub gleicht die Längskraft des Windes aus. Bezeichnen V_y und H_y im Abstand x_V bzw. x_H von Hauptspant (positiv vor Hauptspant) die Schubkräfte quer zum Schiff (siehe Bild 55), so muß sein

$$V_y + H_y = -Y, \quad x_V * V_y + x_H * H_x = -N \quad (132)$$

Daraus folgt

$$V_y = -\frac{N - x_H * Y}{x_V - x_H}, \quad H_y = \frac{N - x_V * Y}{x_V - x_H} \quad (133)$$

oder mit (6) und bezogen auf Staudruck des Windes und Lateralfäche

$$\frac{V_y}{\frac{\rho}{2} u_W^2 * A_L} = -CY \frac{x_F - x_H}{\Delta x}, \quad \frac{H_y}{\frac{\rho}{2} u_W^2 * A_L} = CY \frac{x_F - x_V}{\Delta x} \quad (134)$$

wobei abkürzend geschrieben wurde

$$\Delta x = x_V - x_H \quad (135)$$

Um Anhaltswerte für den Mindestschub zur Kompensation der Windwirkung zu gewinnen, wird wieder Windlast nach (114) und (115) angenommen. Man erhält

$$\frac{V_y}{\frac{\rho}{2} u_W^2 * A_L} = -C D_q * \sin \varepsilon \frac{0.18 \cos \varepsilon + \frac{\Delta x_H}{L_{oa}}}{\frac{\Delta x}{L_{oa}}} \quad (136)$$

$$\frac{H_y}{\frac{\rho}{2} u_W^2 * A_L} = C D_q * \sin \varepsilon \frac{0.18 \cos \varepsilon + \frac{\Delta x_V}{L_{oa}}}{\frac{\Delta x}{L_{oa}}} \quad (137)$$

mit den Abkürzungen

$$\Delta x_V = s_L - x_V, \quad \Delta x_H = s_L - x_H \quad (138)$$

Maximaler Querschub vorn ist nötig bei Windeinfall von

$$\varepsilon_{|V_y|_{max}} = \arccos \left[1.389 \left(-\frac{\Delta x_H}{L_{oa}} + \sqrt{\left(\frac{\Delta x_H}{L_{oa}}\right)^2 + 0.259} \right) \right] \quad (139)$$

und achtern bei Windeinfall von

$$\varepsilon_{|H_y|_{max}} = \arccos \left[1.389 \left(-\frac{\Delta x_V}{L_{oa}} - \sqrt{\left(\frac{\Delta x_V}{L_{oa}}\right)^2 + 0.259} \right) \right] \quad (140)$$

Dieser Mindestschub, den das Positionieren eines Schiffs unter den vereinfachten Annahmen zur Windlast erfordert, ist in Bild 61 aufgetragen und mit den Schubwerten für verschiedene Schiffe (Stern für V_y und Dreieck für H_y) verglichen worden. Das Maximum des Querschubs vorn tritt auf bei vorlichem Wind und das Maximum des Querschubs achtern bei achterlichem Wind.

Nur mit Querschub vorn läßt sich ein Schiff im Wind stützen oder durch den Wind drehen. Im allgemeinen wird das Schiff dabei verdriften. Bei gleichzeitiger Kompensation der Windlängskraft driftet es quer.

Aus dem Gleichgewicht von Seitenkraft und Giermoment, bei Kompensation der Windlängskraft,

$$Y + Y_R + V_y = 0, \quad N + N_R + x_V * V_y = 0 \quad (141)$$

folgt

$$V_y = \frac{N - s_{LR} * Y}{s_{LR} - x_V} \quad (142)$$

mit s_{LR} Lage des Lateralschwerpunkts unter Wasser gegenüber Hauptspant (positiv vor Hauptspant). Mit (6) und bezogen auf Staudruck des Windes (d.h. unter Vernachlässigung der Drift) und Lateralfläche wird daraus

$$\frac{V_y}{\frac{\rho}{2} u_W^2 * A_L} = C Y \frac{x_F - s_{LR}}{\Delta x_R} \quad (143)$$

wobei abkürzend geschrieben wurde

$$\Delta x_R = s_{LR} - x_V \quad (144)$$

Es werden wieder die Lastfunktionen (114) und (115) angenommen. Man erhält

$$\frac{V_y}{\frac{\rho}{2} u_W^2 * A_L} = C D_q * \sin \varepsilon \frac{0.18 \cos \varepsilon + \frac{\Delta s}{L_{oa}}}{\frac{\Delta x_R}{L_{oa}}} \quad (145)$$

mit der Abkürzung

$$\Delta s = s_L - s_{LR} \quad (146)$$

Extremwerte des Querschubs treten auf bei Winkeln des Windeinfalls von

$$\varepsilon_{V_y \text{ Extremum}} = \arccos \left[1.389 \left(-\frac{\Delta s}{L_{oa}} + \sqrt{\left(\frac{\Delta s}{L_{oa}}\right)^2 + 0.259} \right) \right] \quad (147)$$

Bild 61 zeigt den Vergleich mit den Schubwerten für verschiedene Schiffe (Kreise). Das Maximum des Querschubs kann sowohl bei vorlichem als auch bei achterlichem Wind auftreten. In der Praxis wird Stützen meist Halten gegen vorlichen Wind bedeuten, wie Drehen durch den Wind 'Wenden' und selten 'Halsen' ist.

Mindestschub und Querkraftparameter sind miteinander korreliert. In Bild 62 ist aufgetragen das Verhältnis von gefordertem Querschub zum Wert aus dem einfachen Rechenmodell. Für Positionieren (a) ist $|KK| = 0.63$ (> 0.259 bei 58 Aufpunkten im zweiseitigen Test und 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit) und für Stützen (b) $|KK| = 0.52$ (> 0.355 bei 31 Aufpunkten im zweiseitigen Test und 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit). Es ist

$$f(\delta) \simeq \left\{ \begin{array}{ll} 0.75(1.00 \pm 0.15) + 0.50 \delta & \text{für Positionieren} \\ 0.75(1.00 \pm 0.24) + 0.50 \delta & \text{für Stützen} \end{array} \right\} \quad (148)$$

Der Querkraftparameter läßt sich durch (41) ersetzen mit $k_\delta = 1.0$.

Man kann das Ergebnis nutzen zum Überschlagen des Schubbedarfs. Angenähert gilt für Positionieren im Wind (Querschub vorn und achtern)

$$\frac{|V_y|_{max}}{\frac{\rho}{2} u_W^2 * A_L} = C D_q \frac{0.06 + 0.92 \frac{|s_L - x_H|}{L_{oa}}}{\frac{x_V - x_H}{L_{oa}}} * f(\delta), \quad \frac{|H_y|_{max}}{\frac{\rho}{2} u_W^2 * A_L} = C D_q \frac{0.06 + 0.92 \frac{|s_L - x_V|}{L_{oa}}}{\frac{x_V - x_H}{L_{oa}}} * f(\delta) \quad (149)$$

und für Stützen (Querschub nur vorn)

$$\frac{|V_y|_{max}}{\frac{\rho}{2} u_W^2 * A_L} = C D_q \frac{0.09 + 0.82 \frac{|s_L - s_{LR}|}{L_{oa}}}{\frac{x_V - s_{LR}}{L_{oa}}} * f(\delta) \quad (150)$$

In rund zwei Dritteln aller Fälle liegt der Schub innerhalb der mit $f(\delta)$ gegebenen Grenzen. Man beachte, daß der Abstand des achterlichen Strahlapparats von Hauptspant negativ zu nehmen ist. Das Mittel plus zweifache Streuung wird nur in 2.3 % der Fälle überschritten. Es ist dann $f(\delta) = 1.0 + 0.5 \delta$ für Positionieren und $f(\delta) = 1.1 + 0.5 \delta$ für Stützen. Oder anders ausgedrückt, im Mittel in einem von 44 Fällen einer entsprechenden Dimensionierung würde der Schub des Strahlapparats zum Ausgleich des Windeinflusses nicht reichen.

Beispiel: Allgemein wird gefordert, daß Forschungsschiffe sich noch bei Windstärke 8 Bft, entsprechend $u_W = 19.0$ m/s, und Seegang allein mit dem Bugstrahlapparat durch den

Wind drehen lassen. Was das für ein kleineres Schiff bedeutet, soll am Forschungsschiff **RES0201BN** untersucht werden. Das Schiff hat eine Pump-Jet-Anlage 14.5 m vor Hauptspant (siehe Generalplan in Bild 29). Es ist 55.0 m lang und hat eine Lateralfläche von 434.8 m². Der Lateralschwerpunkt über Wasser liegt 1.5 m und unter Wasser 0.2 m vor Hauptspant. Der Beiwert des Querwiderstands ist 0.85. Mit den Windlastbeiwerten aus dem Modellversuch sind 45.7 kN Querschub nötig, um das Schiff im Wind zu stützen. Gleichung (150) (mit $\delta = 0.60$ gemäß früherem Beispiel) ergibt 40.5 kN (Mittel) \pm 6.9 kN (Streuung) und als oberen Wert 40.5 kN (Mittel) + 13.8 kN (zweifache Streuung) = 54.3 kN. Die Pump-Jet-Anlage ist als Azimutstrahler ausgelegt. Eine einfachere Lösung ist der Querstrahlapparat. Beide Möglichkeiten wurden untersucht. Berechnet wurde der Schub, der zur Überwindung allein des Windeinflusses nötig ist. Bild 63 zeigt, aufgetragen über dem Anströmwinkel, Horizontalschub des Azimutstrahlers, bezogen auf Staudruck des Windes und Lateralfläche des Schiffs, sowie Geschwindigkeit der Querdrift (a) und Schub des Querstrahlers sowie Driftgeschwindigkeit und Driftwinkel des Schiffs (b). Bei starkem Wind und entsprechendem Seegang wird man mit dem Bug durch den Wind gehen und nicht mit dem Heck. Insofern ist der Bereich achterlichen Windes weniger wichtig.

15 Anwendungsfall

Das Offshore-Versorgungsschiff in Bild 64 zum Transport von Rohren (Röhrentransporter) wird dynamisch positioniert. Dazu dienen neben dem Doppelschraubenantrieb je zwei Querstrahlapparate vorn und achtern im mittleren Abstand von 29.5 m von Hauptspant. Zu berechnen ist der erforderliche Mindestschub, um das Schiff bei Sturm (9 Bft) an einer Plattform auf Position zu halten.

Hauptabmessungen

Die Hauptabmessungen des Schiffs sind Länge über alles $L_{oa} = 78.85 \text{ m}$, Länge zwischen den Loten $L_{pp} = 70.80 \text{ m}$, Breite in der Wasserlinie $B_{WL} = 15.20 \text{ m}$, Konstruktionstiefgang $T = 5.70 \text{ m}$.

Lateral- und Frontplandaten

Die Lateralfläche beträgt $A_L = 419.60 \text{ m}^2$ und die Frontschattenfläche $A_F = 174.20 \text{ m}^2$. Der Schwerpunkt der Lateralfläche liegt $s_L = 7.80 \text{ m}$ vor Hauptspant und $s_H = 3.81 \text{ m}$ über der Schwimmwasserlinie. Die mittlere Höhe des Lateralplans beträgt $H_M = 5.32 \text{ m}$.

Windlastparameter

Aus Tabelle 4 gewinnt man die folgenden Windlastparameter:

	vorlicher Wind	achterlicher Wind	
CD_q		0.90	Querwiderstand
CD_{lAF}	0.55	0.80	Längswiderstand
δ	0.55	0.55	Querkraftparameter
κ		1.20	Rollmomentenfaktor

Windlastbeiwerte

Die Berechnung der Windlast erfolgt nach (61) und (67). Da es um Maximalwerte geht,

Tabelle 8: Böenfaktoren des Windes über See

Mittelungsintervall t	Böenfaktor $b_f(t, T)$ für $T=1$ h
3 s	1.37
5 s	1.34
10 s	1.30
15 s	1.27
20 s	1.25
30 s	1.23
1 min	1.17
10 min	1.04
1 h	1.00
1 h	0.96
6 h	0.93
12 h	0.87
24 h	0.80

erübrigt sich eine Verfeinerung zur näheren Berücksichtigung der Längsunsymmetrie des Schiffs. Die Windlastbeiwerte sind in Bild 65 aufgetragen.

Windgeschwindigkeit und Böenfaktor

Das Schiff liege auf der Luvseite der Plattform. Die anzunehmende Windgeschwindigkeit ist die maximale mittlere Geschwindigkeit in einer Bö von drei Sekunden Dauer. Diese Bemessungsgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit vom Mittelungsintervall durch einen Böenfaktor erfaßt,

$$u_{B\delta 10} = b_f(t, T) * u_{10} \quad (151)$$

wobei t das Mittelungsintervall und T das Bezugsintervall des Mittelwindes ist. Tabelle 8 gibt Zahlenwerte für die Windverhältnisse über See [28]. Das Bezugsintervall ist $T=1$ h. Für $t < T$ ergibt $b_f(t, T)$ das maximale Mittel über t , bezogen auf das Mittel über T , und für $t > T$ das Mittel über t , bezogen auf das maximale Mittel über T während der Dauer t eines Sturmes.

Die Geschwindigkeit des Mittelwindes (Basisgeschwindigkeit) beträgt nach (92) $u_W = 22.6$ m/s. Mit dem Böenfaktor $b_f(3 \text{ Sekunden}, 1 \text{ h}) = 1.37$ aus Tabelle 8 erhält man als Bemessungsgeschwindigkeit 31.0 m/s. Die Bö erfasse das ganze Schiff; die Böengeschwindigkeit wird als konstant über die Höhe des Schiffs angenommen. Die Windkräfte und Windmomente am Schiff für diese Geschwindigkeit gibt Tabelle 9.

Maximaler Querschub

Man kann nicht davon ausgehen, daß der Röhrentransporter beim Löschen an der Plattform günstig zum Wind liegt. Alle Windeinfallswinkel sind möglich. Bild 66 zeigt den Schub zum Positionieren des Schiffs, bezogen auf Staudruck des Windes und Lateralfäche. Die Windlängskraft wird vom Hauptantrieb kompensiert. Der bezogene maximale Querschub vorn ist $V_{y \max}/(q * A_L) = 0.70$ bei 55 Grad vorlichem Wind und der bezogene maximale Querschub achtern $H_{y \max}/(q * A_L) = 0.45$ bei 125 Grad achterlichem Wind. Die überschlägliche Rechnung nach (149) ergibt $V_{y \max}/(q * A_L) = 0.679 \pm 0.074$ und $H_{y \max}/(q * A_L) = 0.428 \pm 0.047$. Mit $q * A_L = \frac{\rho}{2} u_{B\delta 10}^2 * A_L = \frac{1.25}{2} \text{ kg/m}^3 * 31^2 (\text{m/s})^2 * 419.60 \text{ m}^2$

Tabelle 9: Röhrentransporter – Windlast in einer Bö, $u_{B\ddot{o}10} = 31.0 \text{ m/s}$

ϵ	Längskraft	Seitenkraft	Giermoment
Grad	kN	kN	kN*m
0.0	-58	0	0
10.0	-58	40	1110
20.0	-59	85	2130
30.0	-59	134	3040
40.0	-55	182	3670
50.0	-46	217	3840
60.0	-34	232	3540
70.0	-22	233	2970
80.0	-10	229	2350
90.0	0	227	1770
100.0	15	228	1210
110.0	31	230	650
120.0	48	226	80
130.0	65	209	-440
140.0	77	175	-810
150.0	83	130	-920
160.0	85	84	-800
170.0	84	40	-480
180.0	84	0	0

= 252.0 kN beträgt der Querschub vorn $V_{y\max}=176.4 \text{ kN}$ und achtern $H_{y\max}=113.4 \text{ kN}$. Dimensionierung nach der überschläglichen Rechnung mit Mittelwert plus zweifacher Streuung ergibt vorn 208 kN und achtern 132 kN.

16 Schluß

Die Luftströmung an Schiffen ist mit den klassischen Methoden der Hydrodynamik nicht zu berechnen. Damit entziehen sich die Windkräfte und Windmomente der mathematischen Erfassung. Auch für numerische Berechnungsverfahren sind die Schiffe über Wasser im allgemeinen zu kompliziert. Erschwerend kommt hinzu die Vielfalt der Formen sowie möglicher Decksladung und Containerstapelung. Die Luftströmung wird von Einzelheiten des Schiffs beeinflusst, aber nicht beherrscht. All das sind Eigenschaften, wie sie für Ereignisse typisch sind, die vom Zufall abhängen. Die Windlast an Schiffen kann als statistische Größe aufgefaßt werden.

Als Analyseverfahren dafür eignen sich Regression und Korrelation. Es zeigt sich, daß die Windlast an Schiffen sich mit wenigen Parametern erfassen läßt. Wenn es auf Feinheiten nicht ankommt, reichen vier leicht zu schätzende Werte: die Beiwerte von Längs- und Querwiderstand und je ein Parameter der Querkraft und des Rollmoments. Zahlenwerte für verschiedene Schiffstypen sind angegeben. Halbempirische Lastfunktionen liefern dann die Kräfte und Momente abhängig vom Anströmwinkel. Sie gelten ohne Einschränkung auch für Sonderfälle wie das Schiff im Windschutz und das Schiff mit Schlagseite. Ausgeprägte Eigenheiten kennzeichnen vor allem die empfindliche Windlängskraft. Deren Wiedergabe läßt sich durch Erweiterung der Lastfunktionen erreichen.

17 Bezeichnungen

A_F	Frontschattenfläche
A_L	Lateralfläche
A_S	projizierte Fläche quer zum Wind
a	Ablenkparameter
\bar{a}	gemittelter Ablenkparameter
B	Breite, Breite in der Wasserlinie
C	Querkraft
CC	Querkraftbeiwert
$ CC _{max}$	Beiwert des Querkraftmaximums
CD	Widerstandsbeiwert
CK	Rollmomentenbeiwert
CD_l	Beiwert des Längswiderstands
CD_{lAF}	Beiwert des Längswiderstands bezüglich Frontschattenfläche
CN	Giermomentenbeiwert
ΔCN	Giermomentenbeiwert um die Momentenachse bei Querströmung
CD_q	Beiwert des Querwiderstands
CT	Beiwert der resultierenden horizontalen Windkraft
CX	Längskraftbeiwert bezüglich A_L
CX_{AF}	Längskraftbeiwert bezüglich A_F
CX_{AS}	Längskraftbeiwert bezüglich A_S
CY	Seitenkraftbeiwert
D	Widerstand
H_M	mittlere Höhe der Lateralfläche
K	Rollmoment um die Schwimmwasserlinie
k_δ	Koeffizient im Zusammenhang mit δ
KK	Korrelationskoeffizient
L	Länge
L_{oa}	Länge über alles
L_{pp}	Länge zwischen den Loten
N	Giermoment um Hauptspant
ΔN	Giermoment um die Momentenachse bei Querströmung
q	Staudruck
q_h	Staudruck in der Bezugshöhe h
\bar{q}_H	mittlerer Staudruck über H_M
s_H	Höhe des Lateralschwerpunkts über der Schwimmwasserlinie
s_L	horizontaler Abstand des Lateralschwerpunkts von Hauptspant
T	resultierende horizontale Windkraft
\bar{T}	mittlerer Tiefgang
u	Geschwindigkeit, Geschwindigkeit des scheinbaren Windes
u_W	Windgeschwindigkeit
u_{10}	Geschwindigkeit des Mittelwindes in 10 m Höhe
v	Driftgeschwindigkeit
v_S	Schiffsgeschwindigkeit
X	Längskraft
x_F	Hebel des Giermoments um Hauptspant
x_{Fq}	Hebel des Giermoments bei Querströmung

Δx_F	Hebel des Giermoments um die Momentenachse bei Querströmung
Δx_{Fl}	Grenzhebel des Giermoments bei Längsströmung
Y	Seitenkraft
z_F	Hebel des Rollmoments um die Schwimmlinie
z_{Fq}	Hebel des Rollmoments bei Querströmung
α	Deflektionskoeffizient
β	Einfallswinkel des wahren Windes
γ	Giermomentenparameter
δ	Querkraftparameter
ε	Anströmwinkel, Einfallswinkel des scheinbaren Windes
$\Delta\varepsilon$	Ablenkwinkel
$\Delta\varepsilon_{max}$	maximaler Ablenkwinkel
κ	Rollmomentenfaktor
ρ	Dichte

Kürzel:

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

18 Literatur

Literatur

- [1] AAGE, C. 1971. 'Wind coefficients for nine ship models'. Bericht Nr. A-3, Hydro- and Aerodynamic Laboratory, Lyngby, Dänemark, 14 S.
- [2] ARNTZ, W., D. HAHN, J. HILBERS, G. HENSCHEL, J. D. MEHRKENS und G. WENDLAND. 1990. 'Super-Fäherschiff OLAU HOLLANDIA von der Schichau Seebeckwerft'. Schiff und Hafen, Kommandobrücke 42, Heft 1: 22-33.
- [3] BILES, H.J.R. 1927. 'Notes on the effect of wind on power and speed'. Transactions of the Institution of Naval Architects, 69: 164-173.
- [4] BLENDERMANN, W. 1977. 'Beurteilung des Verhaltens einer Driftstation für Folientankexperimente aufgrund von Windkanalversuchen'. Berichte aus dem Sonderforschungsbereich 'Meeresforschung' – SFB94 – Universität Hamburg, Heft 12: 36 S.
- [5] BLENDERMANN, W. 1985. 'Kennzeichnende Parameter für die Windkräfte an Offshore-Versorgungsschiffen'. Bericht Nr. 166/1985, Forschungszentrum des Deutschen Schiffbaus, Hamburg, 104 S.
- [6] BLENDERMANN, W. 1986. 'Die Windkräfte am Schiff'. Bericht Nr. 467, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 79 S.
- [7] BLENDERMANN, W. 1988. 'Zu den Kräften am schräg umströmten länglichen Objekt mit vollständiger Ablösung'. Schiffstechnik, 35: 81-100.
- [8] BLENDERMANN, W. 1988. 'Die Windkräfte am Schiff und ihre Erfassung'. Kolloquium 88, Vorträge im Sommersemester 1988, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg: 32-57.
- [9] BLENDERMANN, W. 1990. 'Wind effects on a research vessel'. Proceedings, Interoceanology 90, Szczecin, PL: 41-57.
- [10] BLENDERMANN, W. 1990. 'External forces, wind forces'. Schiff und Hafen/Seewirtschaft 42, Heft 2: 41-43, Heft 3: 55-58, Heft 4: 47-48, und 43 (1991), Heft 4: 39-41. Ferner in: J. Brix (Hrsg.). 1993. 'Manoeuvring technical manual'. Seehafen Verlag, Hamburg: 147-154 und 236-246.
- [11] BLENDERMANN, W. 1992. 'Windlast am Schiff mit Schlagseite – Windkanalmessungen am Modell eines Fährschiffes'. Schiff und Hafen/Seewirtschaft 44, Heft 12: 42-45.
- [12] BÖHME, H., und H. THIEMANN. 1971. 'Windkanalversuche mit dem Überwasserschiffsmodell für ein Tiefsee-Bohrschiff'. Schrift Nr. 2173, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 49 S.
- [13] BÖHME, H., und H. THIEMANN. 1975. 'Ermittlung der Windkräfte an einem Tanker- und drei Containerschiffmodellen'. Bericht Nr. 48/1975, Forschungszentrum des Deutschen Schiffbaus, Hamburg, 86 S.
- [14] BUREAU VERITAS. 1976. 'Offshore platforms'

- [15] DOVE, H.L., und G.S. FERRIS. 1960. 'Development of anchors'. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 102: 535-546.
- [16] FROUDE, W. 1874. 'On experiments with H.M.S. GREYHOUND'. Transactions of the Institution of Naval Architects, 15: 36-73.
- [17] GUTSCHE, F., und G. SCHROEDER. 1965. 'Seitliche Luft- und Wasserkräfte bei Schräganströmung von Fahrgastschiffen und Forschungsfahrzeugen'. Schiffbauforschung, 4:97-125.
- [18] HELMHOLTZ, H. von. 1868. 'Über diskontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen'. Monatsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, April: 215-228.
- [19] HOERNER, S. 1965. 'Fluid dynamic drag'. Selbstverlag, Midland Park, New Jersey, USA, 454 S.
- [20] HOVEN, I. van der. 1957. 'Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour'. Journal of Meteorology, 14: 160-164.
- [21] ISHERWOOD, R.M. 1973. 'Wind resistance of merchant ships'. Transactions of the Royal Institution of naval Architects, 115: 327-338.
- [22] JENS, J. 1965. 'Nationale Stabilitätsvorschriften und Stabilitätsnormen'. Schiff und Hafen, Heft 11 (Nov.): 865-870.
- [23] JOSTEN, F. 1991. 'Schrägschleppversuche am Modell eines Frachtenseglers vom Typ INDOSAIL'. Studienarbeit, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg.
- [24] KINOSHITA, M., und S. OKADA. 1957. 'Heeling moment due to wind pressure on small vessels'. Proceedings, Symposium on the Behaviour of Ships in a Seaway, Wageningen, NL: 527-542.
- [25] KIRCHHOFF, G. 1869. 'Zur Theorie freier Flüssigkeitsstrahlen'. Journal für die Reine und Angewandte Mathematik, 70: 289-298.
- [26] LAMB, H. 1952. 'Hydrodynamics'. Cambridge University Press, London, 738 S.
- [27] MAANEN, W.Ph. van, W. de BOER und J. FROESE. 1987. 'Caland bridge windscreen – A simulator study of the effects of a windscreen on ship manoeuvring' Proceedings MARSIM-87, Fourth International Conference on Marine Simulation, Trondheim, Norwegen: 193-202.
- [28] MILLER, B.L., und M.E. Davies. 1982. 'Wind loading on offshore structures'. Bericht NMIR 136, National Maritime Institute, Feltham, GB, 68 S.
- [29] PANOFSKY, H.A. 1977. 'Wind structure in strong winds below 150 m'. Wind Engineering, 1:91-103.
- [30] RAHOLA, J. 1939. 'The judging of the stability of ships'. Dissertation, Helsinki, Finnland.
- [31] 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.

- [32] SACHS, L. 1972. 'Statistische Auswertungsmethoden'. Springer, Berlin, 545 S.
- [33] SCHLICHTING, H. 1979. 'Boundary-layer theory'. McGraw-Hill, New York, 817 S.
- [34] SCHUCKERT, E., und H. THIEMANN. 1978. 'Windkanalversuche über den Einfluß verschiedener Decksladungen auf die Luftkräfte an einem Containerschiff'. Schrift Nr. 2296, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 103 S.
- [35] SCRUTON, C. 1981. 'An introduction to wind effects on structures'. Oxford University Press, 79 S.
- [36] SEE-BERUFGENOSSENSCHAFT. 1974. 'D3 Richtlinien für Stabilität und Bemessung der zulässigen Fahrgastzahl von Fahrgastschiffen'.
- [37] THIEMANN, H. 1978. 'Windkanalversuche mit Über- und Unterwasserschiffsmodellen von Marinefahrzeugen'. Schrift Nr. 2302, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 58 S.
- [38] TUIJTEL, T. 1985. 'Windscherm bij Calandkanaal'. Weg en Water 2, Heft 6: 16-19.
- [39] WAGNER, B. 1966. 'Windkanalversuche mit dem Modell des Forschungsschiffes METEOR'. Bericht Nr. 153, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 42 S.
- [40] WAGNER, B. 1967. 'Windkräfte an Überwasserschiffen'. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 61: 226-248.
- [41] WENDEL, K. 1958. 'Sicherheit gegen Kentern'. VDI-Zeitschrift, 100: 1523-1533.
- [42] WIEGHARDT, K. 1952. 'Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstands durch Oberflächenrauigkeiten'. Schiffstechnik (1952/1954): 65-81.
- [43] WIEGHARDT, K. 1972. 'Zum Windprofil über See'. Schiffstechnik. 19: 35-37.
- [44] ZURMÜHL, R. 1965. 'Praktische Mathematik'. Springer, Berlin, 561 S.

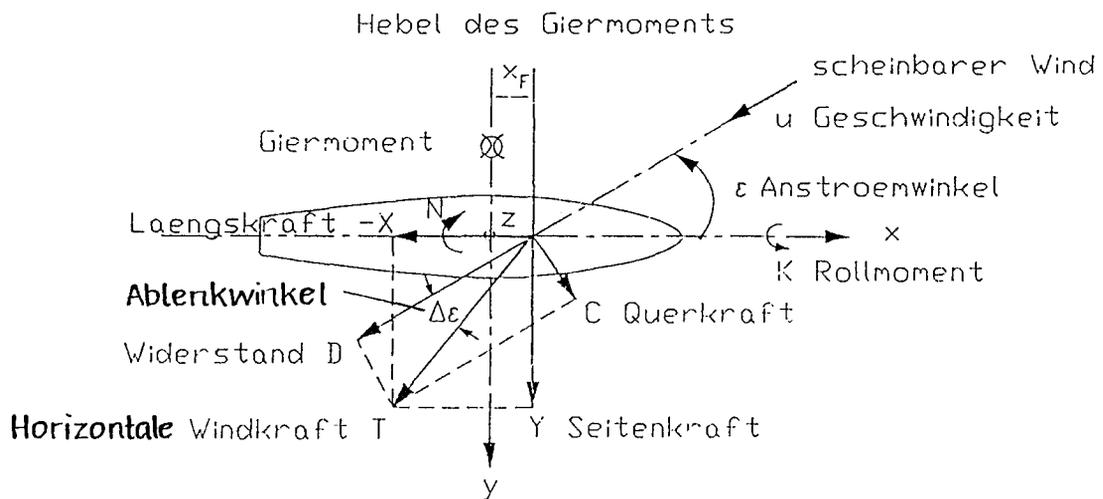


Bild 1: Koordinaten, Windkräfte und Windmomente

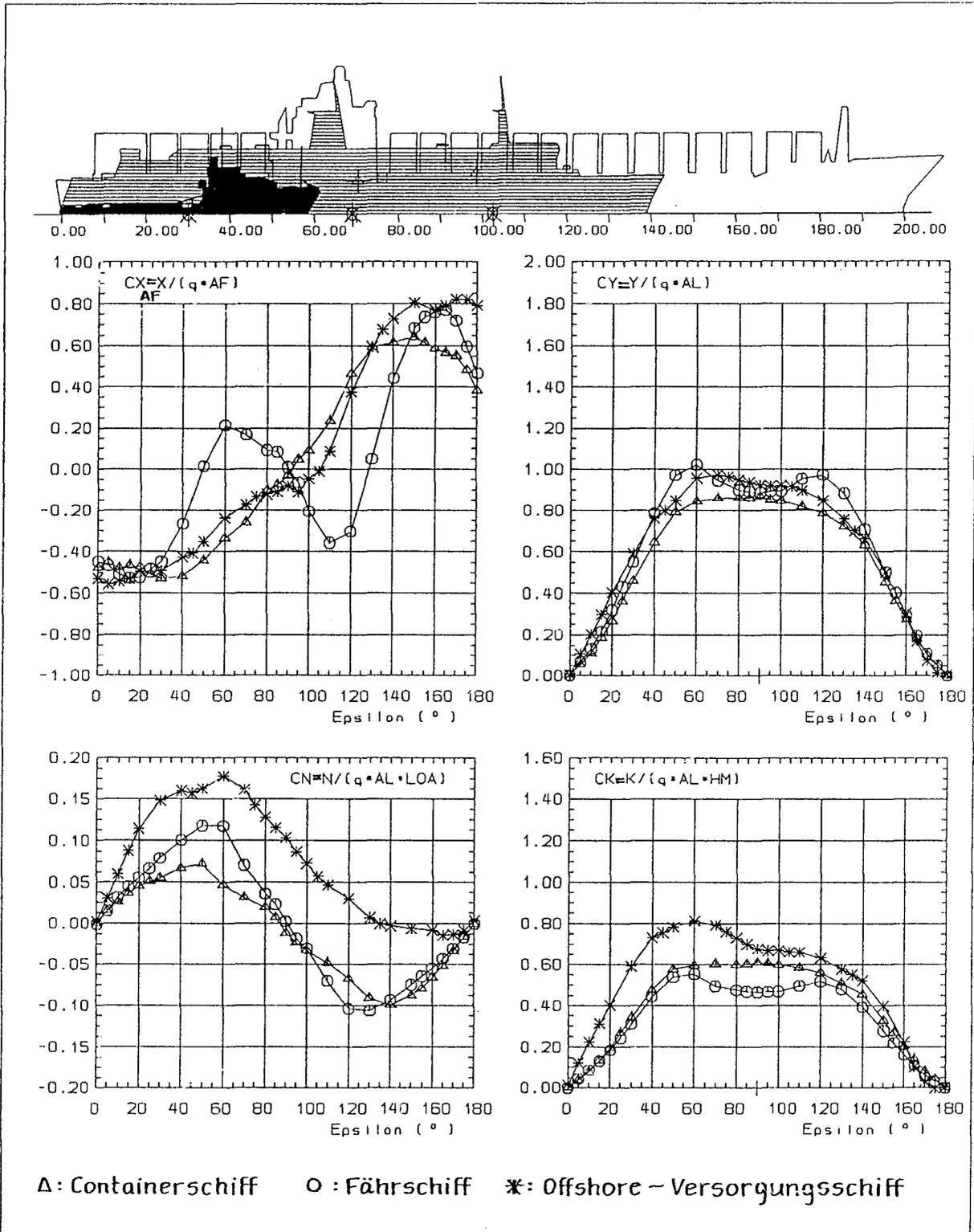


Bild 2: Windlastbeiwerte von einem Containerschiff, einem Fährschiff und einem Offshore-Versorgungsschiff

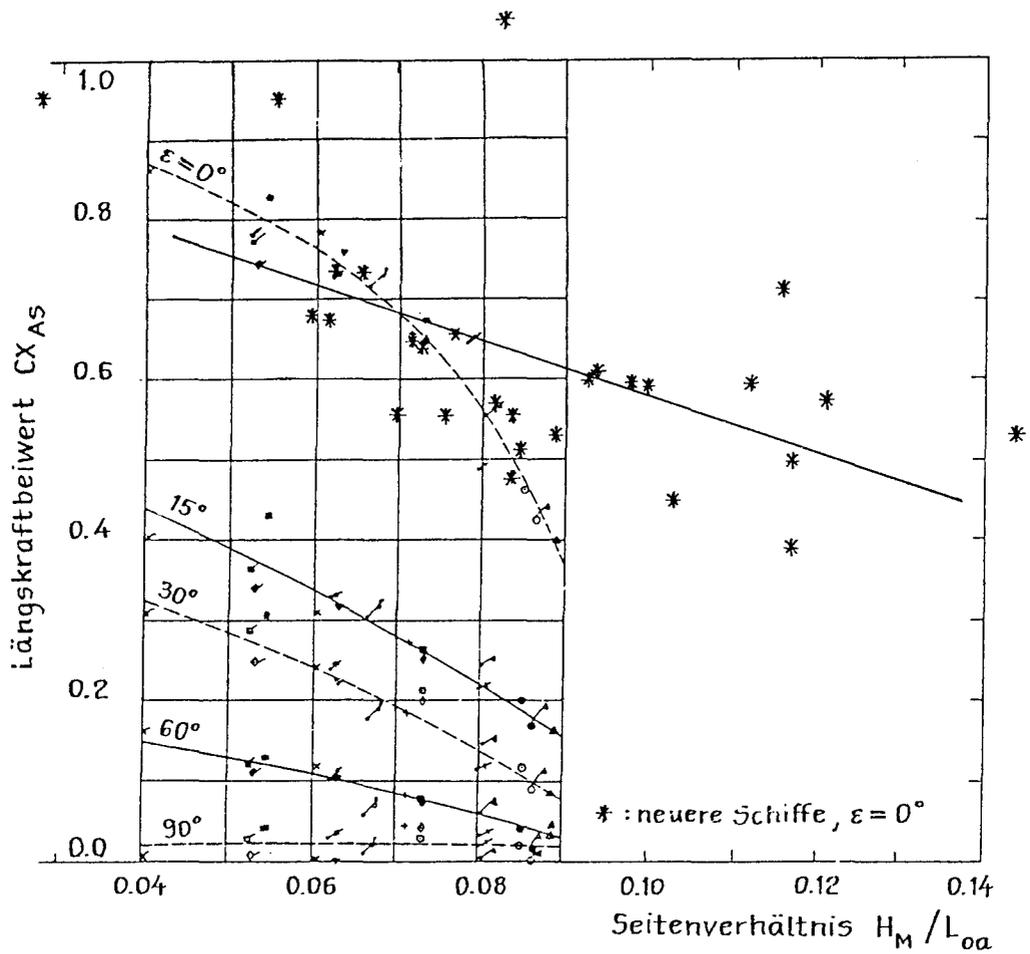


Bild 3: Längskraftbeiwert C_{XAS} über dem Seitenverhältnis H_M/L_{0a} ; Lastdiagramm von Dove und Ferris (1960), ergänzt durch Werte von neueren Schiffen bei Anströmung von vorn

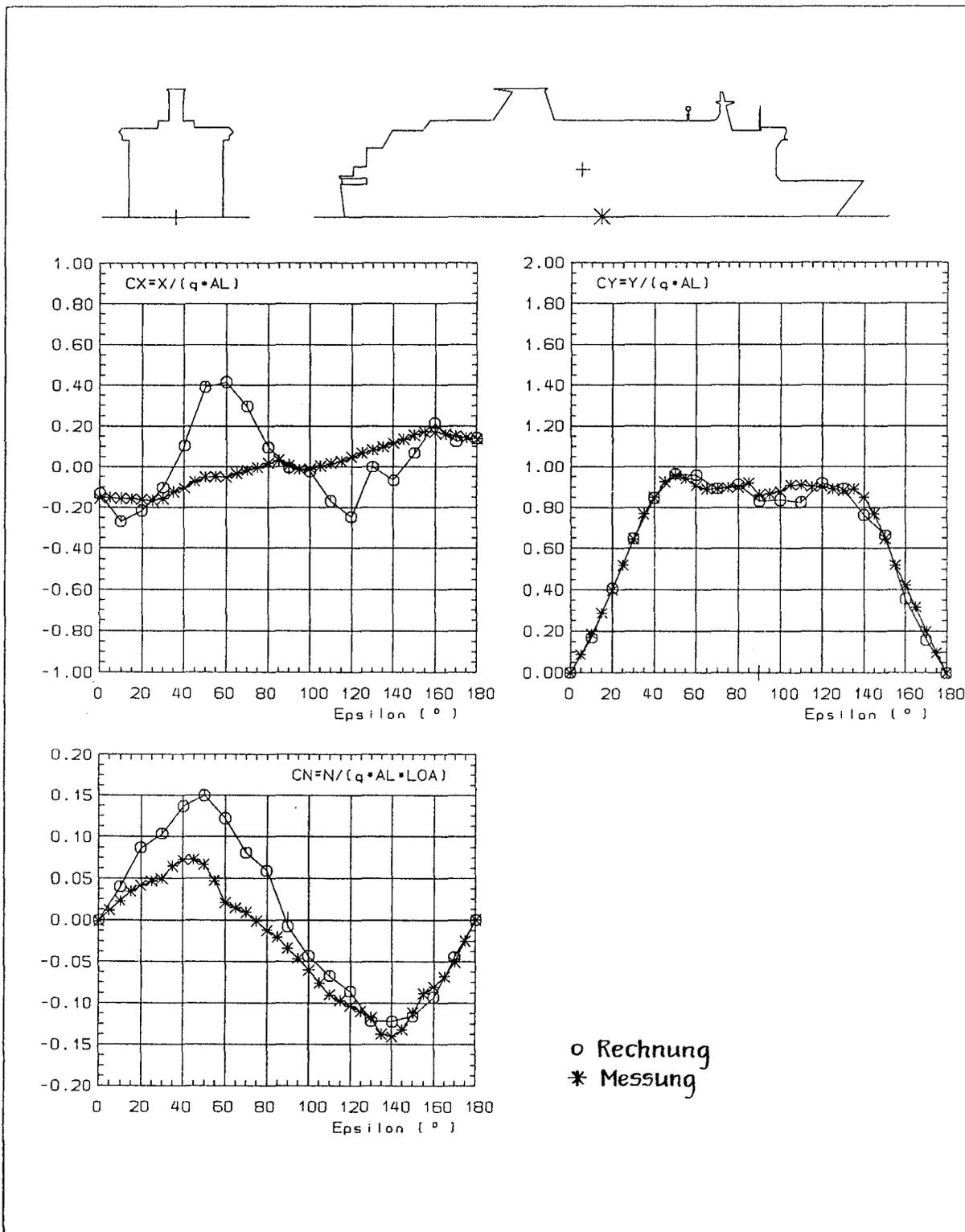


Bild 4: Windlastbeiwerte nach Isherwood [28] für ein Fährschiff im Vergleich mit Meßwerten (FER0301BN)

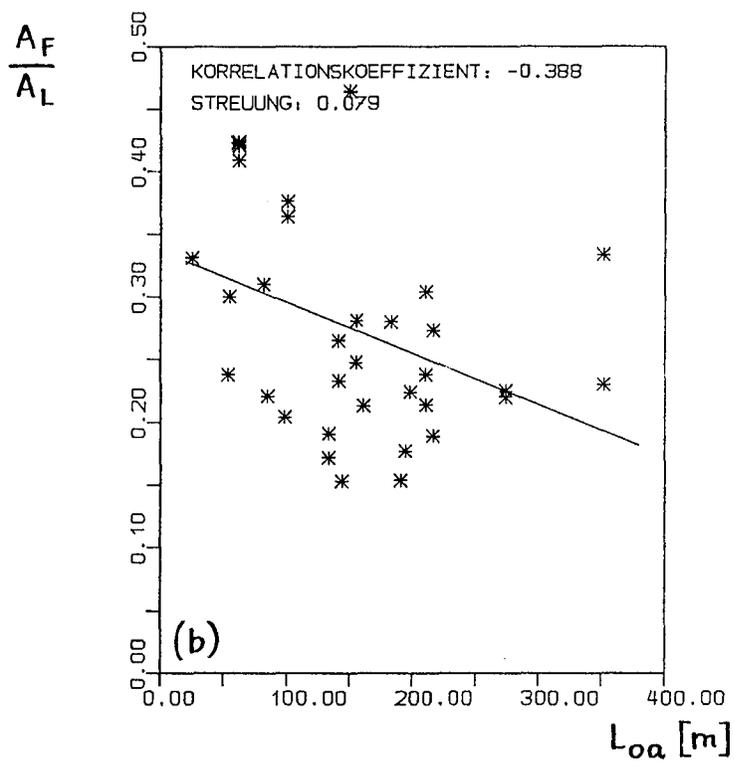
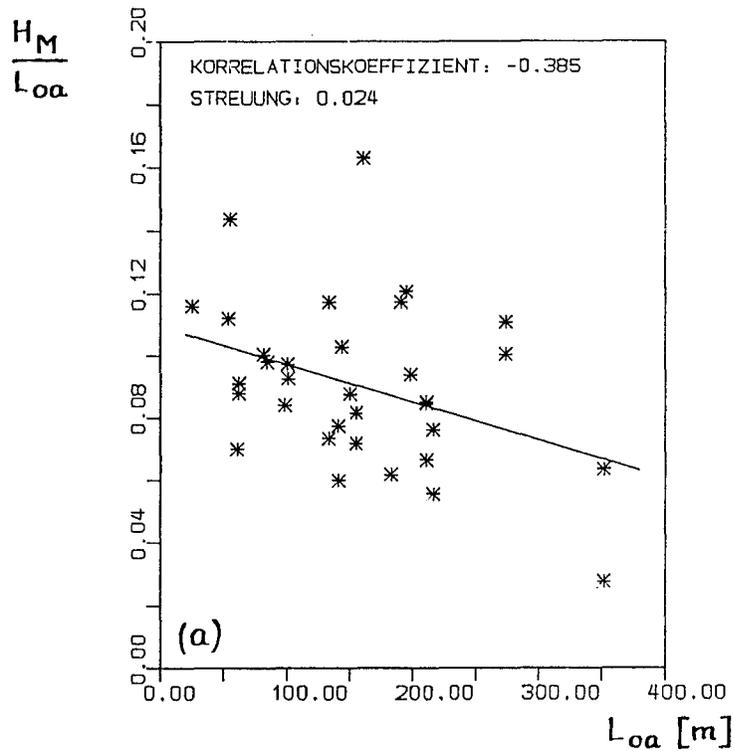


Bild 5: Seitenverhältnis (a) und Frontfläche zu Lateralfäche (b) über der Schiffslänge

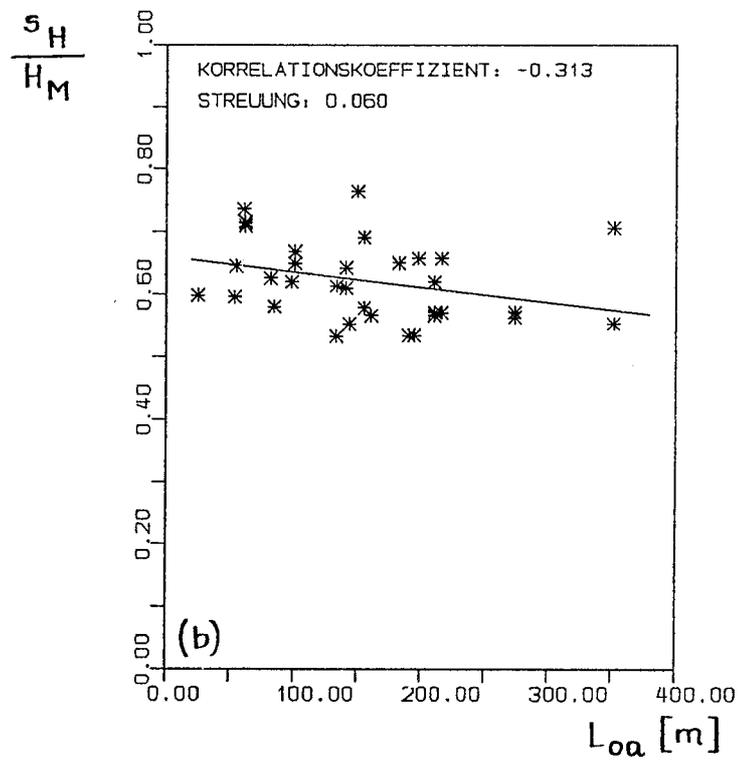
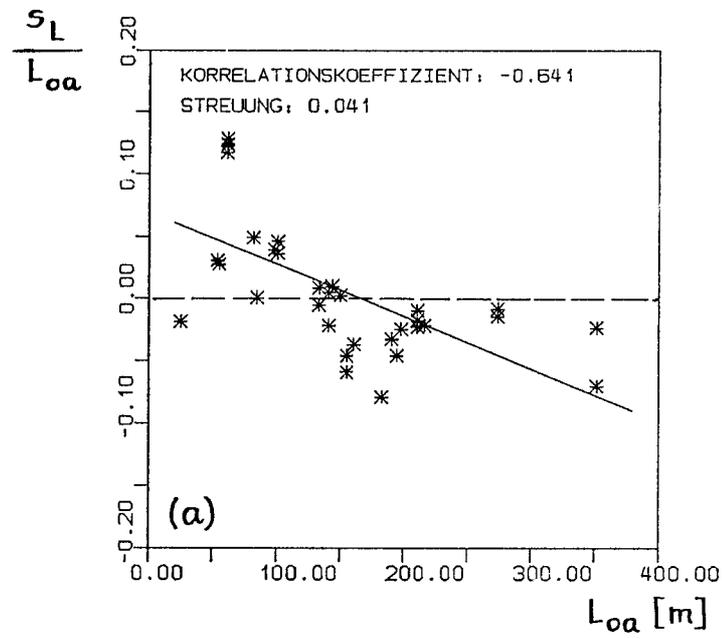


Bild 6: Lateralschwerpunkt der Länge (a) und der Höhe (b) nach über der Schiffslänge

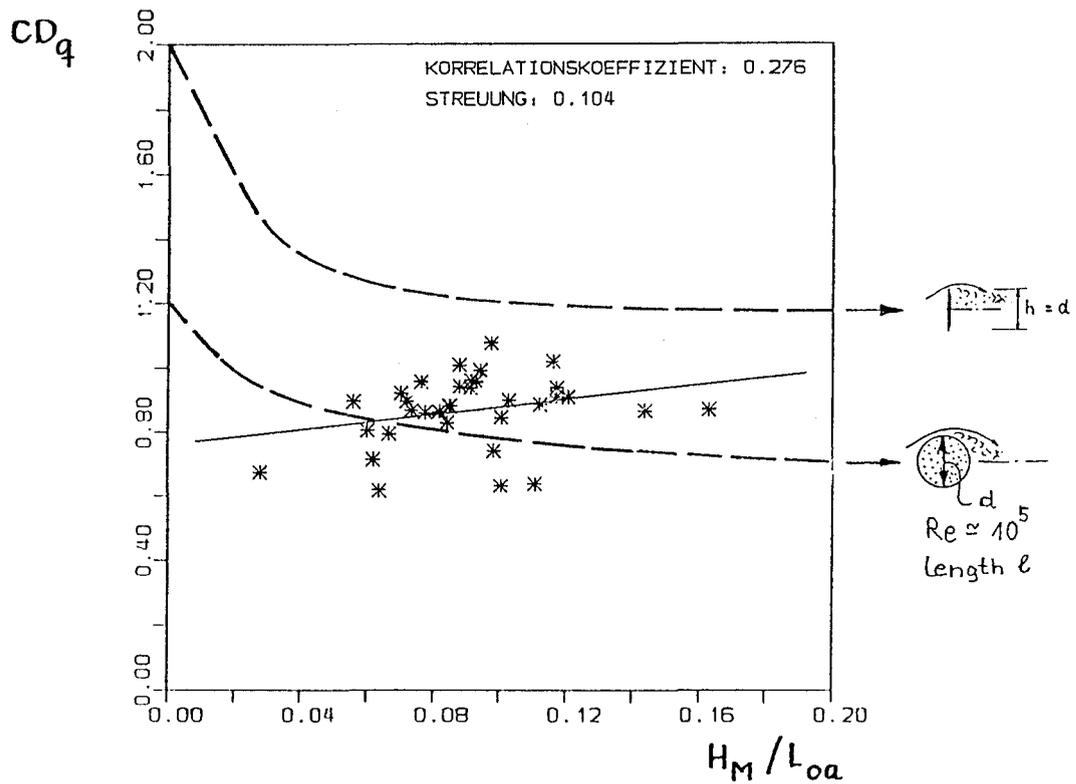


Bild 7: Beiwert des Querwiderstands über dem Seitenverhältnis, Vergleichswerte von Platte und Zylinder

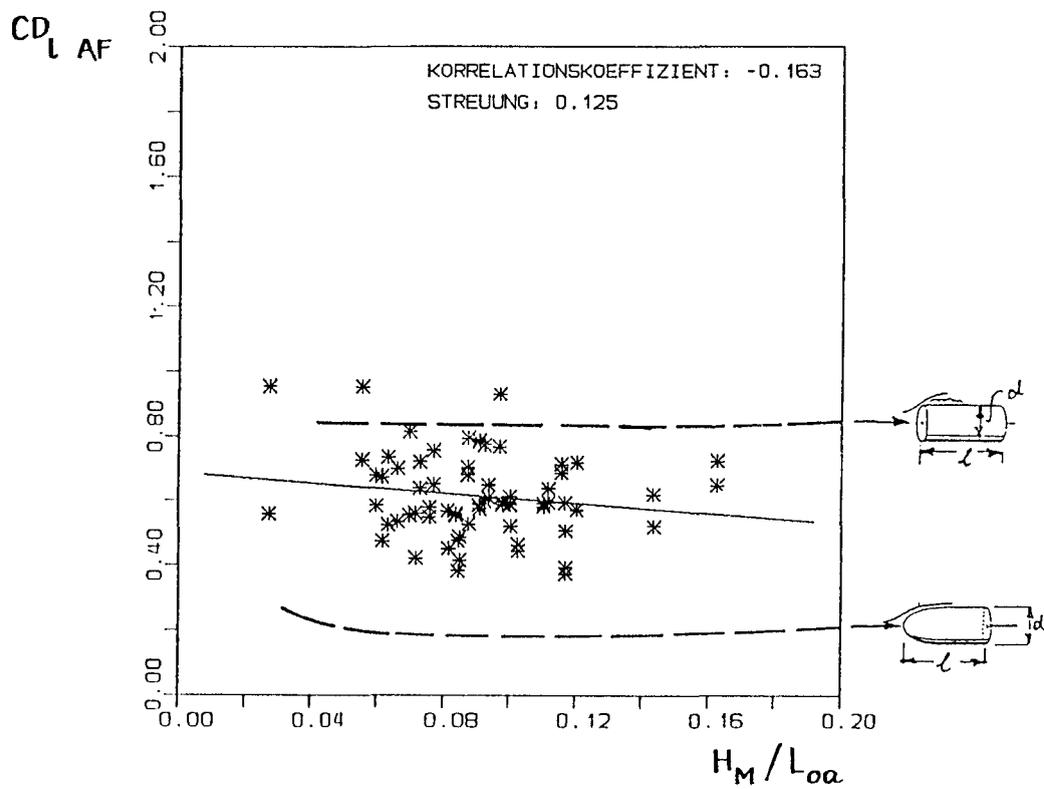


Bild 8: Beiwert des Längswiderstands über dem Seitenverhältnis, Vergleichswerte von Zylindern

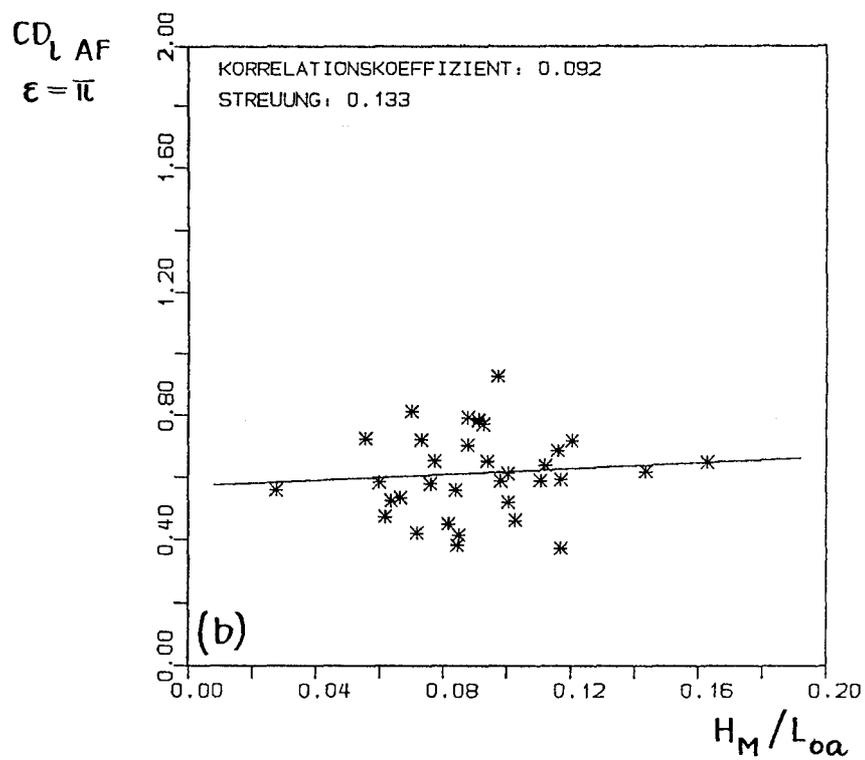
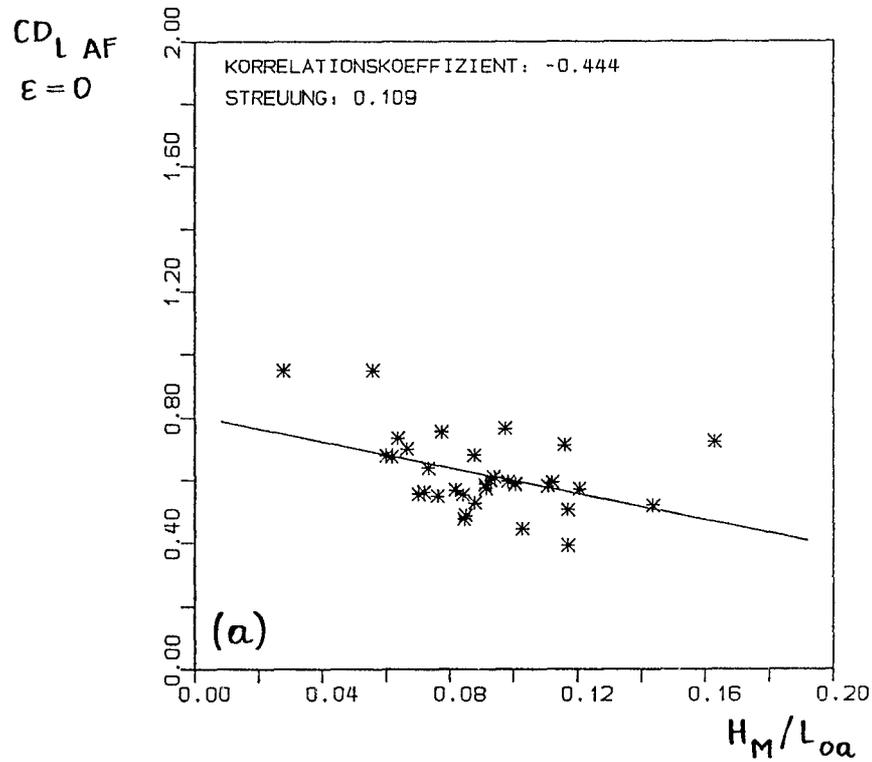


Bild 9: Beiwert des Längswiderstands bei Anströmung von vorn (a) und von achtern (b) über dem Seitenverhältnis

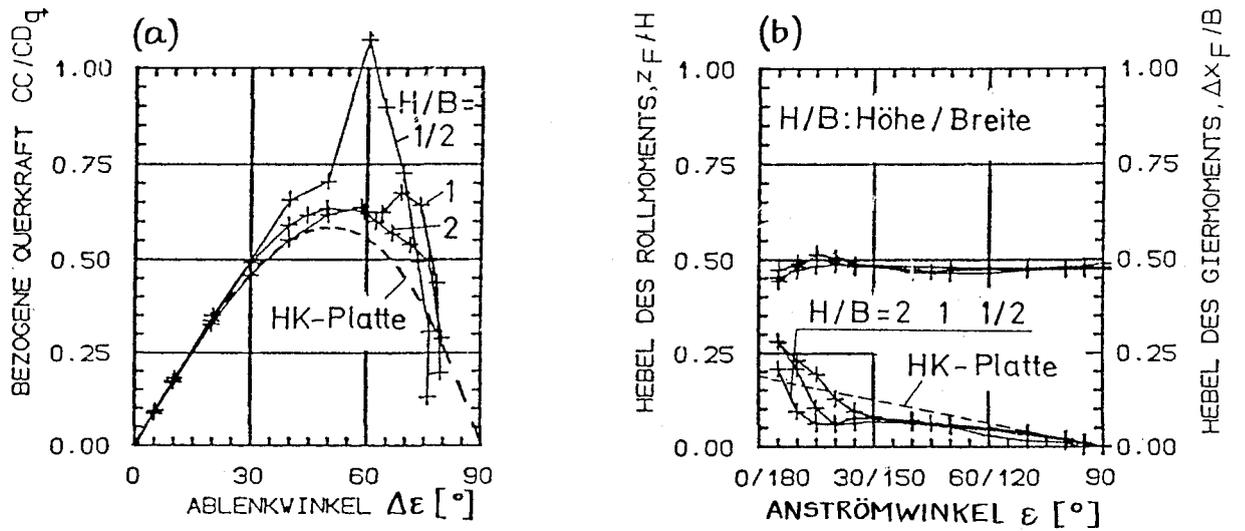


Bild 10: Querkraft (a) und Momentenhebel (b) an der Helmholtz-Kirchhoff-Platte und Platten auf einer Bodenplatte

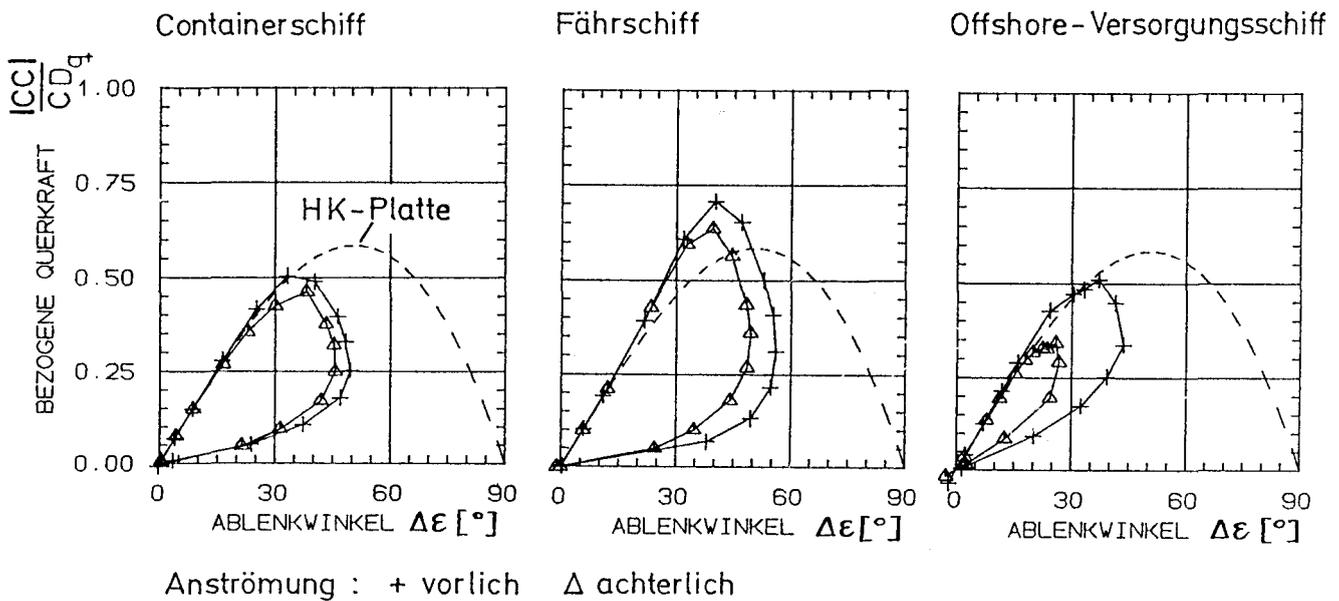
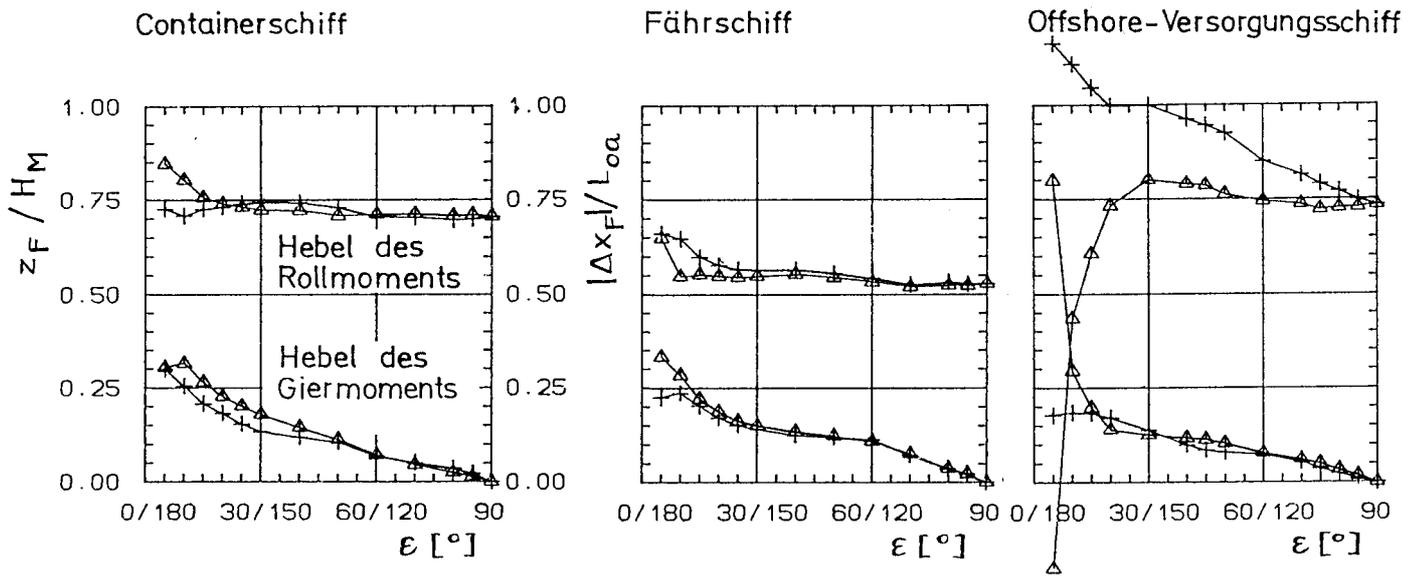


Bild 11: Bezogene Querkraft über dem Ablenkwinkel



Anströmung: + vorlich Δ achterlich

Bild 12: Hebel des Giermoments, bezüglich Momentenachse bei Querströmung, und Hebel des Rollmoments über dem Windeinfallswinkel

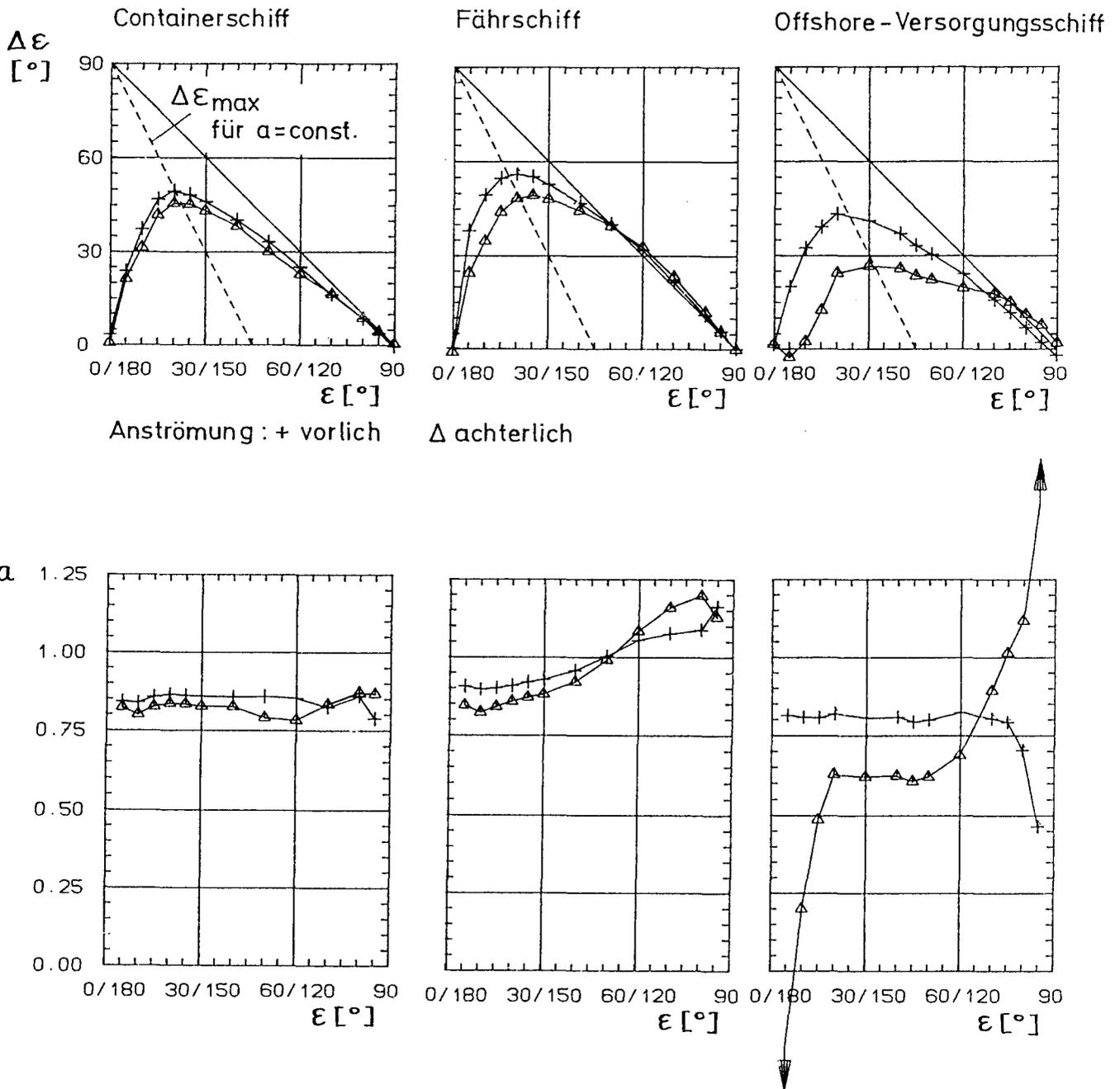


Bild 13: Ablenk Winkel (oben) und Ablenkparameter (unten) über dem Wind-einfallswinkel

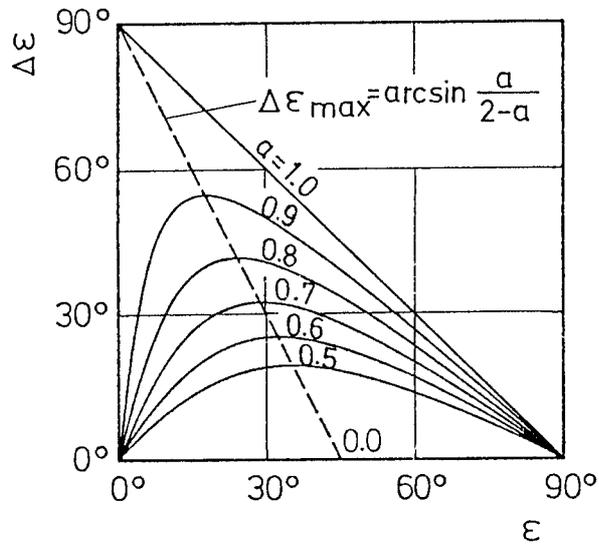


Bild 14: Ablenk Winkel bei konstantem Ablenkparameter über dem Anström Winkel

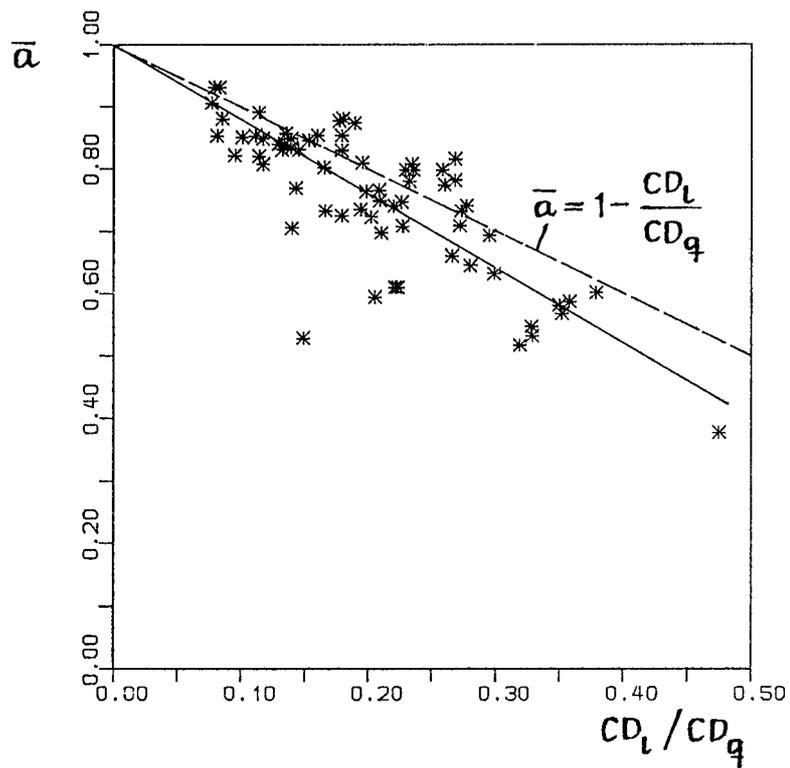


Bild 15: Gemittelter Ablenkparameter über dem Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand

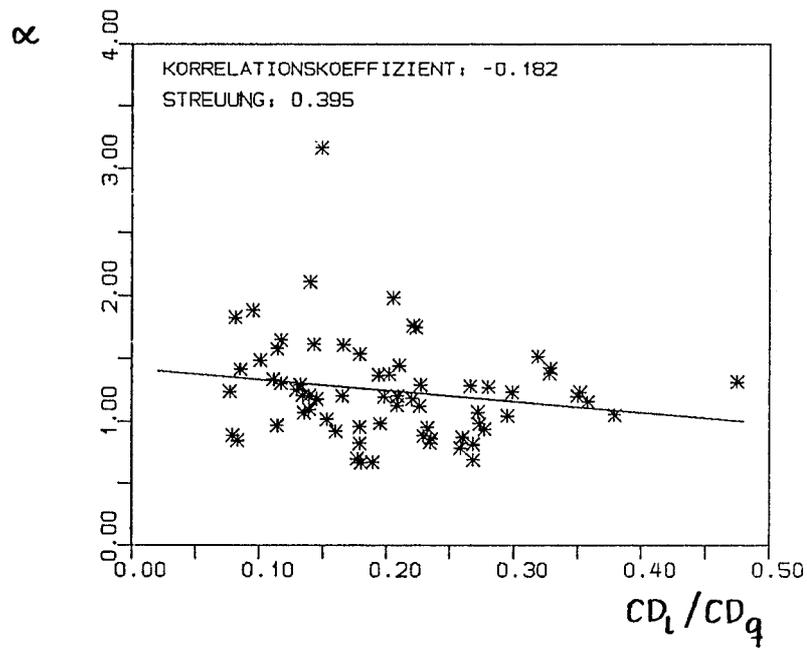


Bild 16: Deflektionskoeffizient über dem Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand

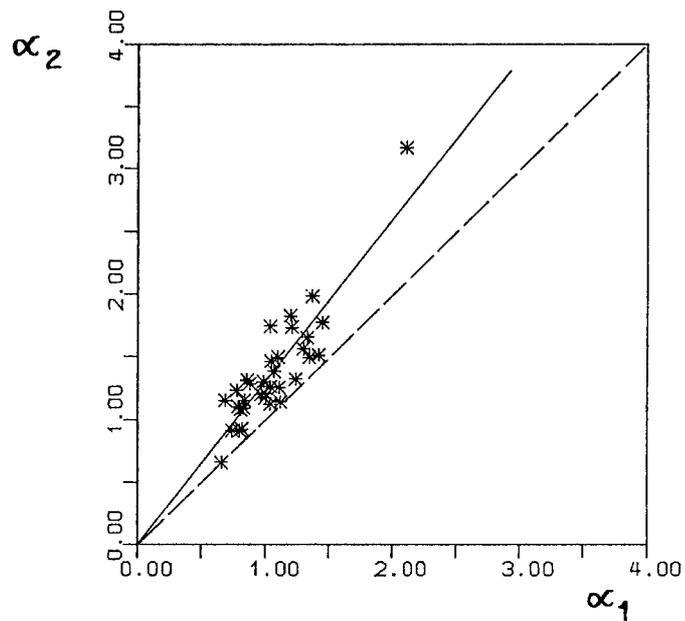


Bild 17: Deflektionskoeffizient bei vorlicher und achterlicher Anströmung in der Auftragung größerer über kleinerem Wert

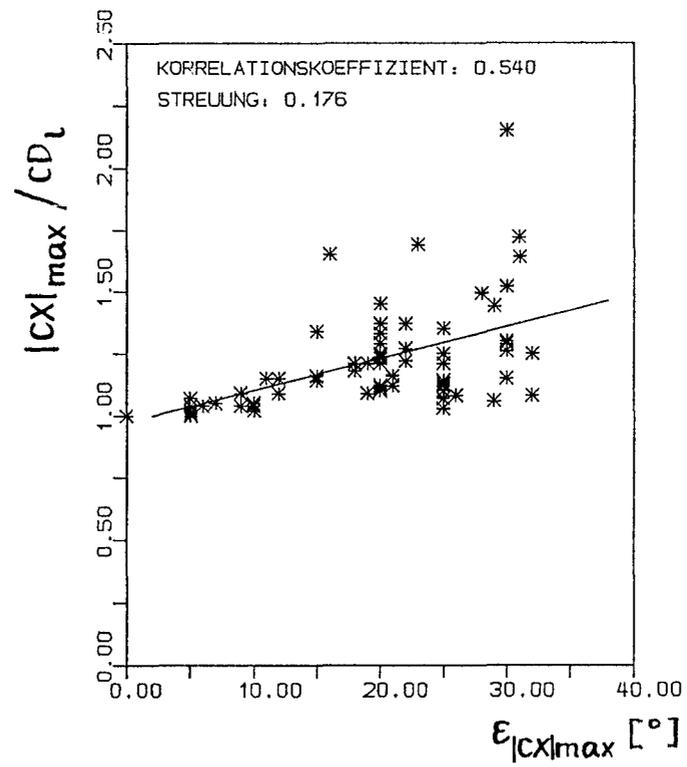


Bild 18: Bezogenes Längskraftmaximum über dessen Winkel

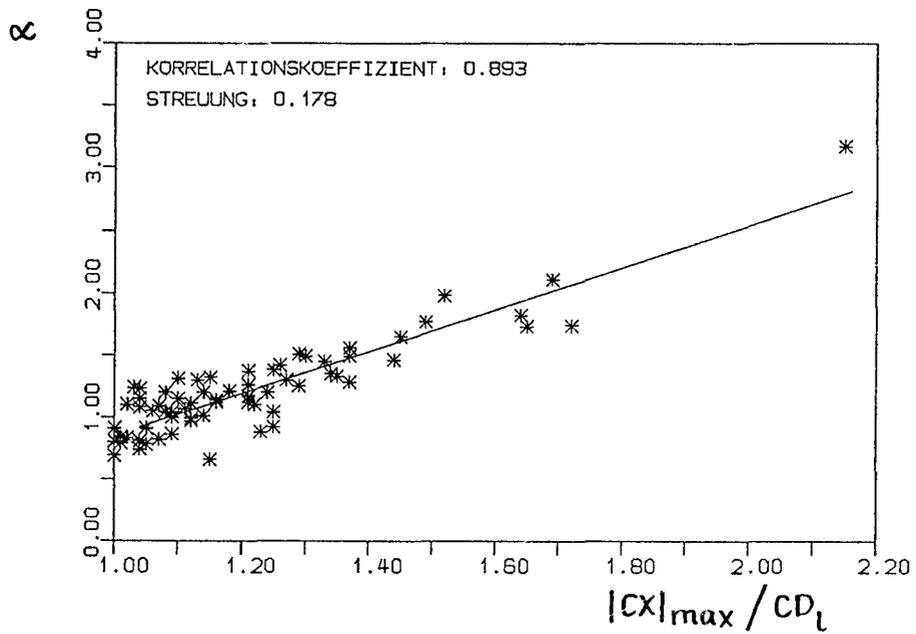


Bild 19: Deflektionskoeffizient über dem bezogenen Längskraftmaximum

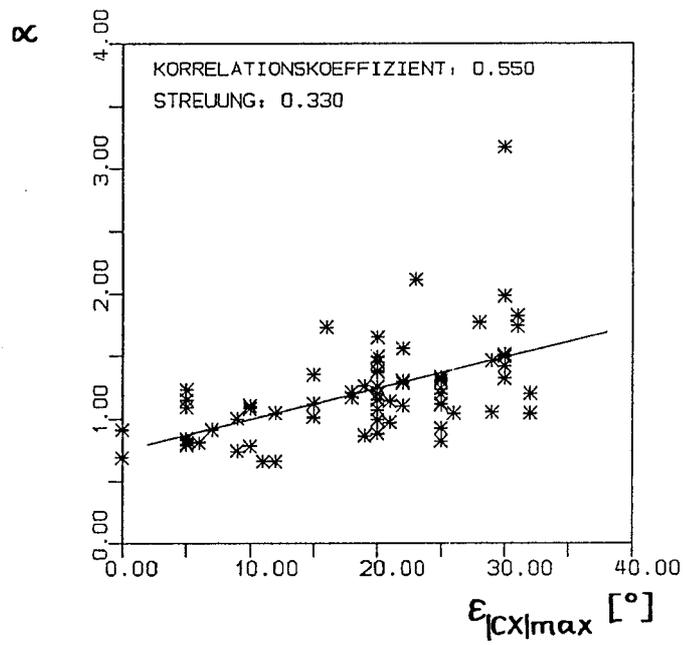


Bild 20: Deflektionskoeffizient über dem Winkel des Längskraftmaximums

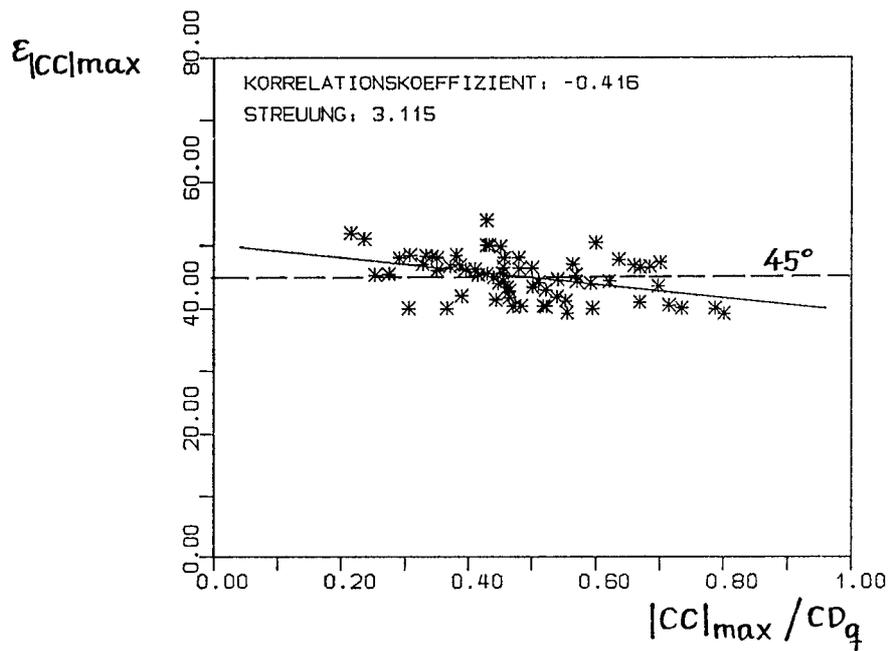


Bild 21: Querkraftmaximum und zugehöriger Anströmwinkel

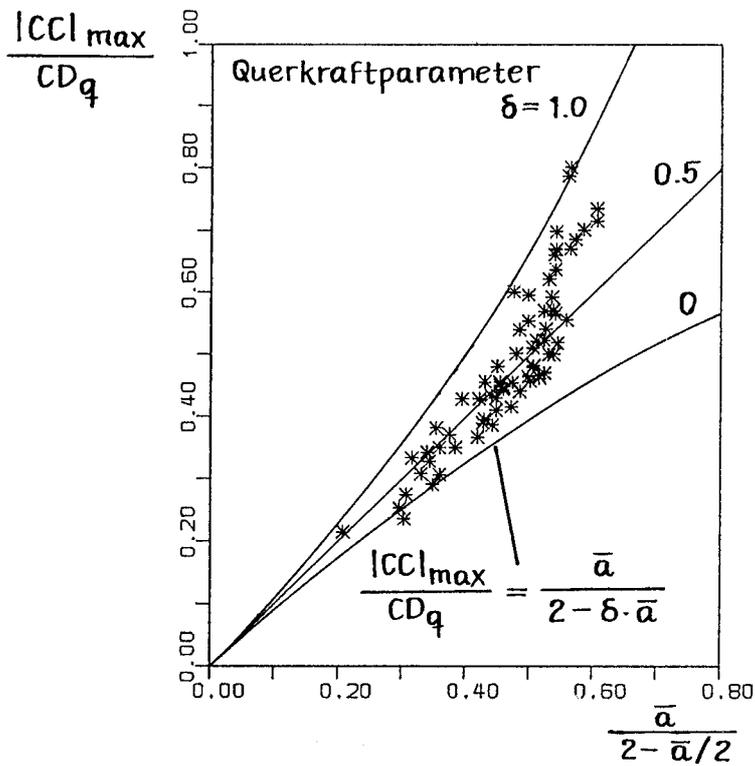


Bild 22: Bezogenes Querkraftmaximum über dem gemittelten Ablenkparameter

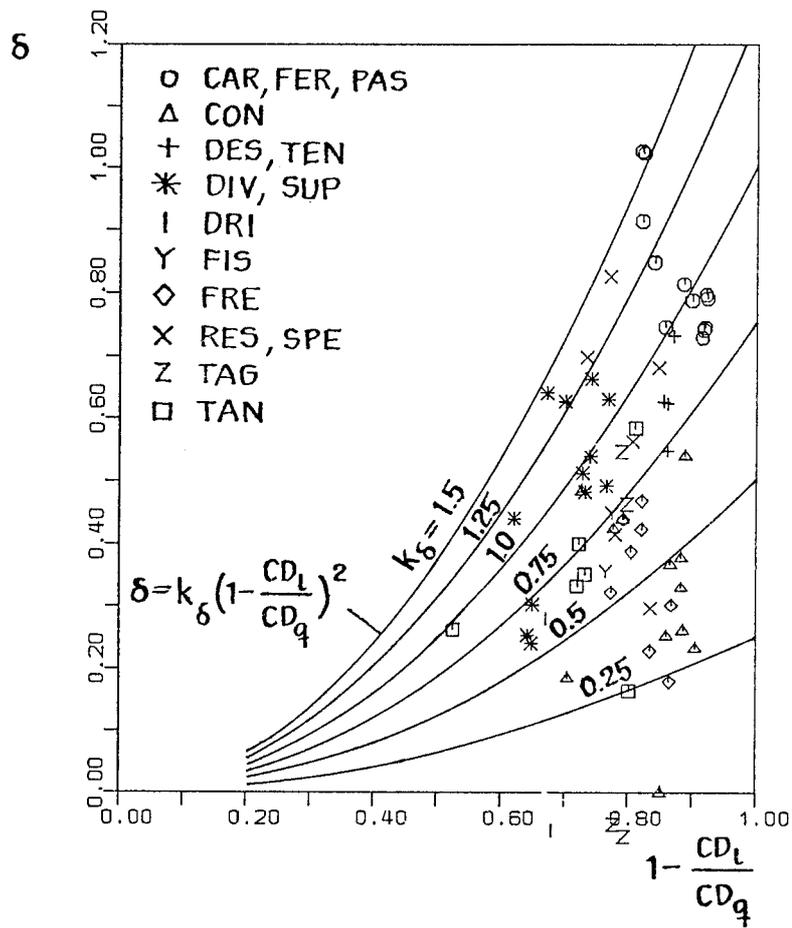


Bild 23: Querkraftparameter über dem Verhältnis von Längs- zu Querwiderstand

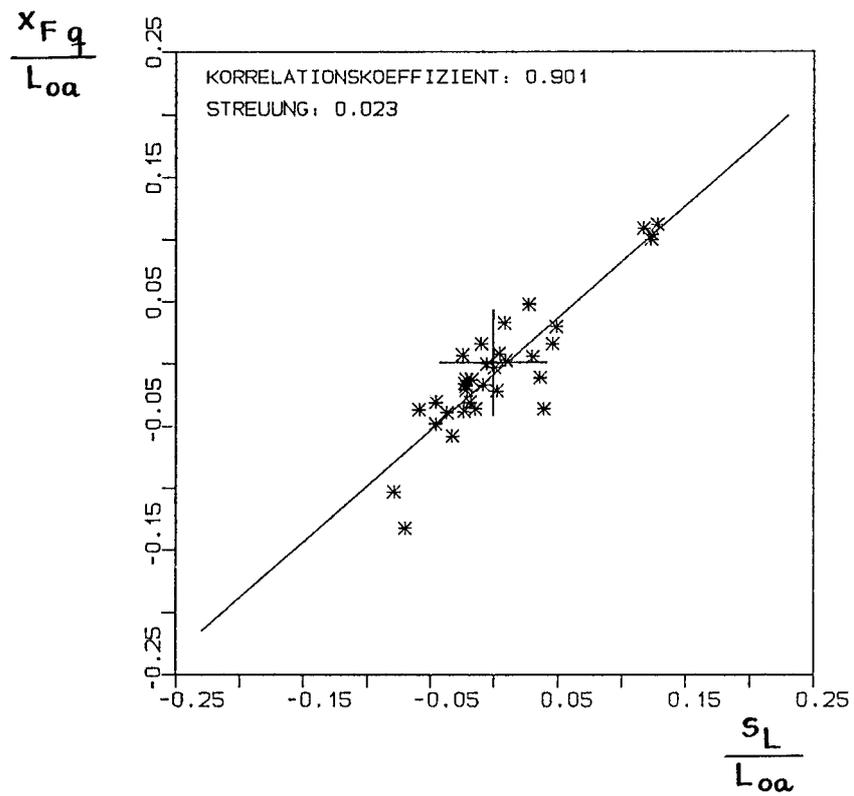


Bild 24: Hebel des Giermoments bei Queranströmung über dem Abstand des Lateralschwerpunkts von Hauptspant

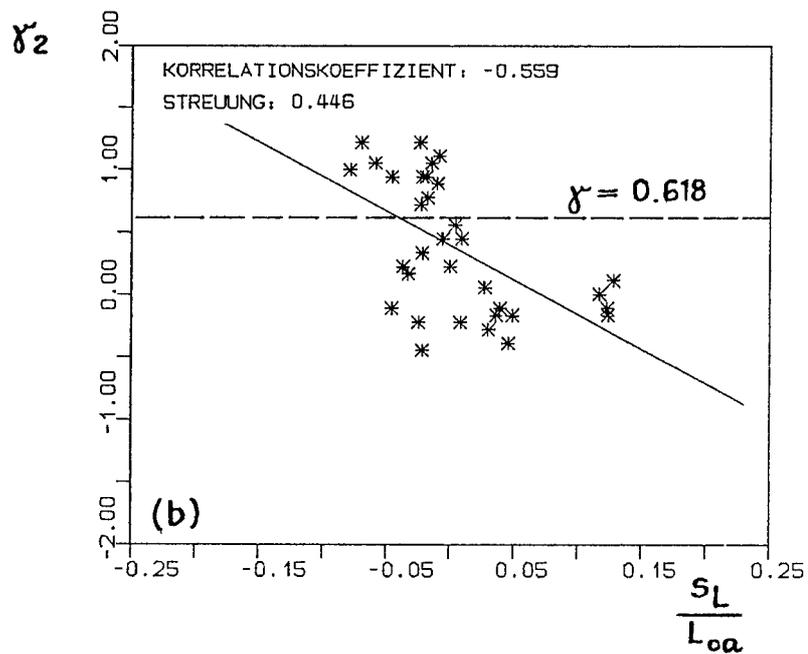
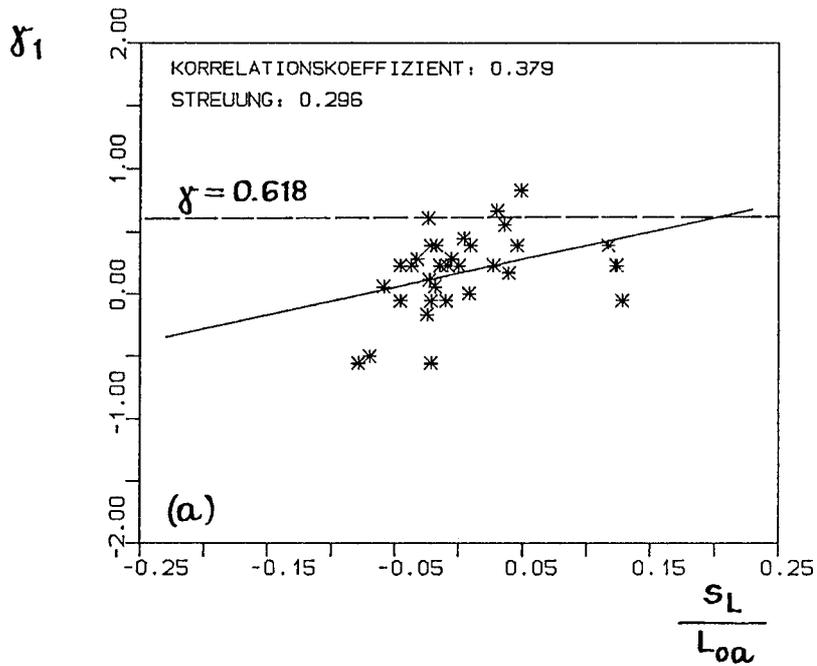


Bild 25: Giermomentenparameter bei vorlichem (a) und achterlichem Wind (b) über dem Abstand des Lateralschwerpunkts von Hauptspant

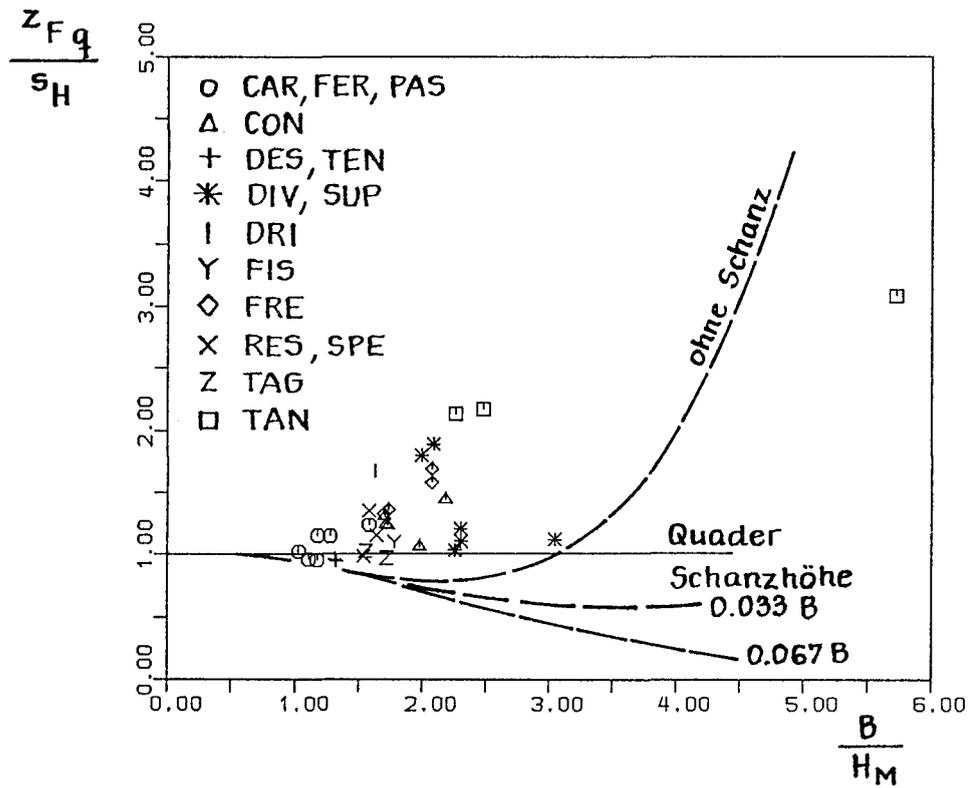


Bild 26: Rollmomentenfaktor über dem Verhältnis von Schiffsbreite zu mittlerer Höhe des Lateralplans, Vergleichswerte von einem Quader mit und ohne Schanz

CD_q 0.88

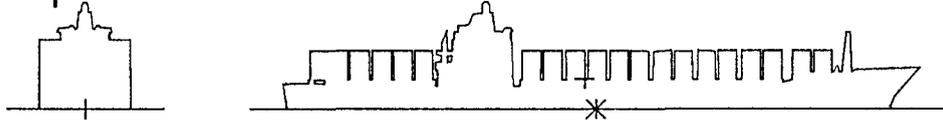
$CD_{L AF}$ 0.48

0.39

$s_L/L_{oa} = -0.018$ $s_H/H_M = 0.57$

CD_L/CD_q 0.117

0.095



Länge PP	LPP M	194.51	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-3.87
Länge OA	LOA M	210.75	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	10.08
Breite in der WL	BWL M	30.50	Mittlere Höhe von AL	HM M	17.80
Lateralfläche	AL M ²	3751.11	Tiefgang vorn	TV M	11.60
Frontfläche	AF M ²	801.97	Tiefgang hinten	TH M	11.60

Maßstab 1:150 Krümmung 0.0° RE-Zahl 2.10E+06 Windprofil gleichförmig

Anströmung: + vorlich, Δ achterlich

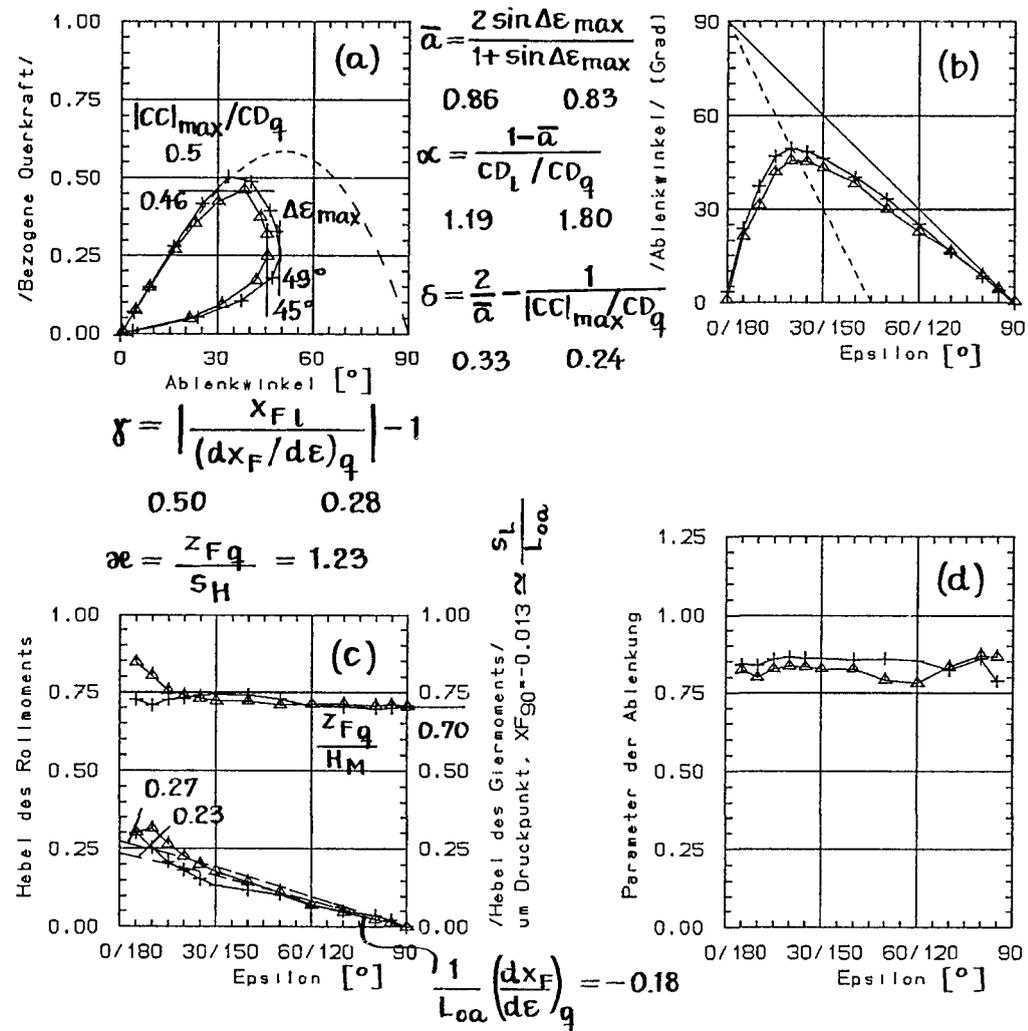
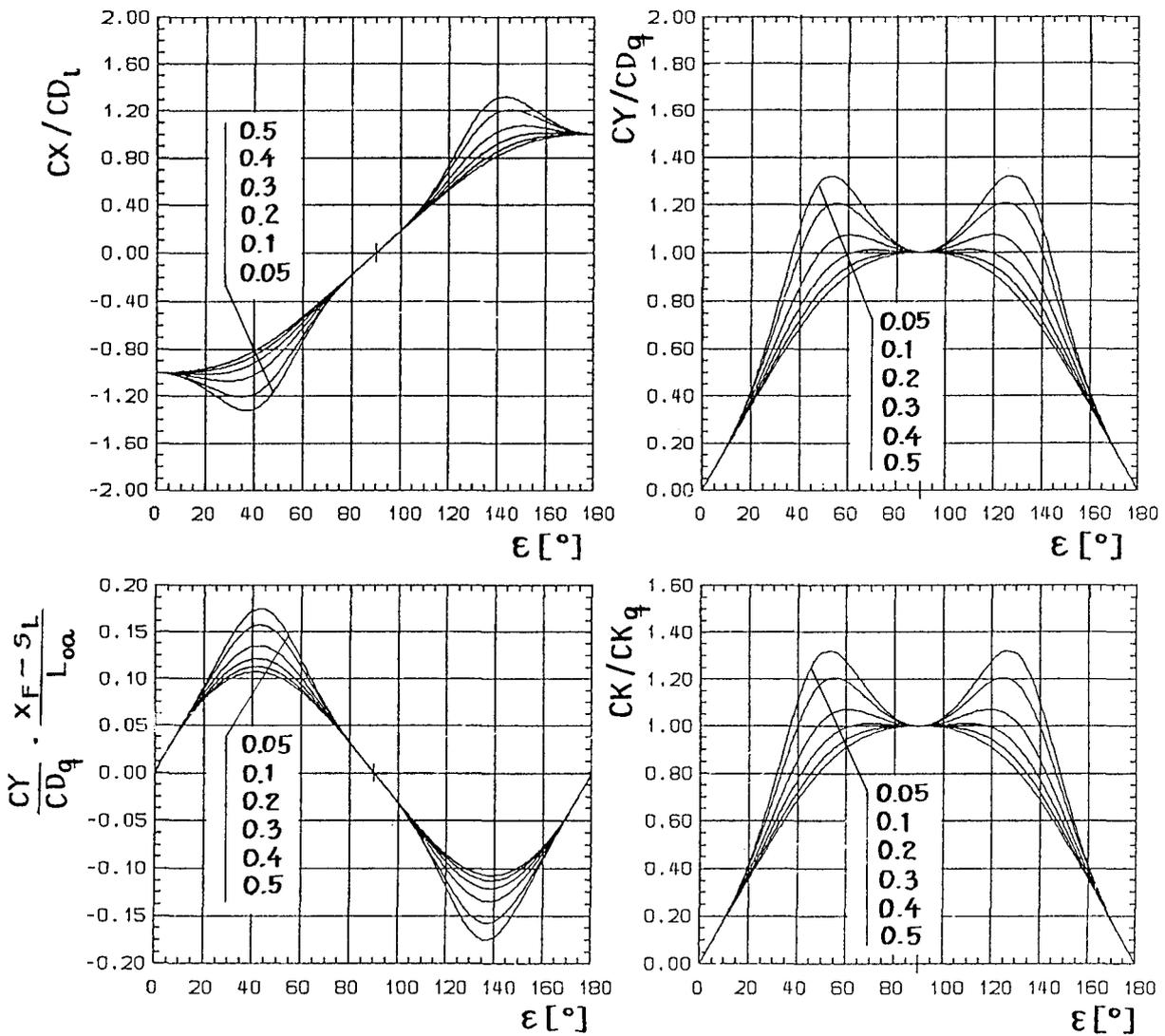
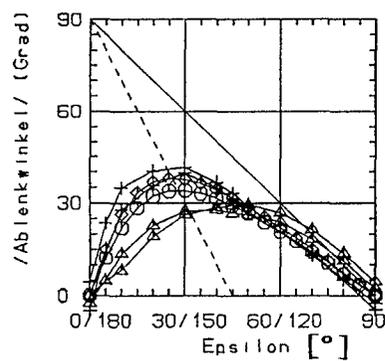
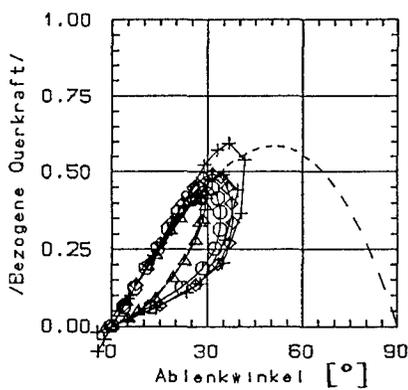
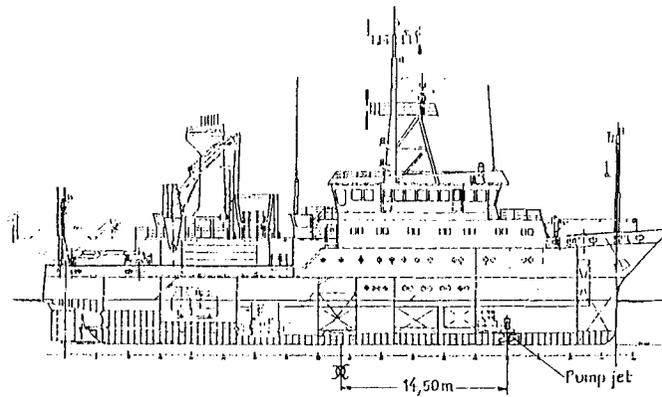


Bild 27: Windlast in kennzeichnender Auftragung, zeichnerische Ermittlung der Windlastparameter



Parameter : $CD_L/CD_q = (CD_{LAF}/CD_q) \cdot (A_F/A_L)$

Bild 28: Windlastfunktionen mit $k_\delta = 1.0$ (normiert)



Anströmung: vorlich achterlich

Rechnung : \diamond \circ

Messung : + Δ

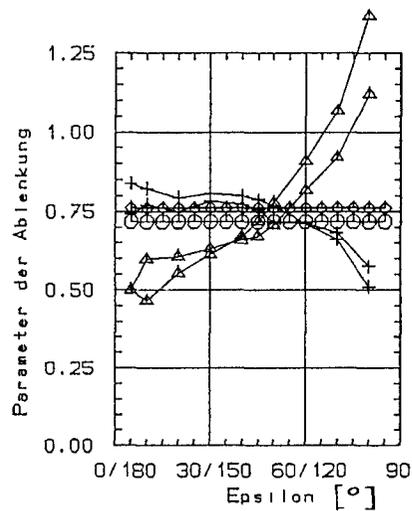
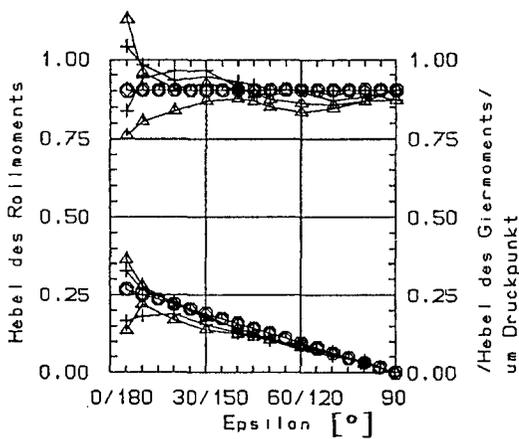


Bild 29: Berechnete Windlast am Forschungsschiff RES0201BN in kennzeichnender Auftragung und Meßwerte für Anströmung von Backbord und Steuerbord

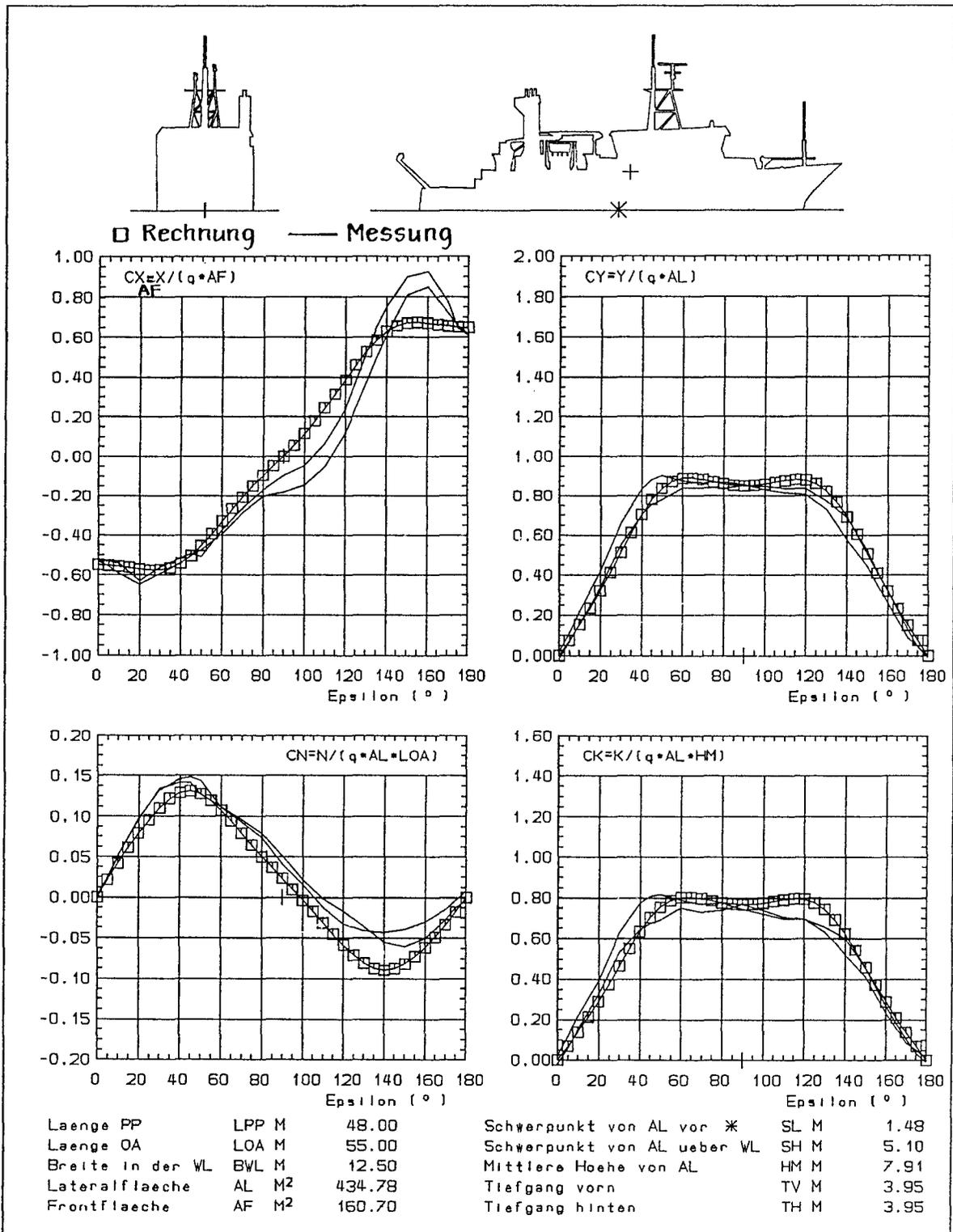


Bild 30: Berechnete Windlastbeiwerte des Forschungsschiffs RES0201BN und Meßwerte für Anströmung von Backbord und Steuerbord

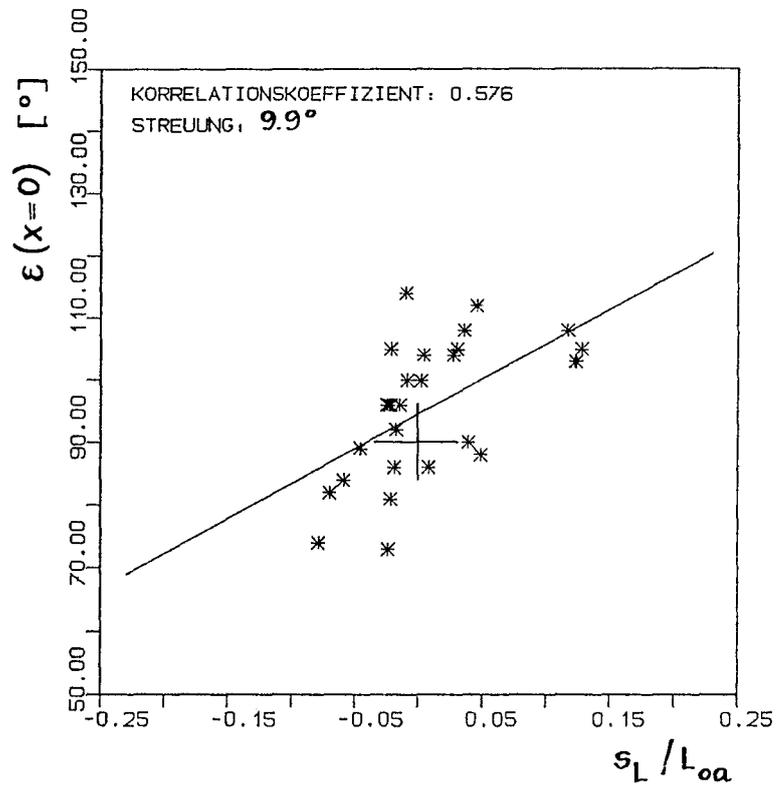
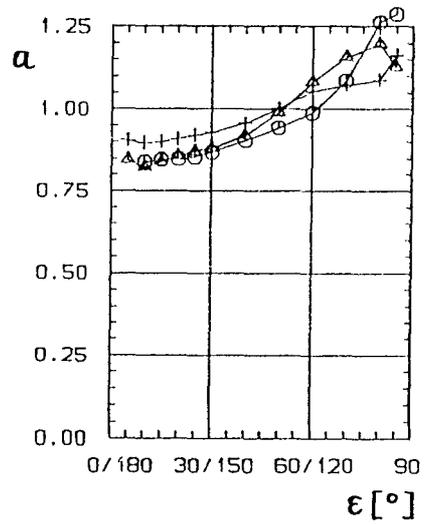
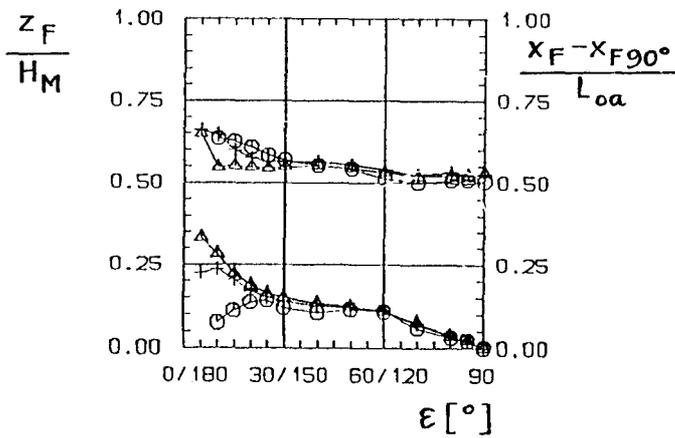
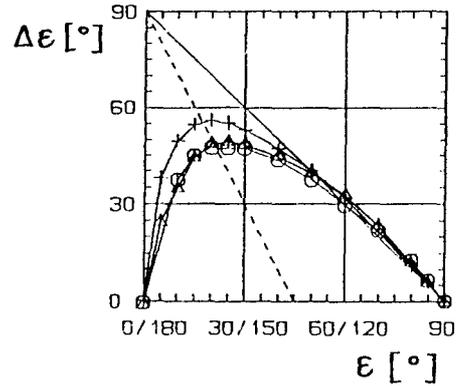
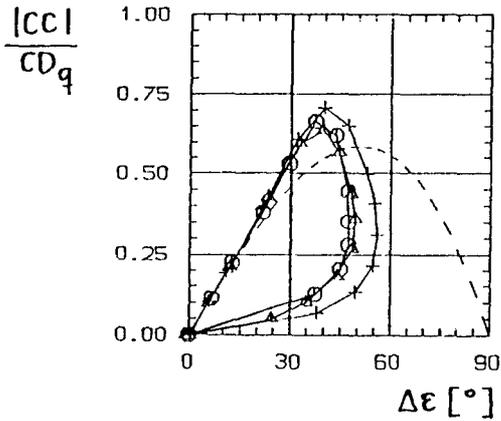
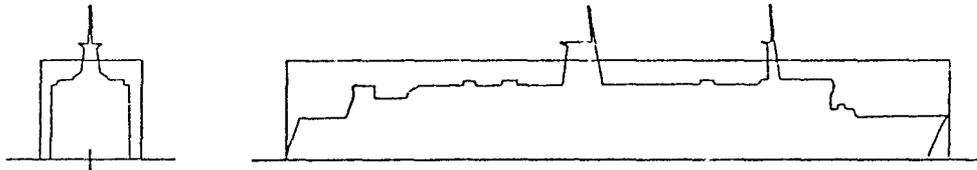
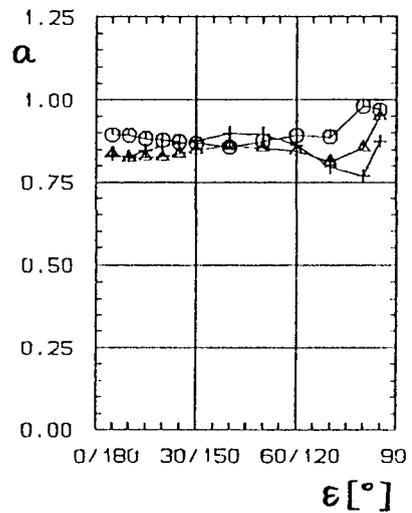
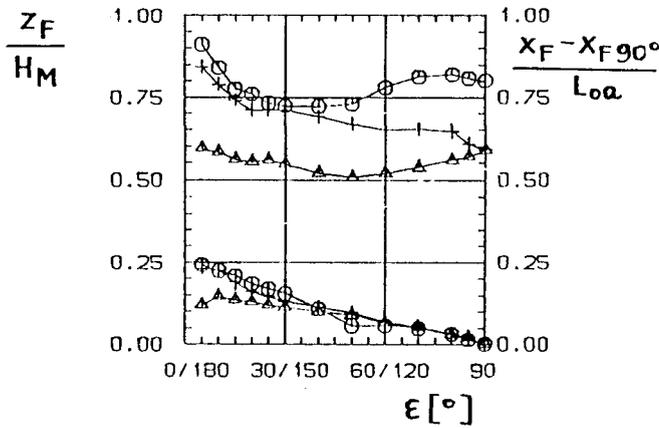
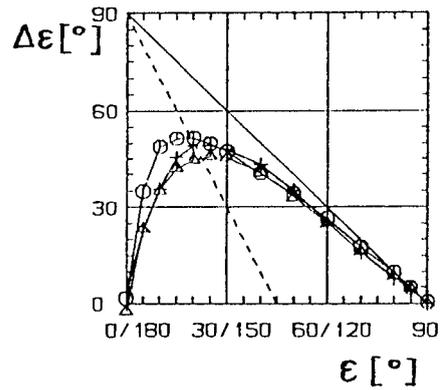
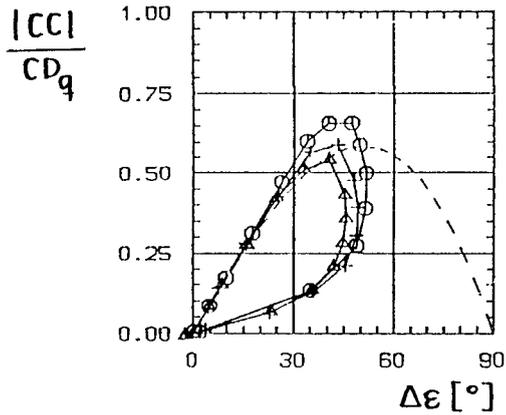
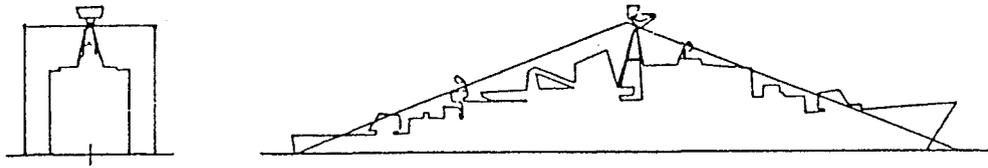


Bild 31: Nulldurchgang der Längskraft über der Lage des Lateralschwerpunkts der Länge nach



Fährschiff : + Anströmung vorlich , Δ achterlich
 Quader : O

Bild 32: Windlast an einem Fährschiff in kennzeichnender Auftragung im Vergleich mit Meßwerten von einem Quader



Zerstörer : + Anströmung vorlich, Δ achterlich
 Prisma : o

Bild 33: Windlast an einem Tender in kennzeichnender Auftragung im Vergleich mit Meßwerten von einem Prisma

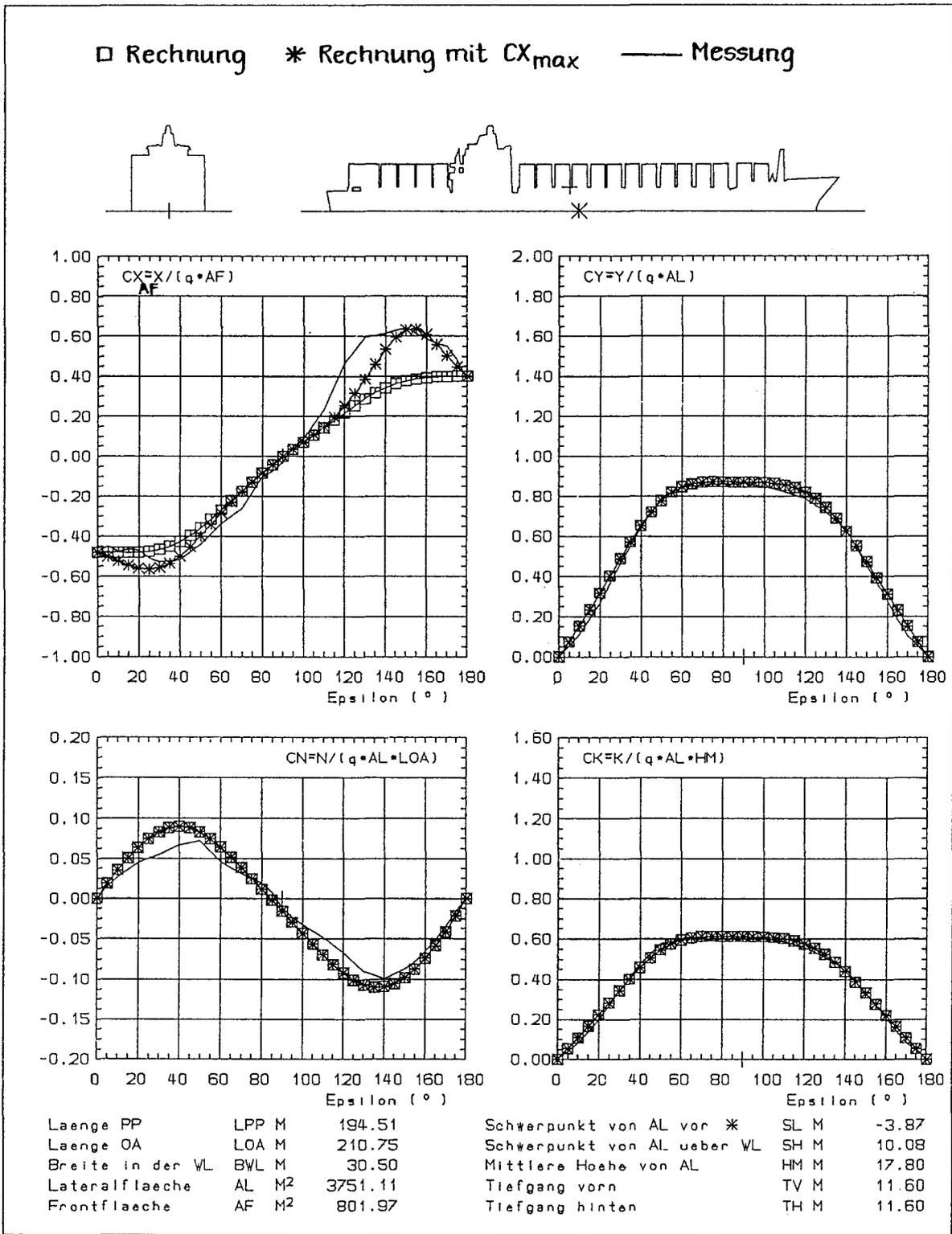


Bild 34: Berechnete Windlastbeiwerte eines Containerschiffs und Meßwerte, Beiwert der Längskraft mit Berücksichtigung von $|CX|_{max}$

□ Rechnung * Rechnung mit $X(\epsilon = \pi/2) \neq 0$ — Messung

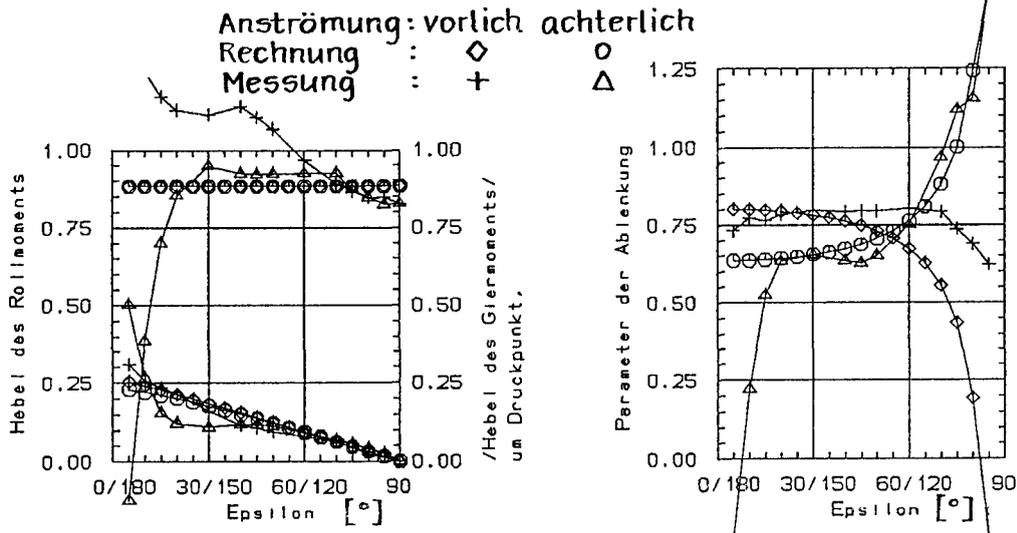
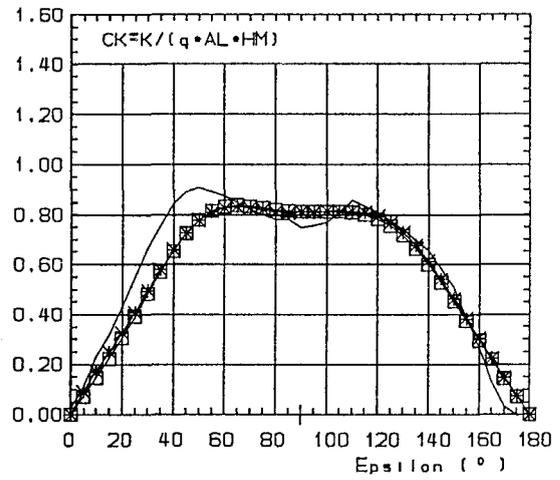
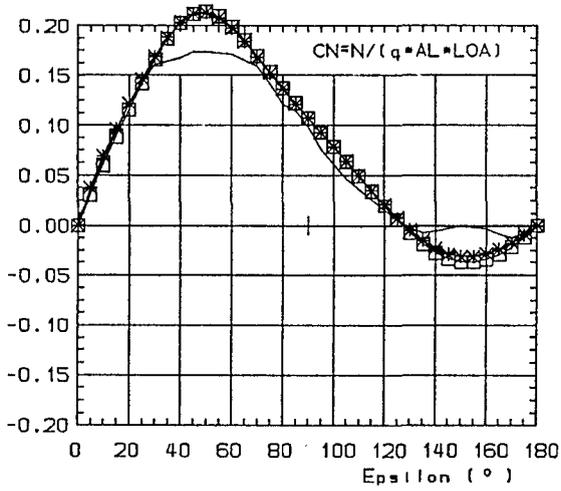
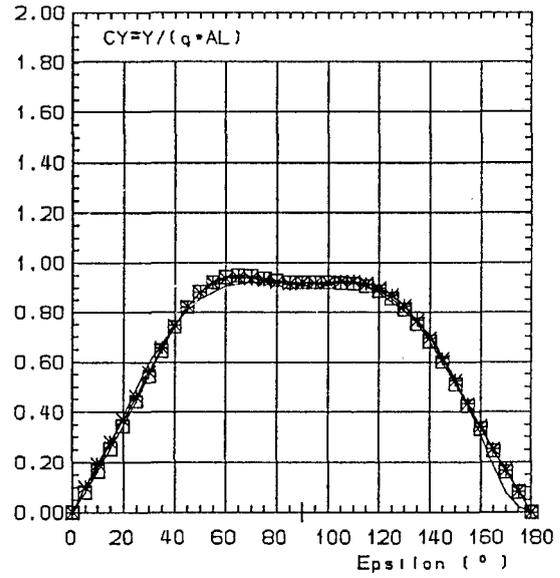
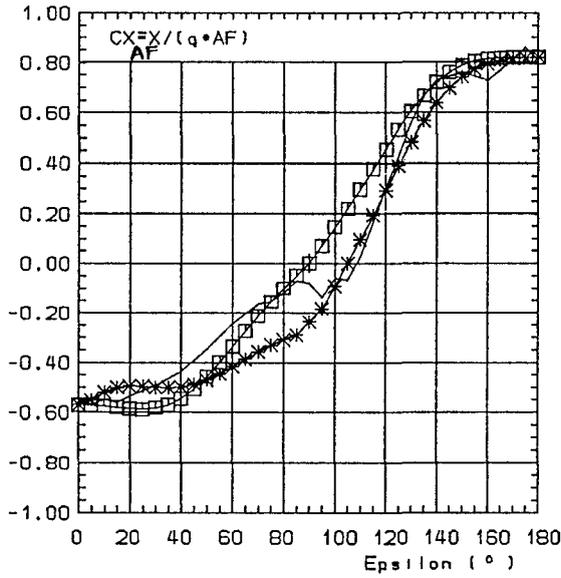
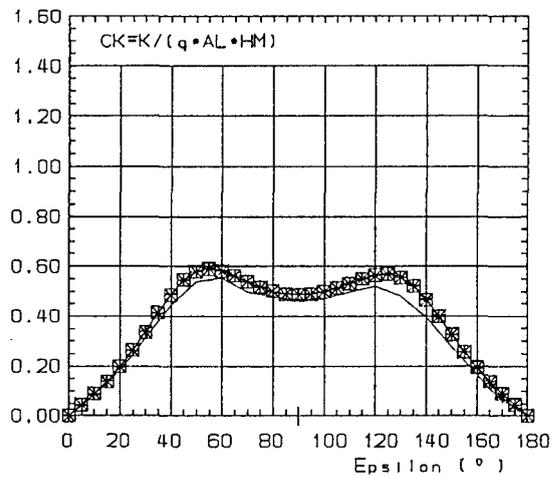
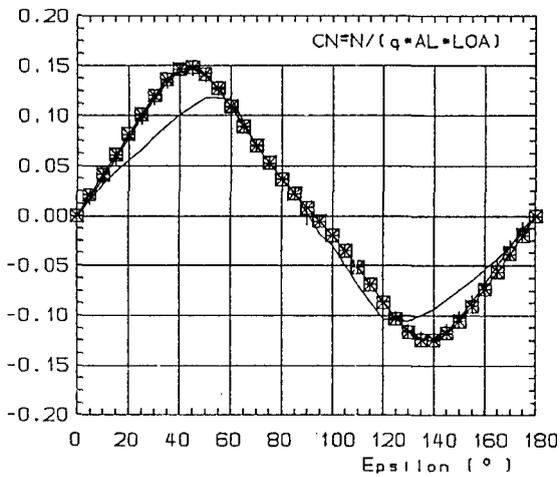
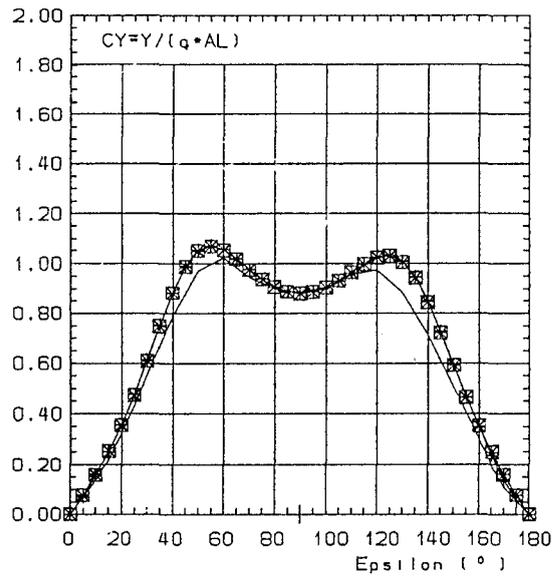
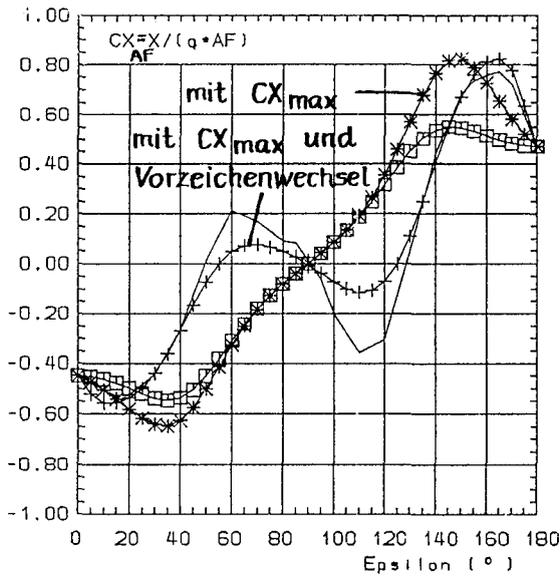


Bild 35: Berechnete Windlastbeiwerte eines Offshore-Versorgungsschiffs und Meßwerte (SUP0107BN), Längskraft mit Berücksichtigung von $X(\epsilon = \pi/2) \neq 0$

□, *, + Rechnung

— Messung



Anströmung: vorlich achterlich

Rechnung : ◇ ○

Messung : + △

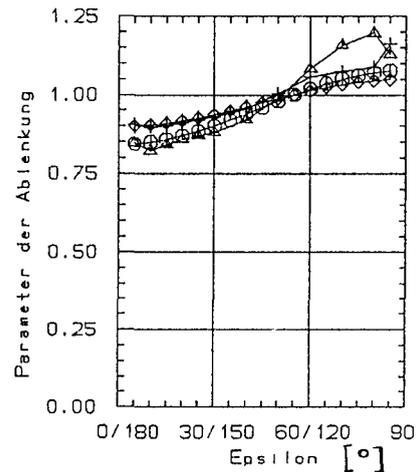
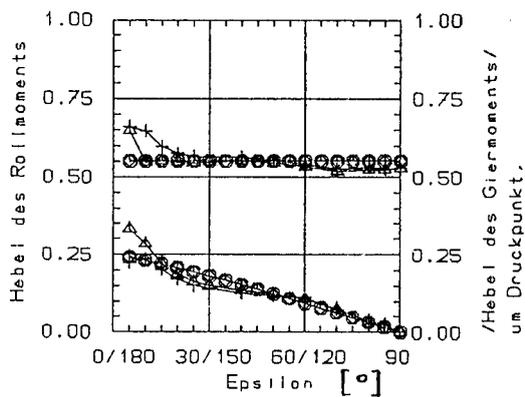
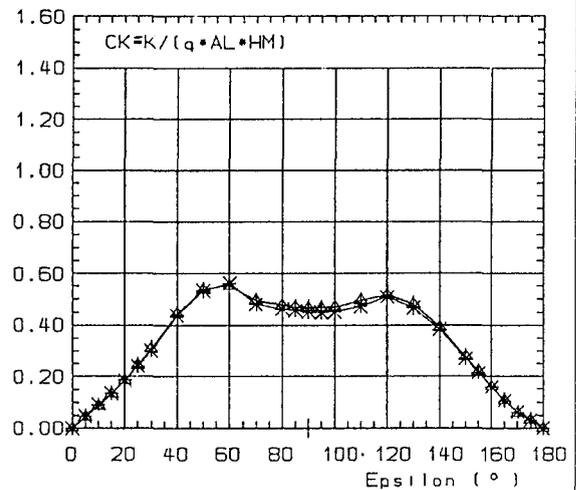
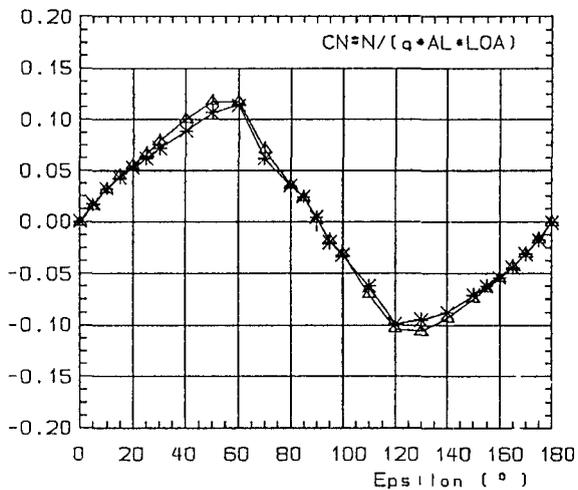
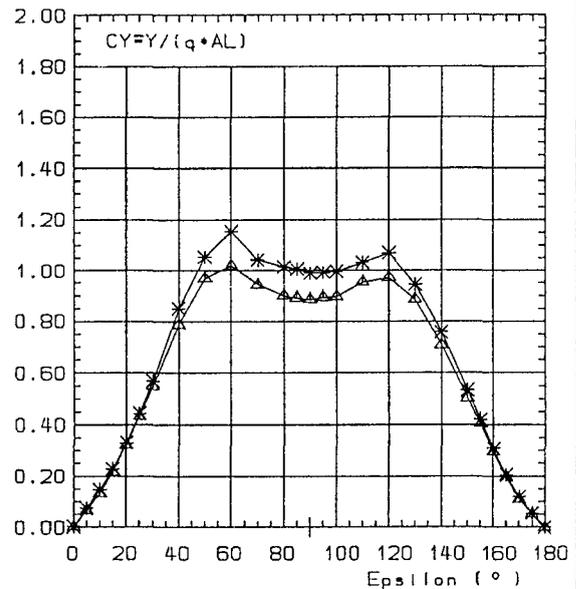
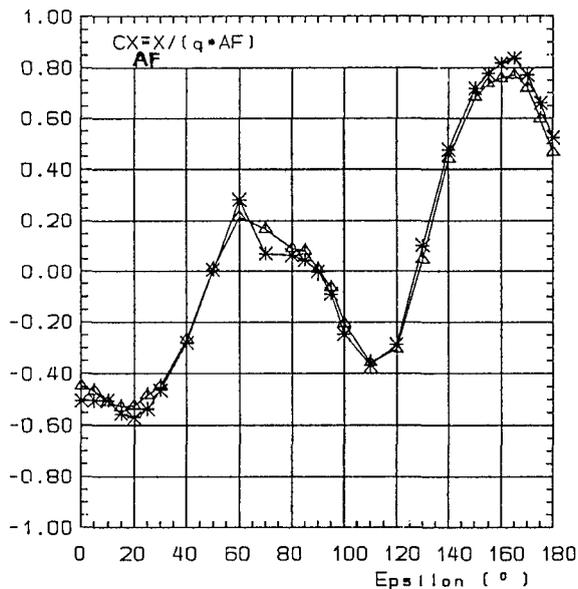
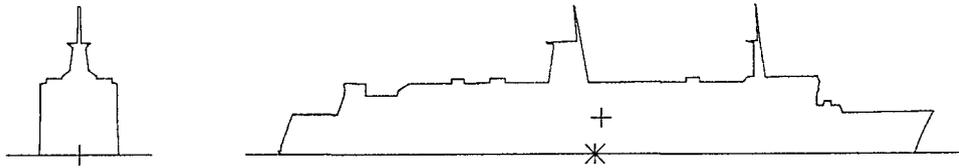


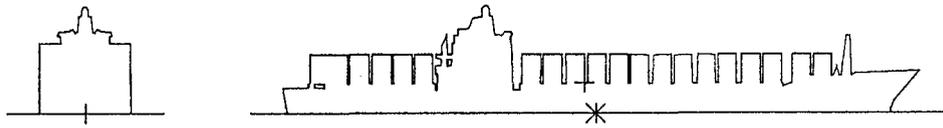
Bild 36: Berechnete Windlastbeiwerte eines Fährschiffs und Meßwerte (FER0201BN), Längskraft mit Berücksichtigung des Vorzeichenwechsels im Quadranten des Windeinfalls

Strömung: * stark turbulent (Turbulenzintensität ~ 4%)
 Δ turbulenzarm (~ 0.5%)



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	14.77
Lateralflaeche	AL M ²	2125.75	Tiefgang vorn	TV M	5.90
Frontflaeche	AF M ²	325.33	Tiefgang hinten	TH M	5.90

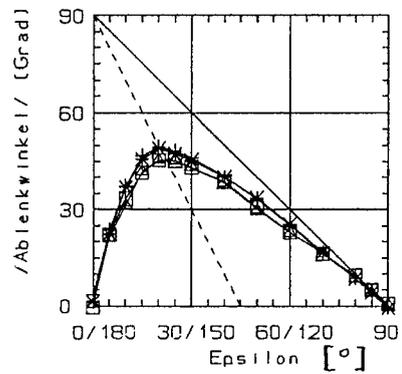
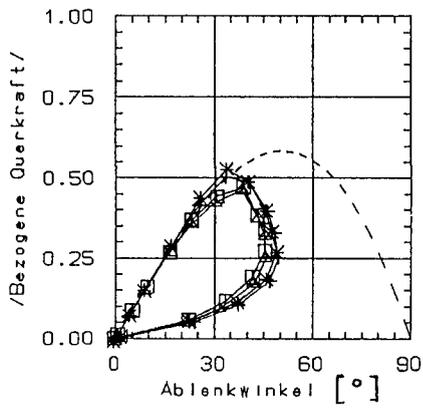
Bild 37: Windlastbeiwerte eines Fährschiffs in stark turbulenter und turbulenzarmer Strömung



Länge PP	LPP M	194.51	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-3.87
Länge OA	LOA M	210.75	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	10.08
Breite in der WL	BWL M	30.50	Mittlere Hoeha von AL	HM M	17.80
Lateralfleäche	AL M ²	3751.11	Tiefgang vorn	TV M	11.60
Frontfläeche	AF M ²	801.97	Tiefgang hinten	TH M	11.60

Massstab 1:150

RE-Zahl 2.10E+06



Strömung: vorlich achterlich
 1/10-Profil: * □
 gleichförmig: + Δ

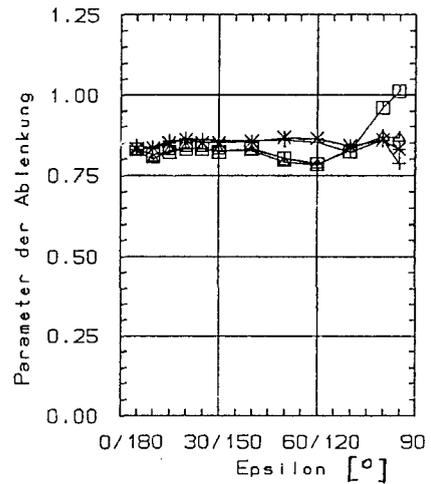
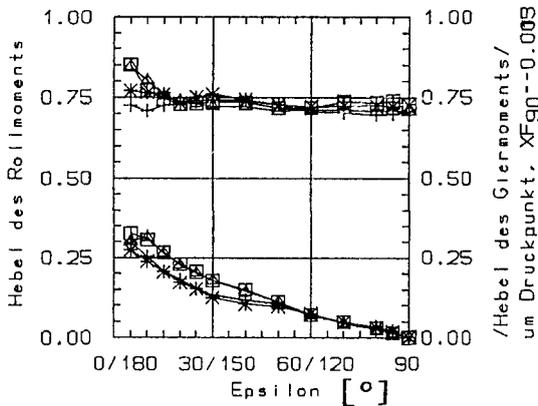


Bild 38: Windlast an einem Containerschiff in Strömung mit Gradienten (1/10- und 1/5-Profil) und ohne Gradienten; kennzeichnende Auftragung

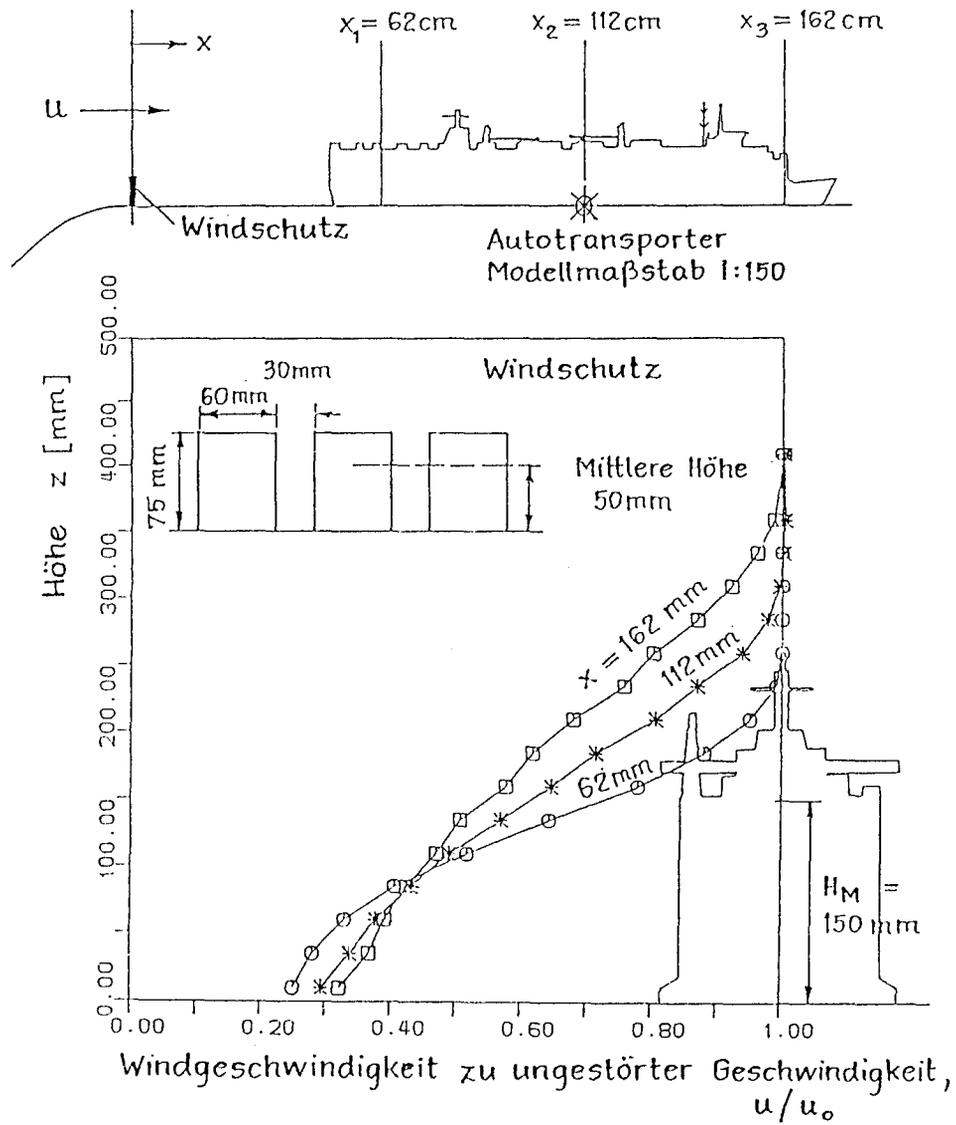


Bild 39: Geschwindigkeitsprofile hinter einem Windschutz mit belüftetem Nachlauf

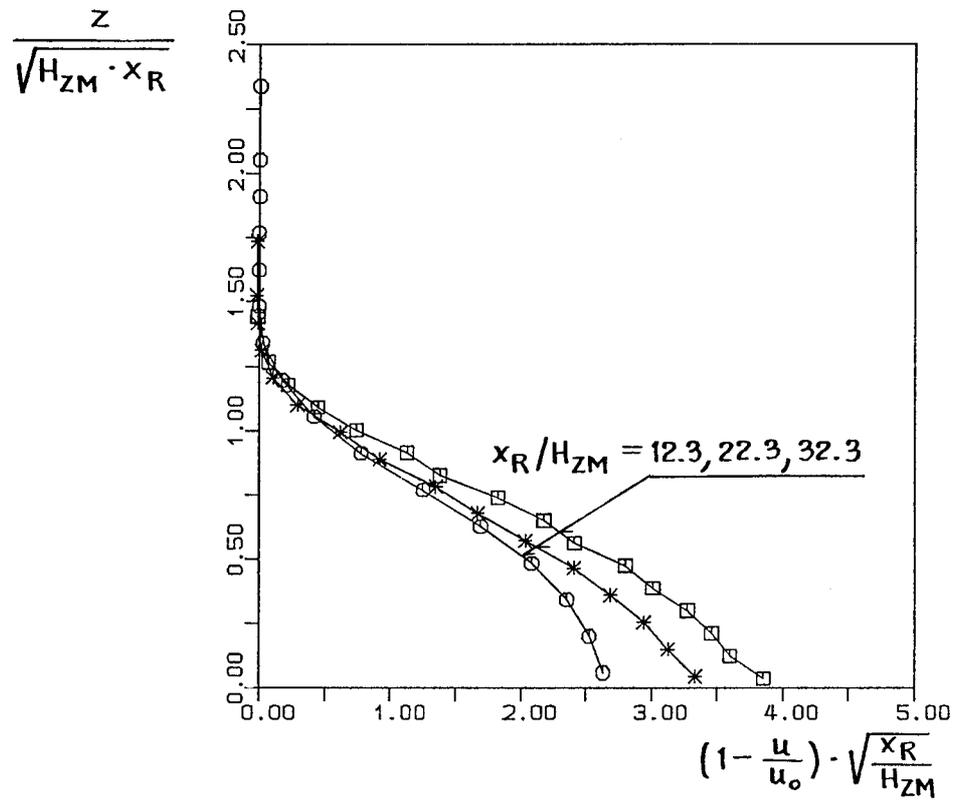
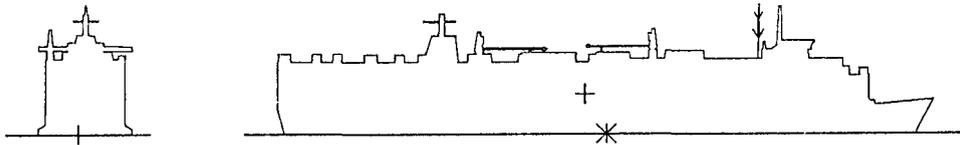
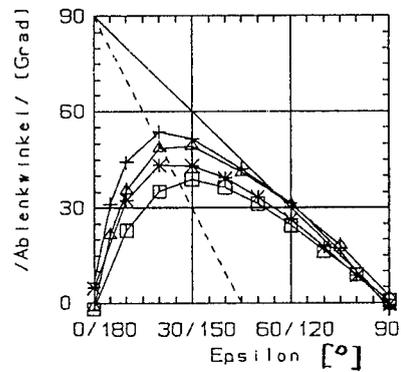
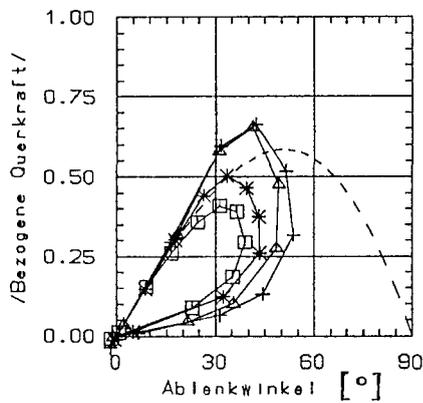


Bild 40: Geschwindigkeitsdelle hinter einem Windschutz mit belüftetem Nachlauf (normiert)



Laenge PP	LPP M	179.55	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-6.20
Laenge OA	LOA M	190.65	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	11.93
Breite in der WL	BWL M	22.95	Mittlere Hoehe von AL	HM M	22.33
Lateralflaeche	AL M ²	4256.55	Tiefgang vorn	TV M	9.90
Frontflaeche	AF M ²	653.98	Tiefgang hinten	TH M	9.90

Massstab 1:150



Anströmung: vorlich achterlich

Nachlauf : * □

gleichförmig : + Δ

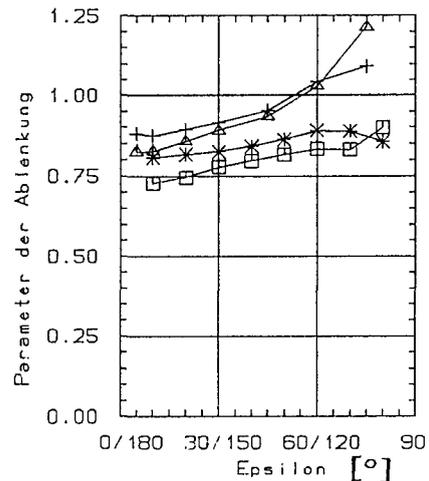
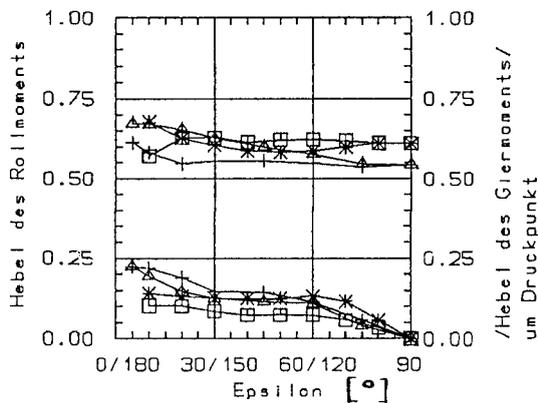


Bild 41: Windlast an einem Autotr transporter in einer Nachlaufströmung und in gleichförmiger Strömung; kennzeichnende Auftragung

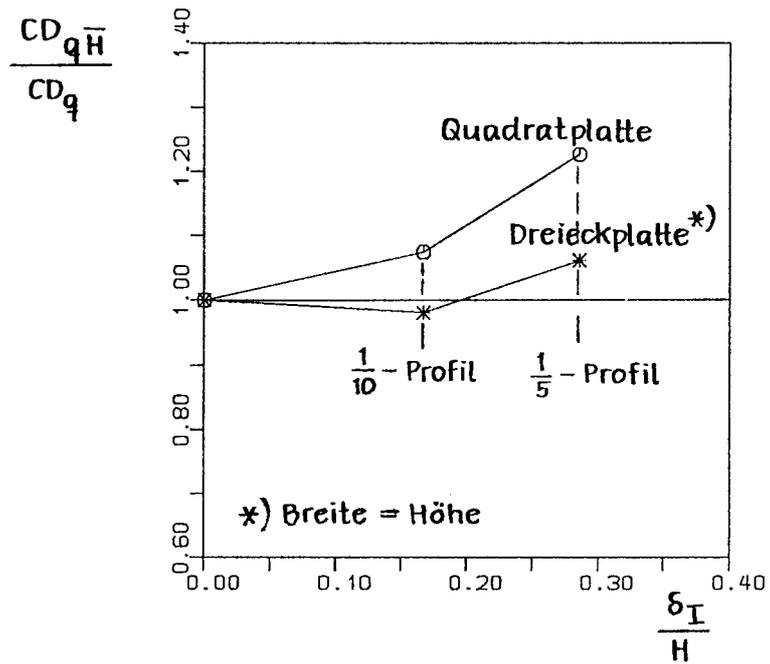


Bild 42: Reduzierter Beiwert des Querwiderstands von Platten in Strömung mit Gradienten

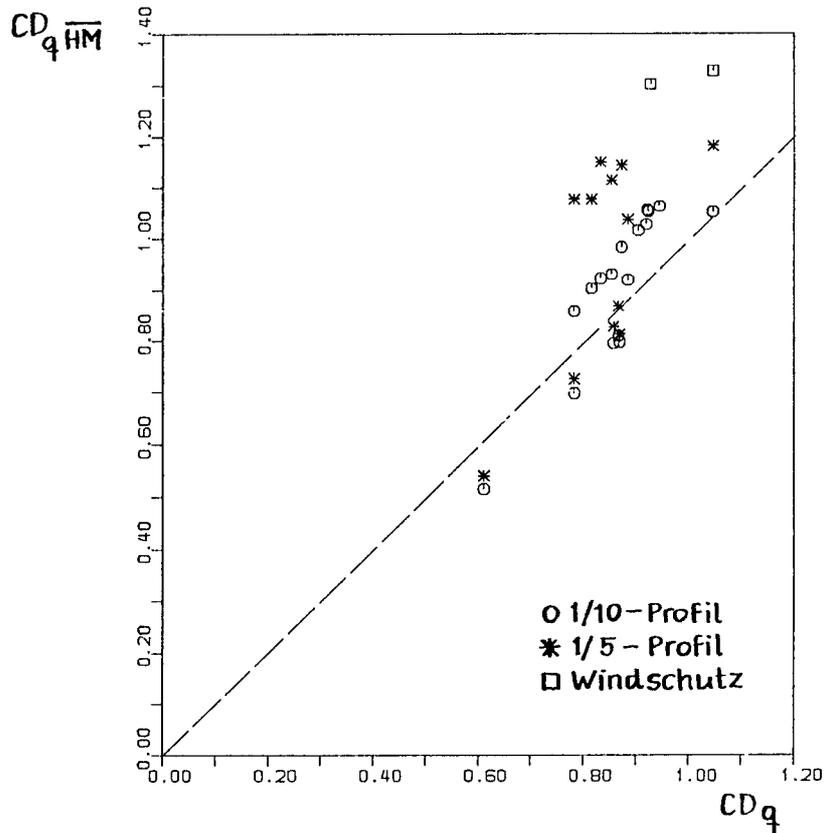


Bild 43: Beiwert des Querwiderstands von Schiffen, reduziert mit dem mittleren Staudruck über der mittleren Höhe, in Strömung mit Gradienten, verglichen mit den Werten in gleichförmiger Strömung

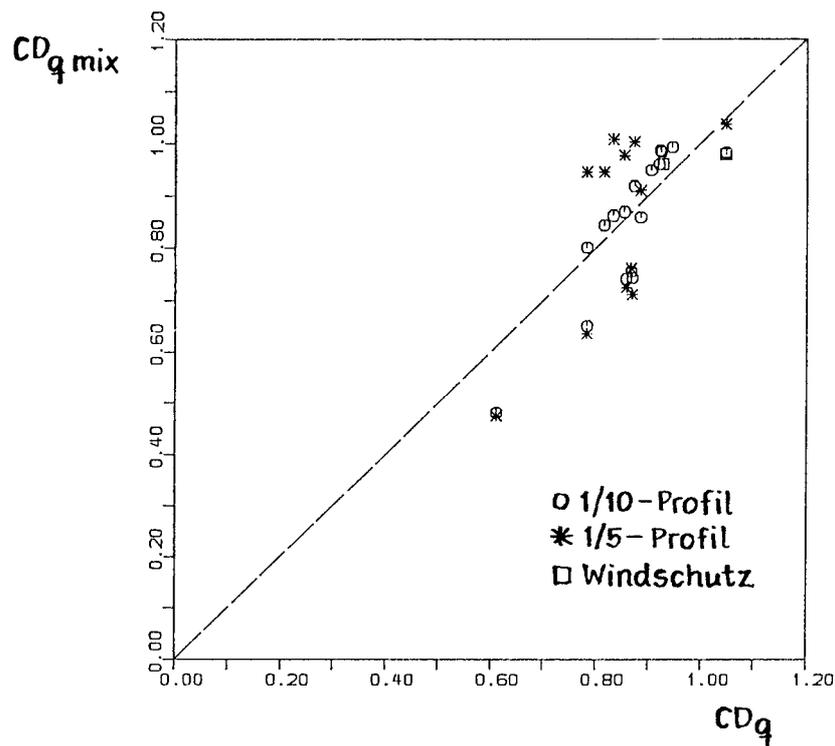


Bild 44: Beiwert des Querwiderstands von Schiffen, reduziert mit $0.65\bar{q}_{HM} + 0.35q_{HM}$, in Strömung mit Gradienten, verglichen mit den Werten in gleichförmiger Strömung

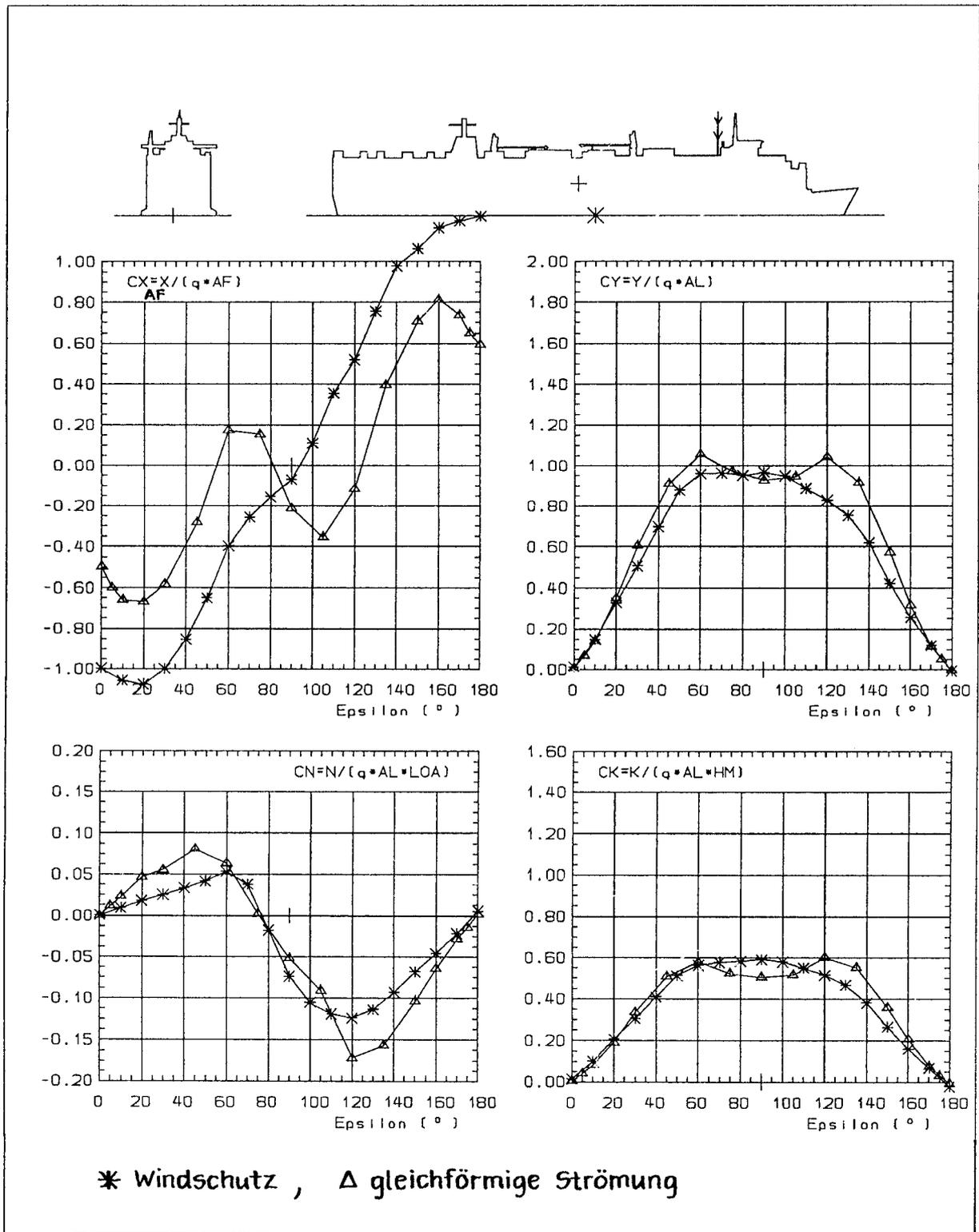


Bild 45: Windlastbeiwerte eines Autotransporters (CAR0101BN) im Windschutz, reduziert mit $0.65\bar{q}_H + 0.35q_H$, verglichen mit den Werten in gleichförmiger Strömung

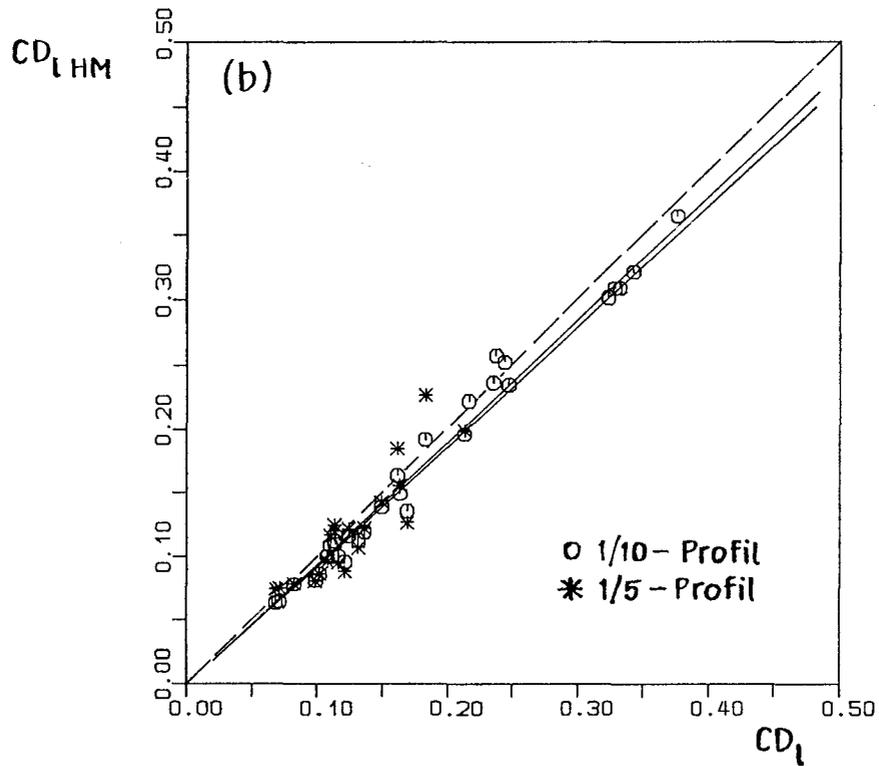
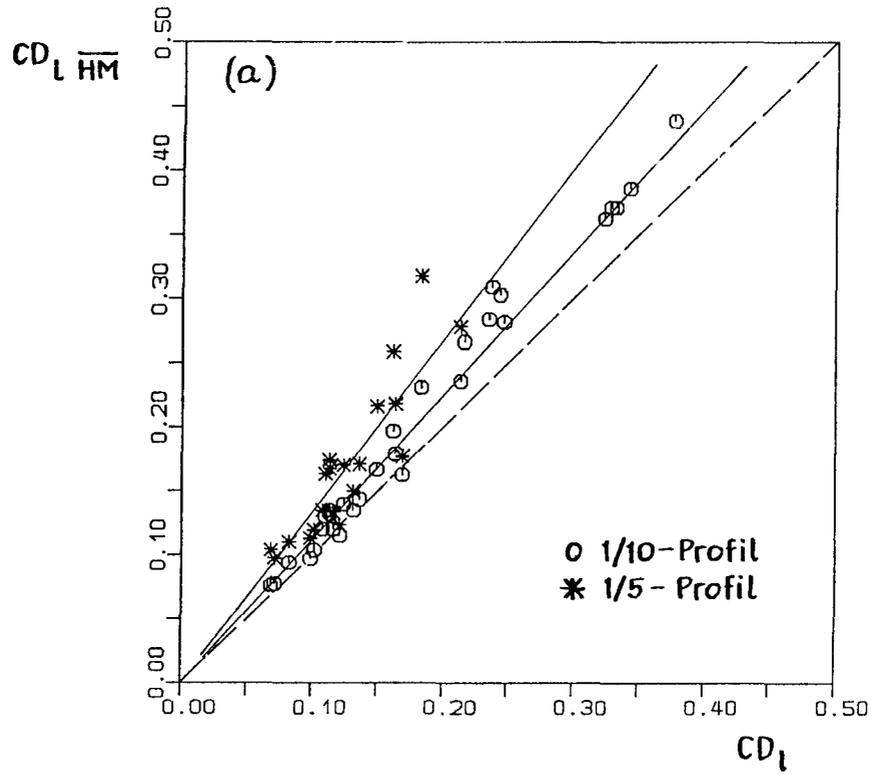
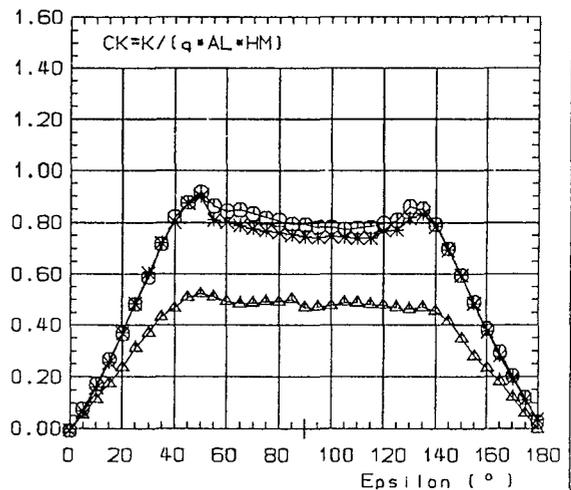
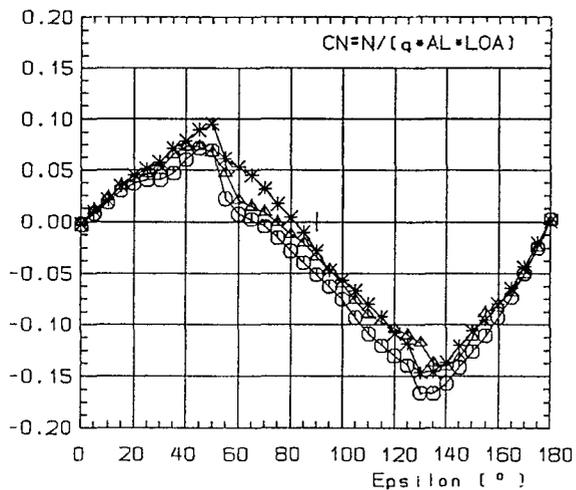
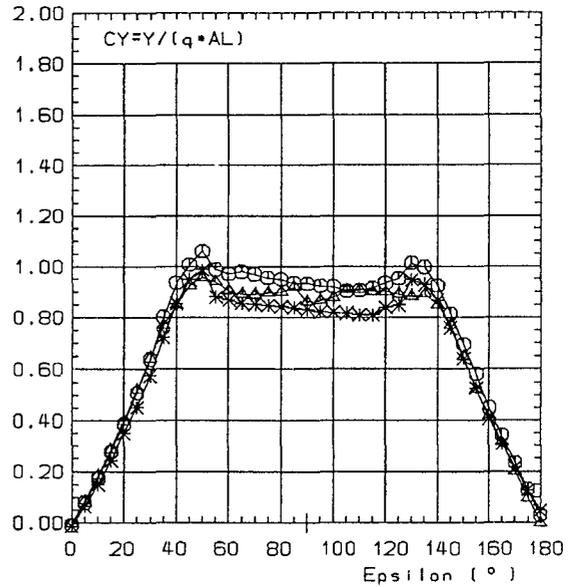
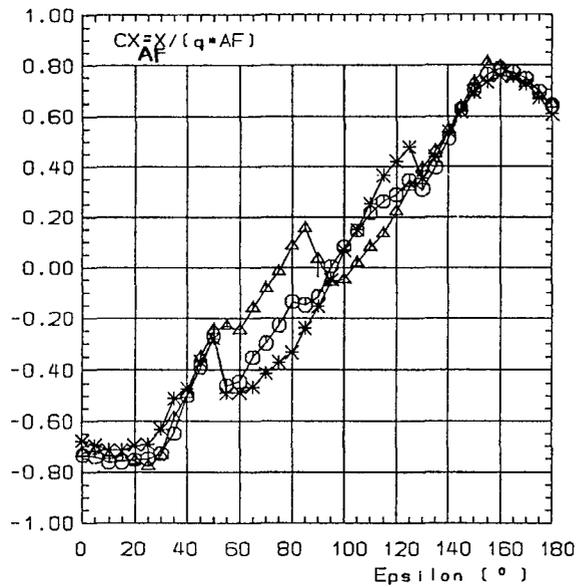
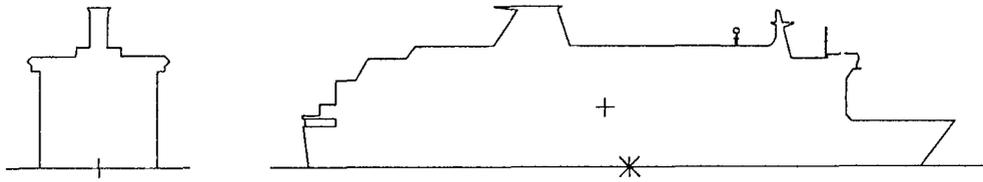


Bild 46: Reduzierter Beiwert des Längswiderstands von Schiffen, verglichen mit den Werten in gleichförmiger Strömung; Bezugsstaudruck: mittlerer Staudruck über der mittleren Höhe (a), Staudruck in der mittleren Höhe (b)

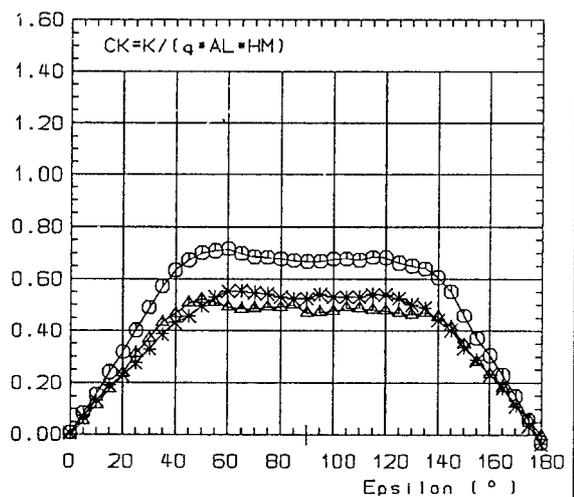
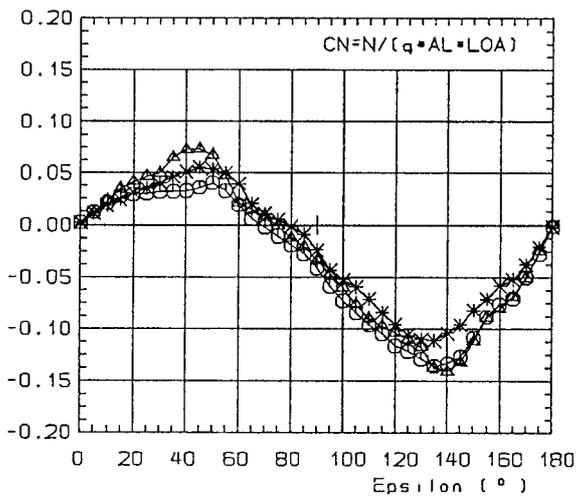
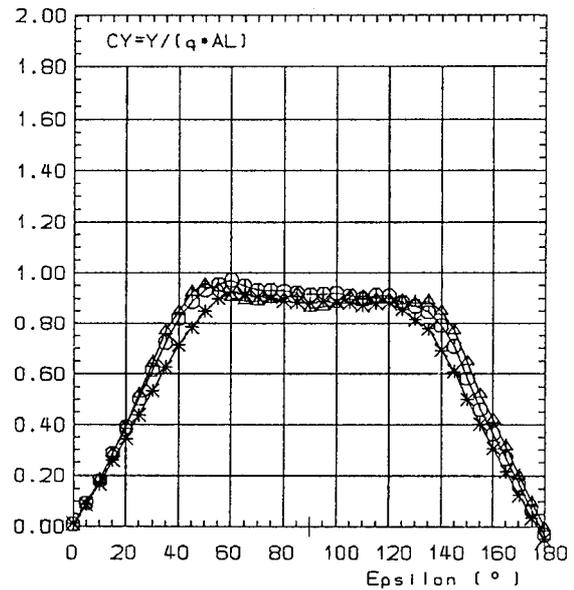
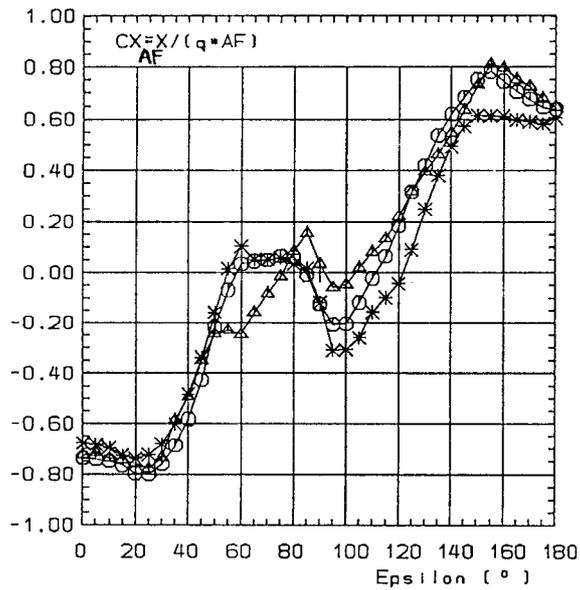
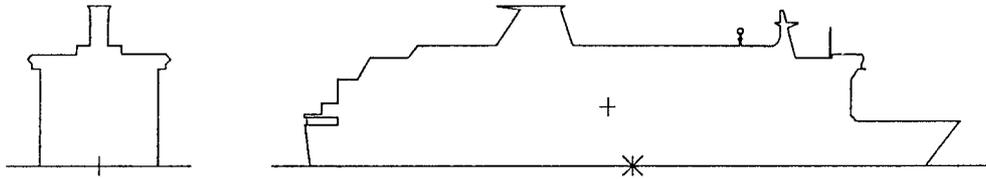
Krängung nach Luv



$\Delta 0^\circ, \circ 15^\circ, * 30^\circ$

Bild 47: Fährschiff, Beiwerte der Windlast bei Krängung nach Luv; $L_{pp}=144.00$ m, $L_{oa}=161.00$ m, $B=29.00$ m, $T=6.05$ m, $A_L=4223.30$ m², $A_F=898.20$ m², s_L gegenüber Hauptspant=-5.90 m, s_H über der Wasserlinie =14.85 m

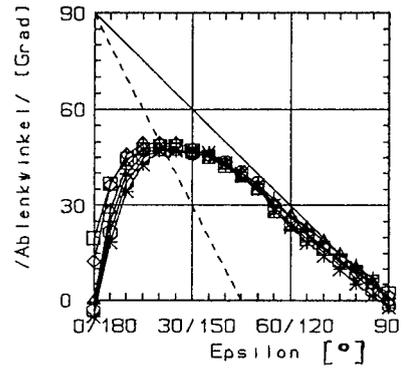
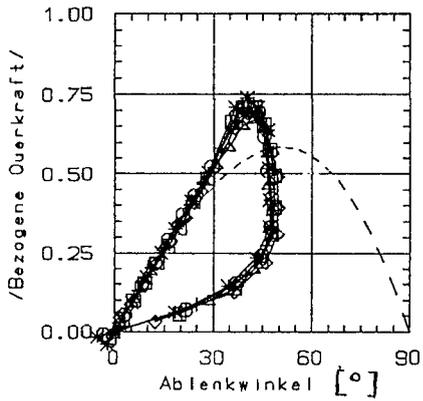
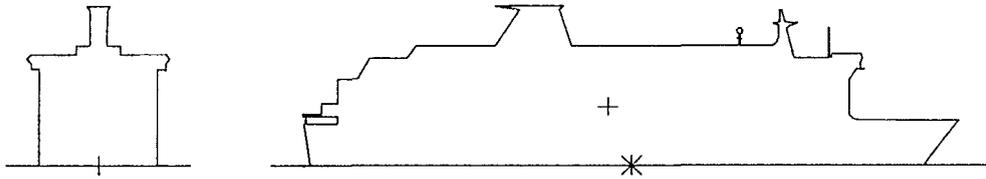
Krängung nach Lee



Δ 0°, \circ 15°, $*$ 30°

Bild 48: Fährschiff, Beiwerte der Windlast bei Krängung nach Lee; $L_{pp}=144.00$ m, $L_{oa}=161.00$ m, $B=29.00$ m, $T=6.05$ m, $A_L=4223.30$ m², $A_F=898.20$ m², s_L gegenüber Hauptspant=-5.90 m, s_H über der Wasserlinie =14.85 m

Krängung nach Luv



Anströmung: vorlich achterlich

- | | | |
|-----|---|---|
| 0° | + | △ |
| 15° | o | ◇ |
| 30° | * | □ |

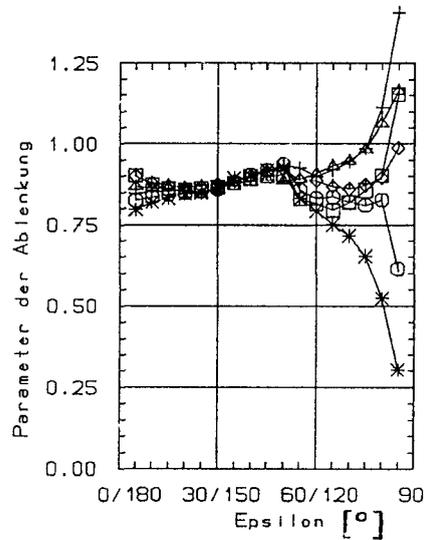
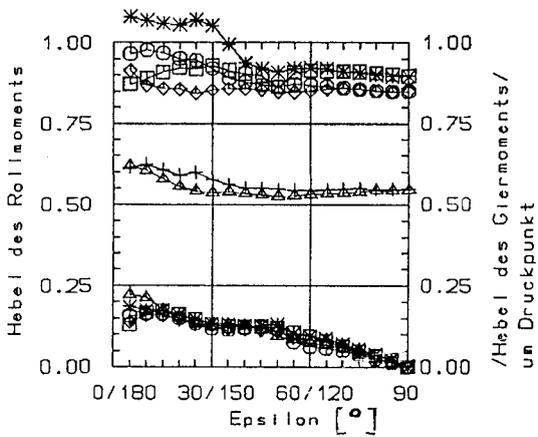


Bild 49: Windlast am gekrängten Fährschiff in kennzeichnender Auftragung, Krängung nach Luv

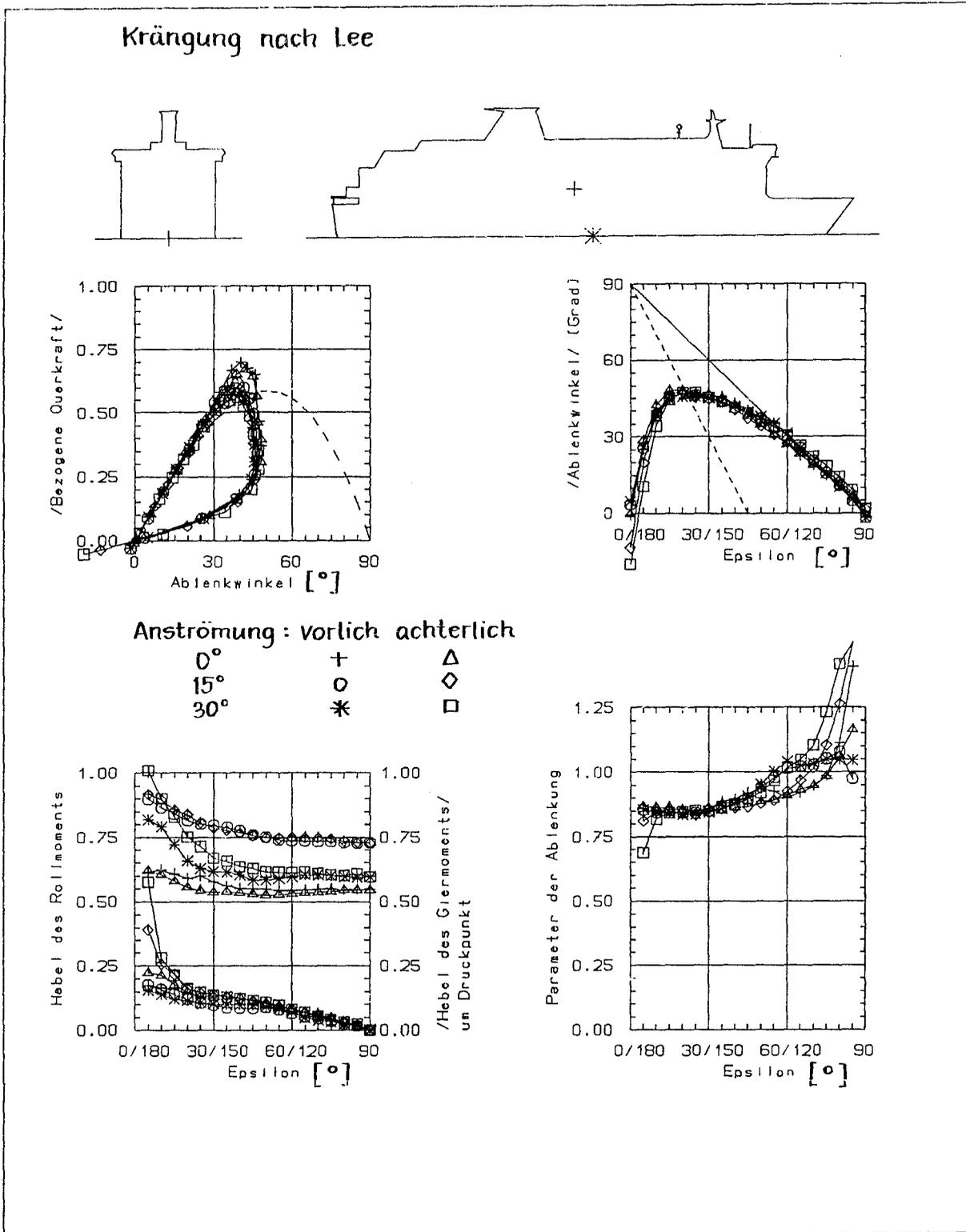


Bild 50: Windlast am gekrängten Fährschiff in kennzeichnender Auftragung, Krängung nach Lee

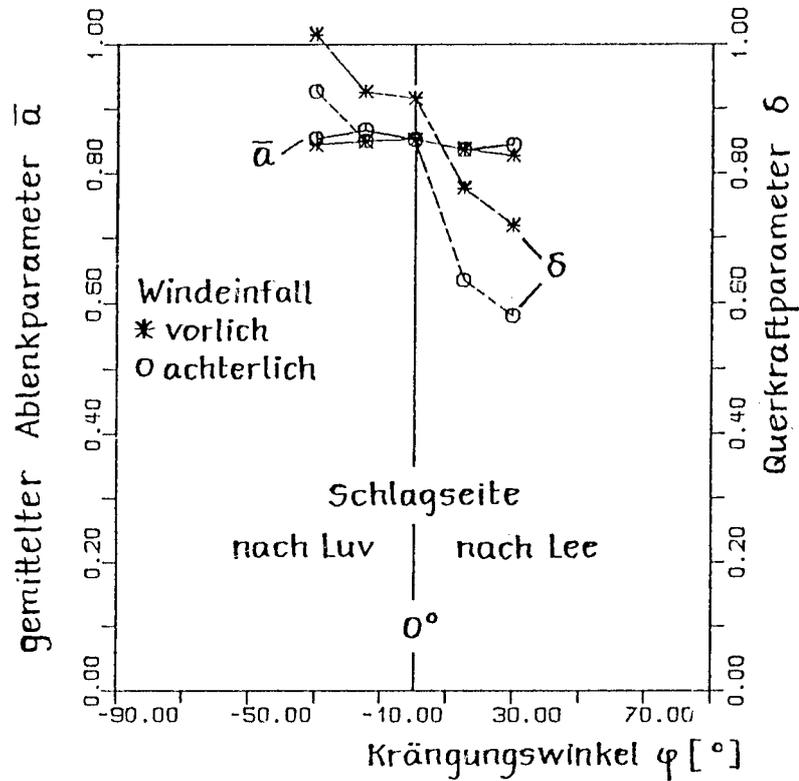


Bild 51: Gemittelter Ablenparameter $\bar{\alpha}$ und Querkraftparameter δ über dem Krängungswinkel φ für ein Fährschiff

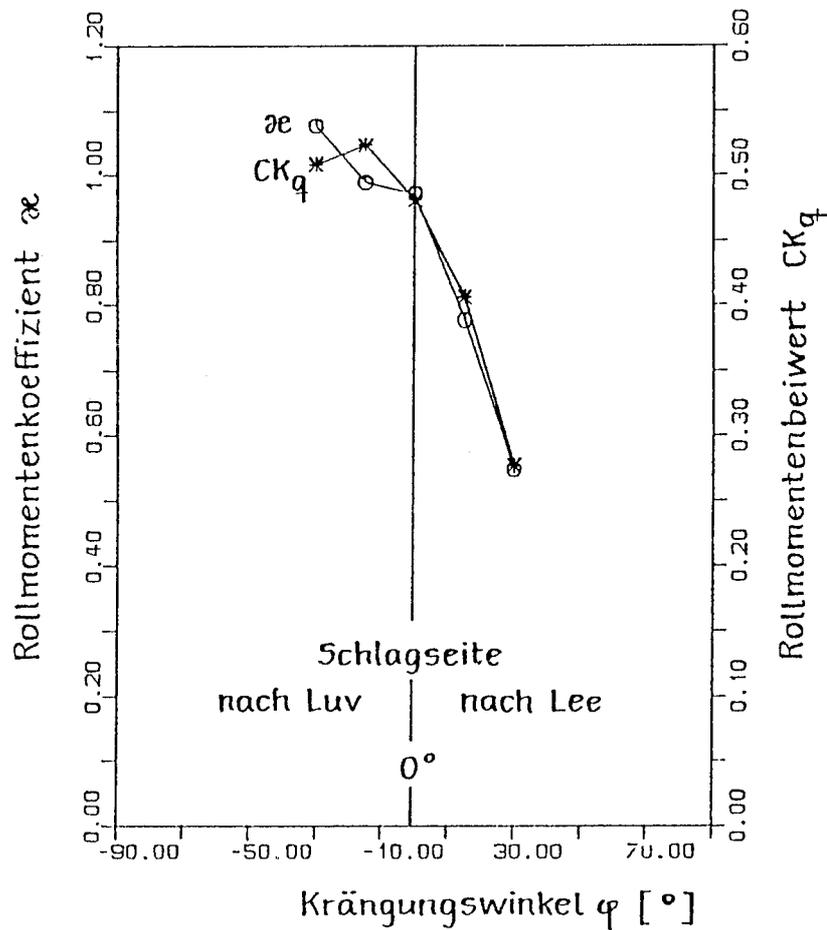


Bild 52: Rollmomentenfaktor κ und Rollmomentenbeiwert CK_q über dem Krängungswinkel φ für ein Fährschiff

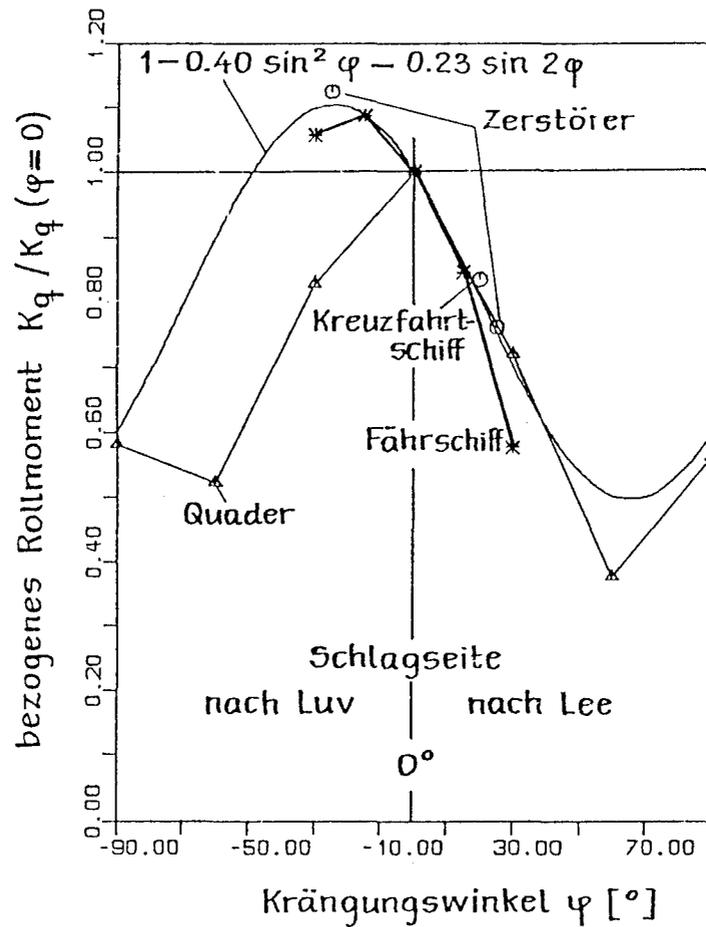


Bild 53: Bezogenes Windrollmoment bei Seitenwind, $K_q/K_q(\varphi = 0)$, über dem Krängungswinkel φ

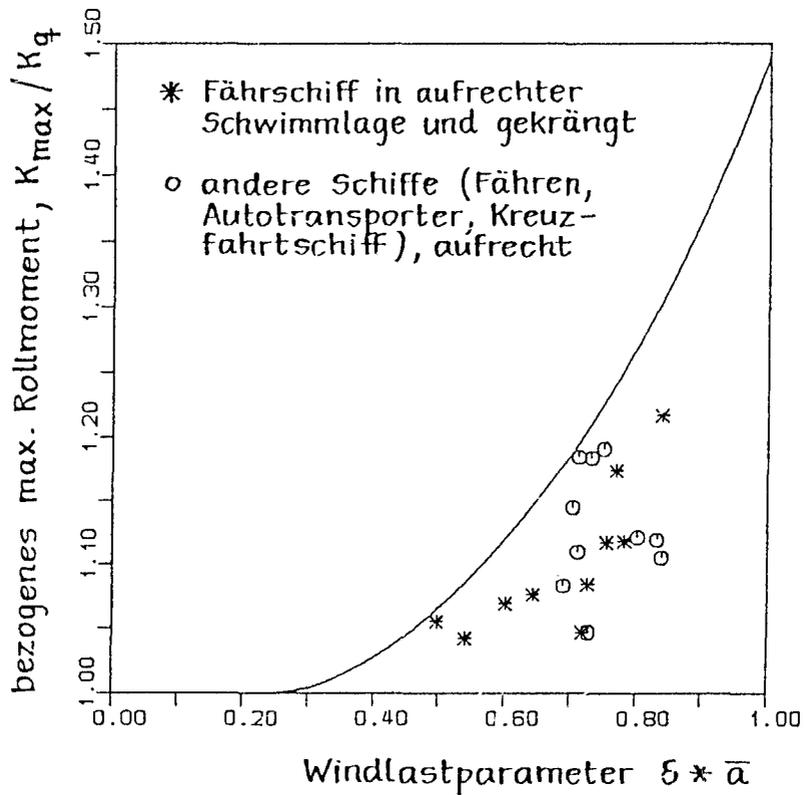


Bild 54: Maximales Windrollmoment an Schiffen mit hoher, geschlossener Lateralfäche, bezogen auf das Rollmoment bei Seitenwind, K_{max}/K_q , über Parametern der Windlast, $\delta * \bar{a}$

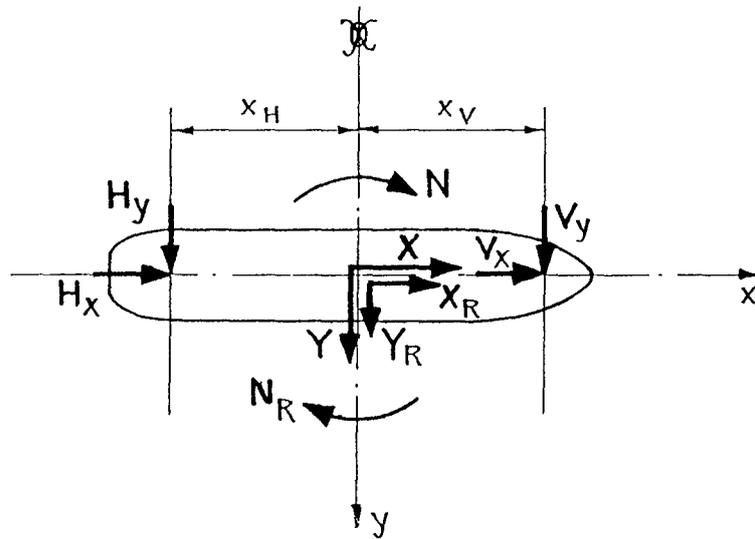


Bild 55: Mit Strahlapparat im Wind operierendes Schiff

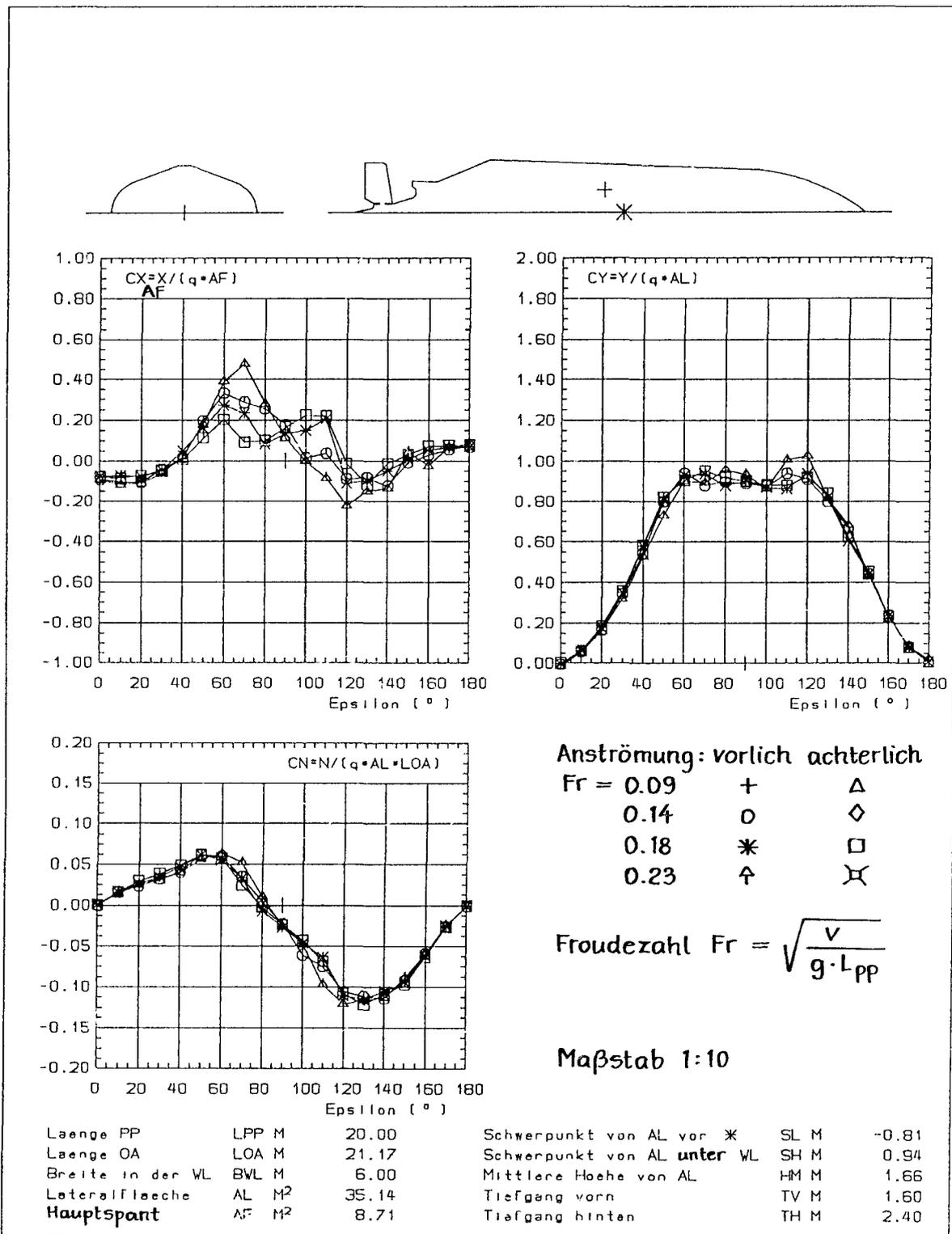
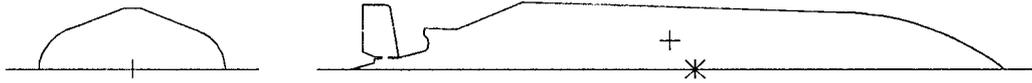
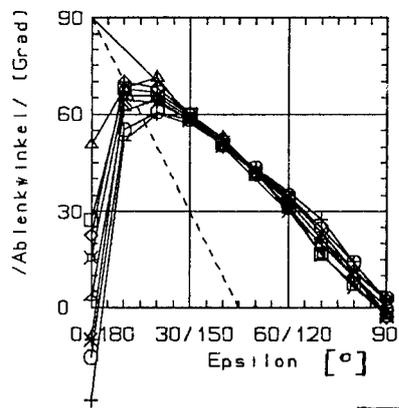
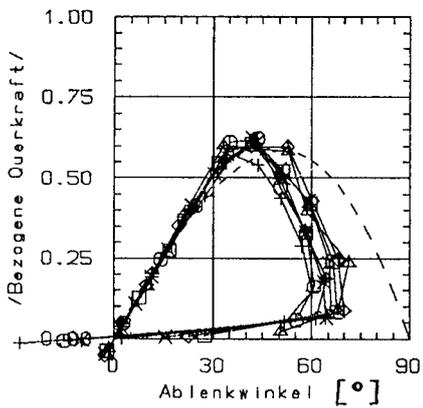


Bild 56: Strömungskräfte am Rumpf eines Frachtseglers (Indosail) aus dem Schleppversuch; Beiwerte von Längskraft, Seitenkraft und Giermoment



Laenge PP	LPP M	20.00	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-0.81
Laenge OA	LOA M	21.17	Schwerpunkt von AL unter WL	SH M	0.94
Breite in der WL	BWL M	6.00	Mittlere Hoehe von AL	HM M	1.66
Lateralflaeche	AL M ²	35.14	Tiefgang vorn	TV M	1.60
Hauptspant	AF M ²	8.71	Tiefgang hinten	TH M	2.40

Masstab 1:10



Anströmung: vorlich achterlich

Fr = 0.09	+	△
0.14	○	◇
0.18	*	□
0.23	↑	⊗

$$\text{Froudezahl } Fr = \sqrt{\frac{v}{g \cdot l_{PP}}}$$

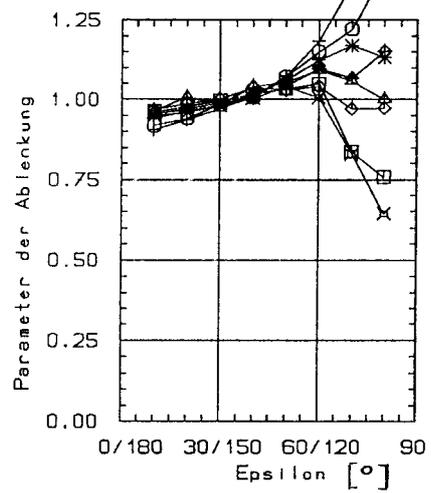
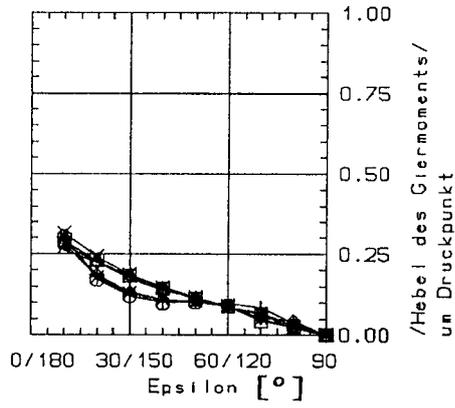
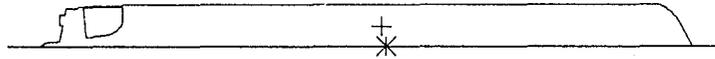
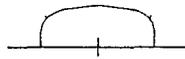


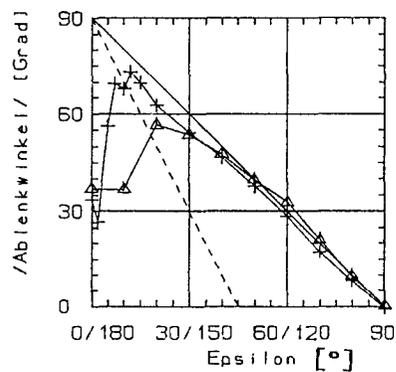
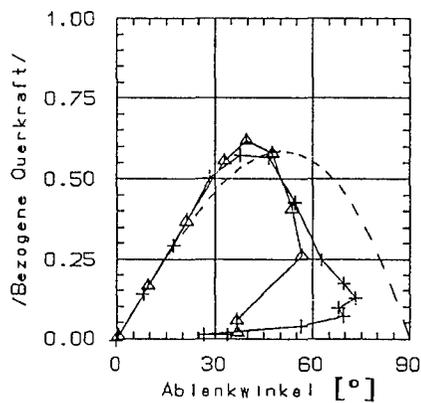
Bild 57: Strömungskräfte am Rumpf eines Frachtseglers (Indosail) in kennzeichnender Auftragung



Laenge PP	LPP M	72.70	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-0.60
Laenge OA	LOA M	77.30	Schwerpunkt von AL unter WL	SH M	2.42
Breite in der WL	BWL M	13.50	Mittlere Hoehle von AL	HM M	4.52
Lateralflaeche	AL M ²	350.54	Tiefgang vorn	TV M	5.00
Hauptspant	AF M ²	59.30	Tiefgang hinten	TH M	5.00

Maassstab 1:75

RE-Zahl 1.25E+06



Anströmung: + vorlich Δ achterlich

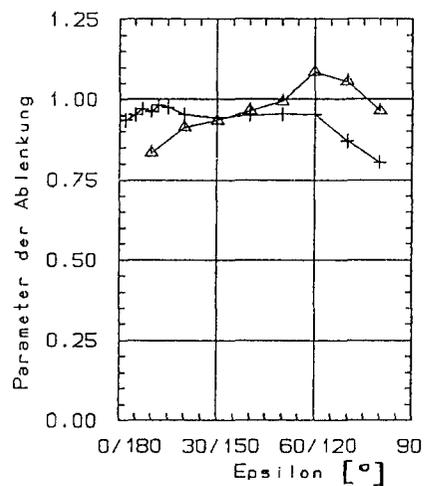
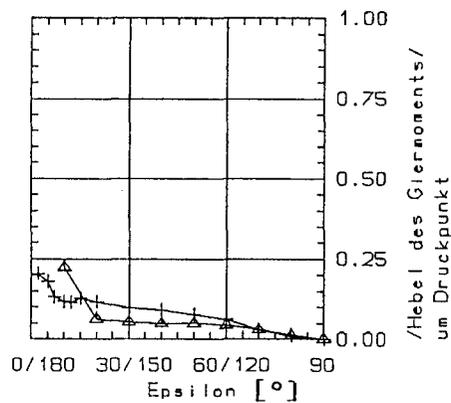


Bild 58: Strömungskräfte am Rumpf eines Forschungsschiffs in kennzeichnender Auftragung, Windkanalmessung

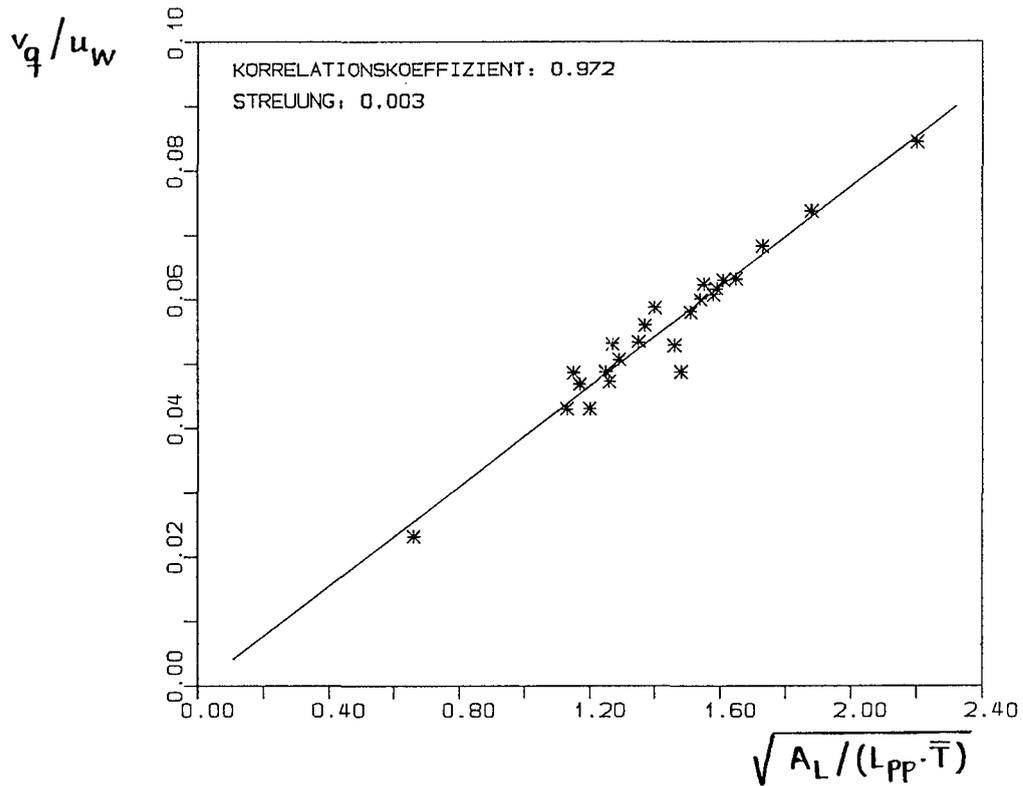


Bild 59: Geschwindigkeit der Querdrift, bezogen auf die Windgeschwindigkeit, über der Wurzel aus dem Verhältnis der Lateralfächen über und unter Wasser ($L_{PP} \cdot \bar{T} \approx A_{LR}$)

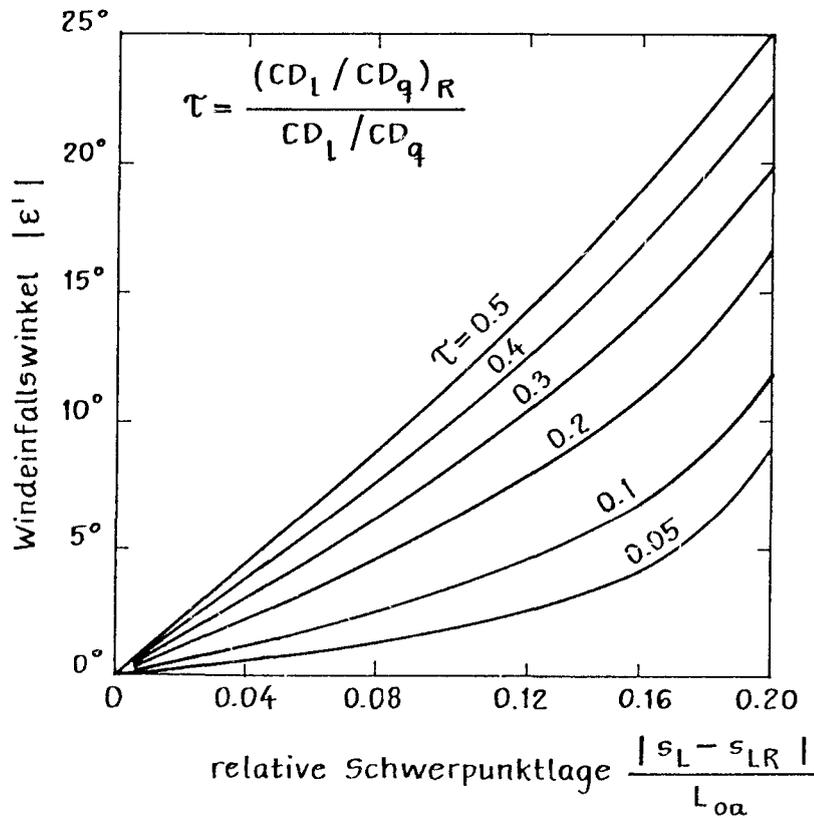


Bild 60: Windeinfallswinkel ε' am driftenden Schiff über der bezogenen horizontalen Distanz des Lateralschwerpunkts über und unter Wasser

$$\tilde{V}_y = \frac{x_V - x_H}{L_{oa}} \frac{V_{ymax}}{CD_q * q * A_L} = f\left(\frac{|s_L - x_H|}{L_{oa}}\right)$$

$$\tilde{H}_y = \frac{x_V - x_H}{L_{oa}} \frac{H_{ymax}}{CD_q * q * A_L} = f\left(\frac{|s_L - x_V|}{L_{oa}}\right)$$

$$\tilde{V}'_y = \frac{x_V - s_{LR}}{L_{oa}} \frac{V'_{ymax}}{CD_q * q * A_L} = f\left(\frac{|s_L - s_{LR}|}{L_{oa}}\right)$$

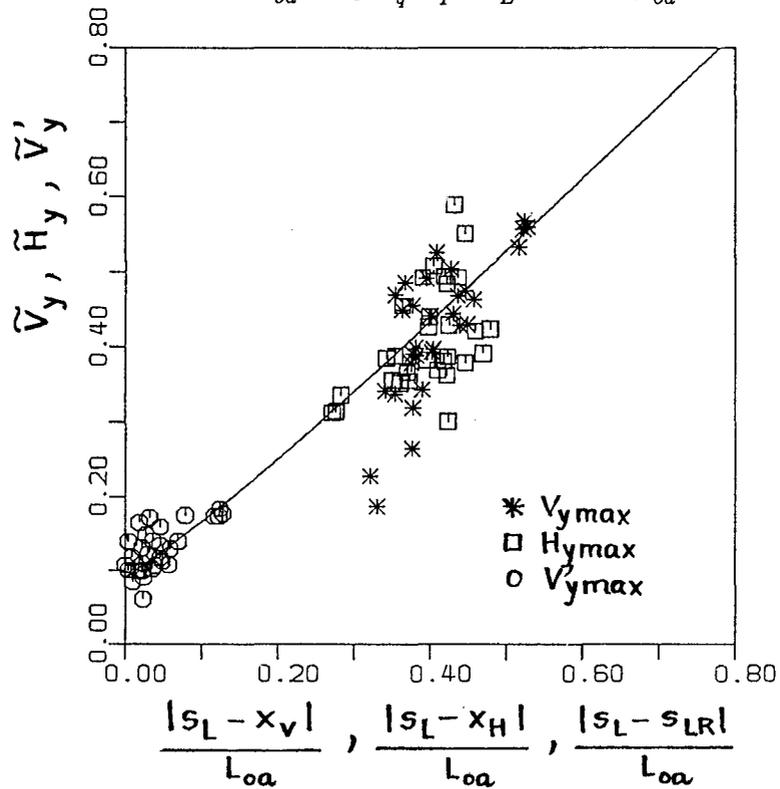


Bild 61: Mindestschub zum Positionieren (V_y , H_y) und zum Stützen (V'_y) eines Schiffs im Wind

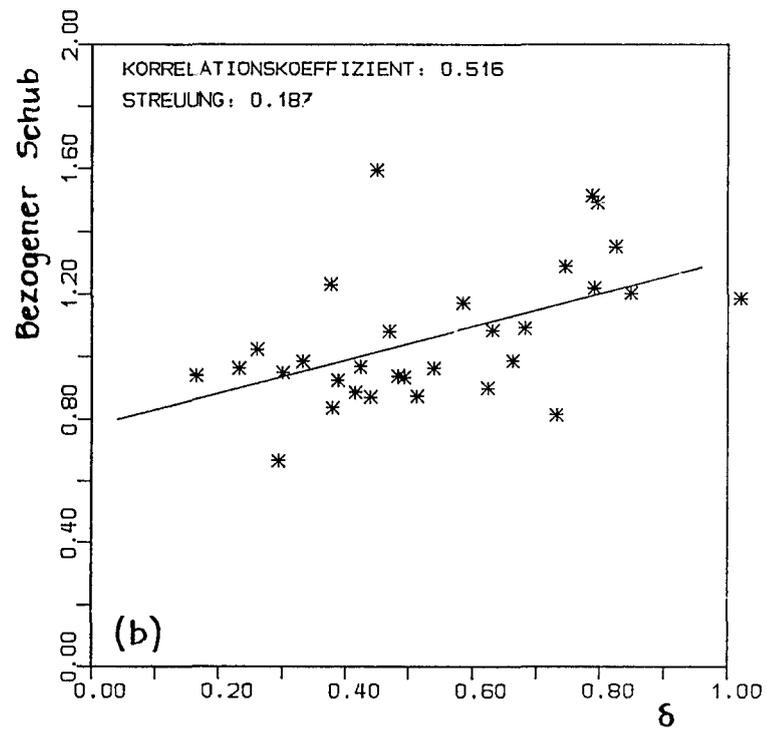
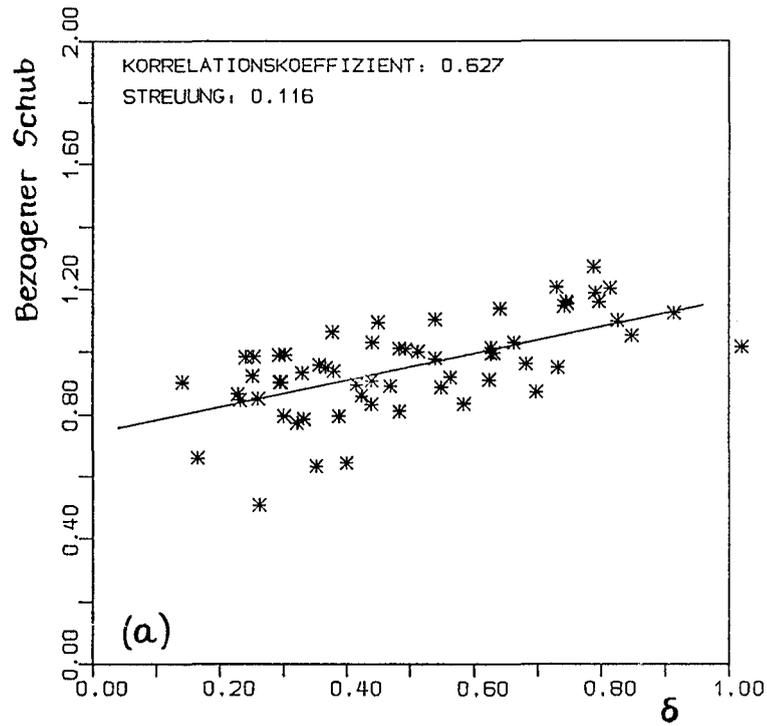


Bild 62: Mindestschub zum Positionieren (a) und zum Stützen eines Schiffs im Wind (b), bezogen auf angenäherte Werte, über dem Querkraftparameter

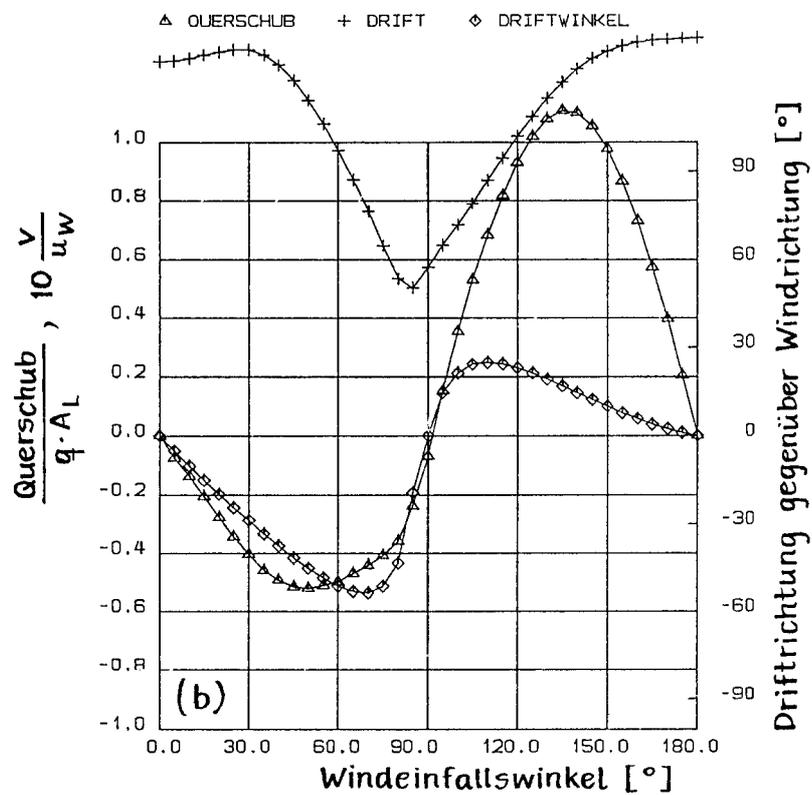
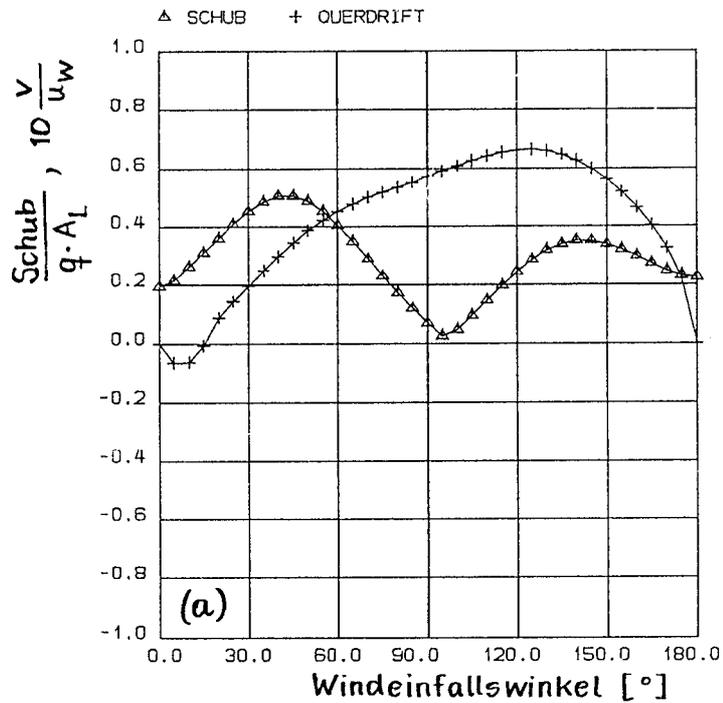


Bild 63: Stützen im Wind am Beispiel eines Forschungsschiffs (RES0201BN); horizontaler Schub eines Azimutstrahlers sowie Geschwindigkeit der Querdrift (a) und Schub eines Querstrahlers sowie Driftgeschwindigkeit und Driftwinkel (b)

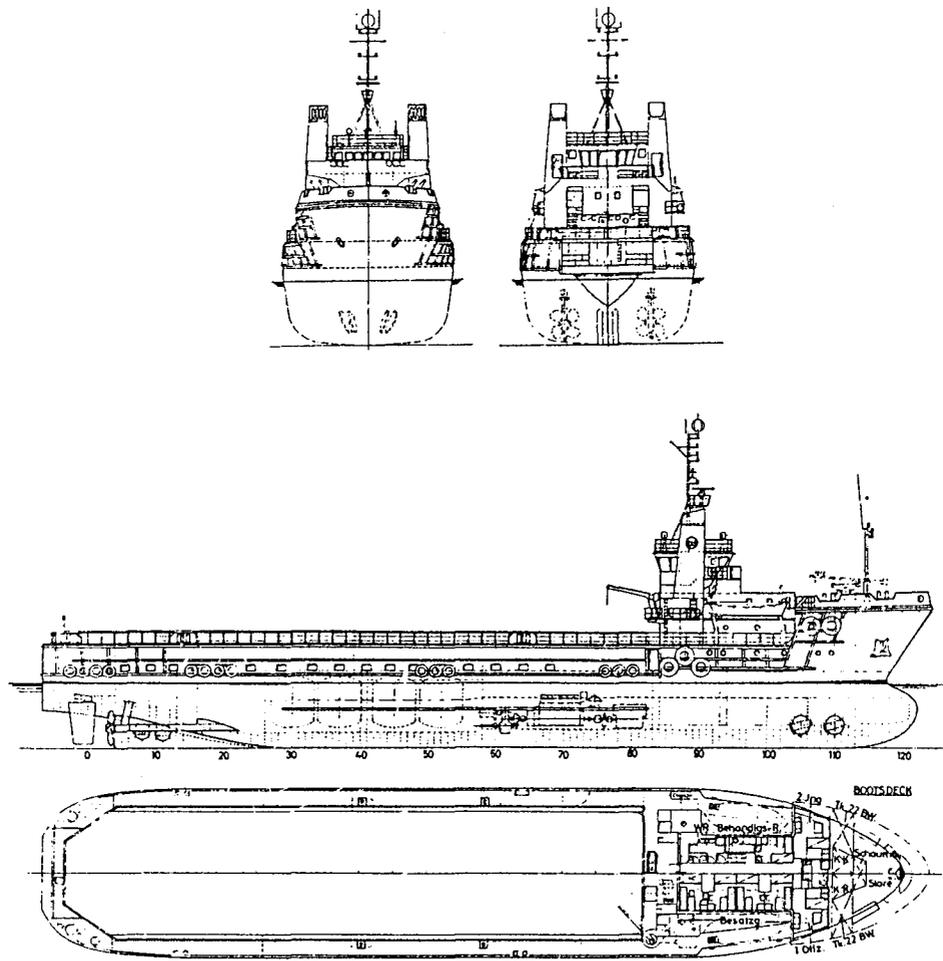


Bild 64: Röhrentransporter KREUZTURM

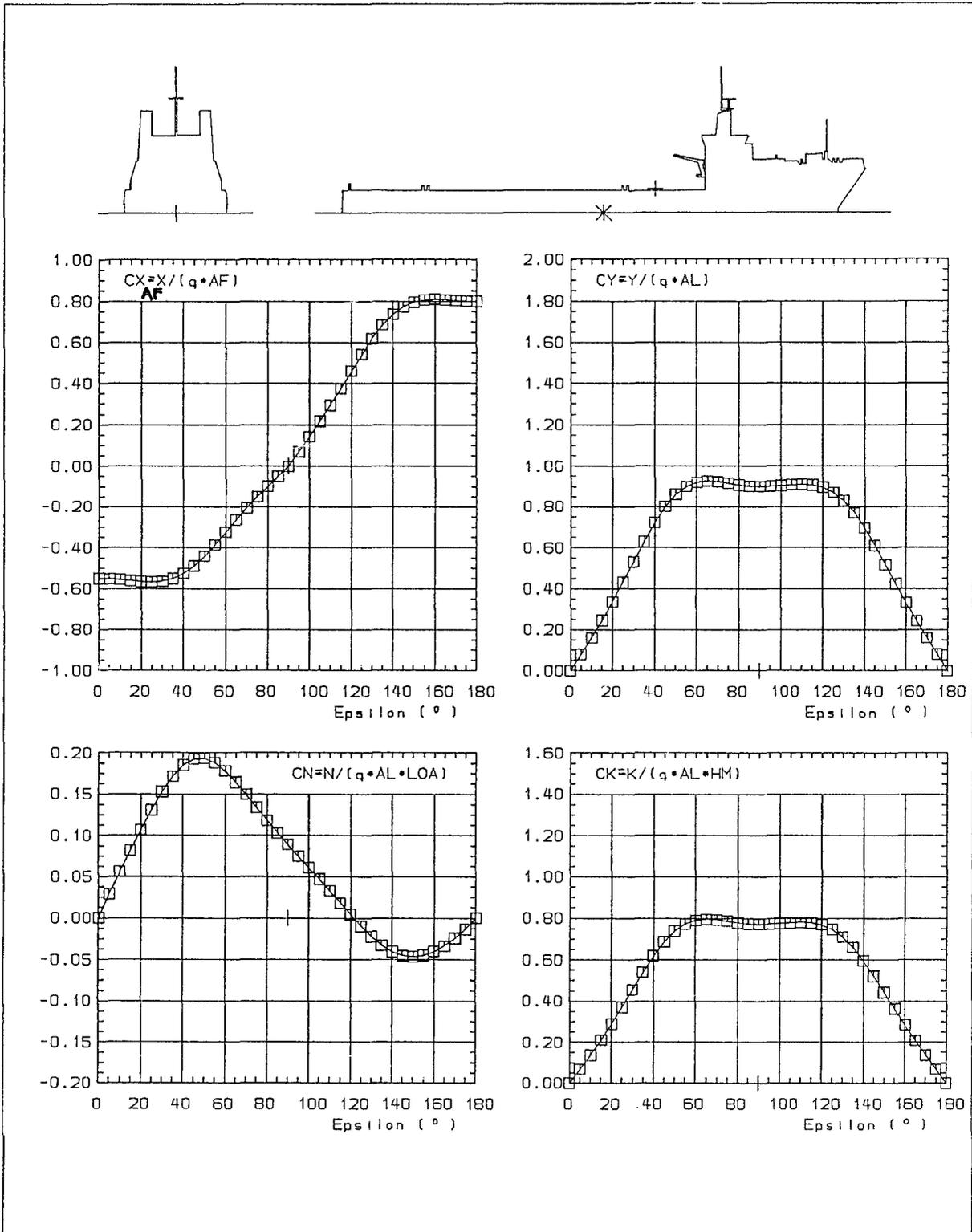


Bild 65: Windlastbeiwerte eines Röhrentransporters (Rechnung)

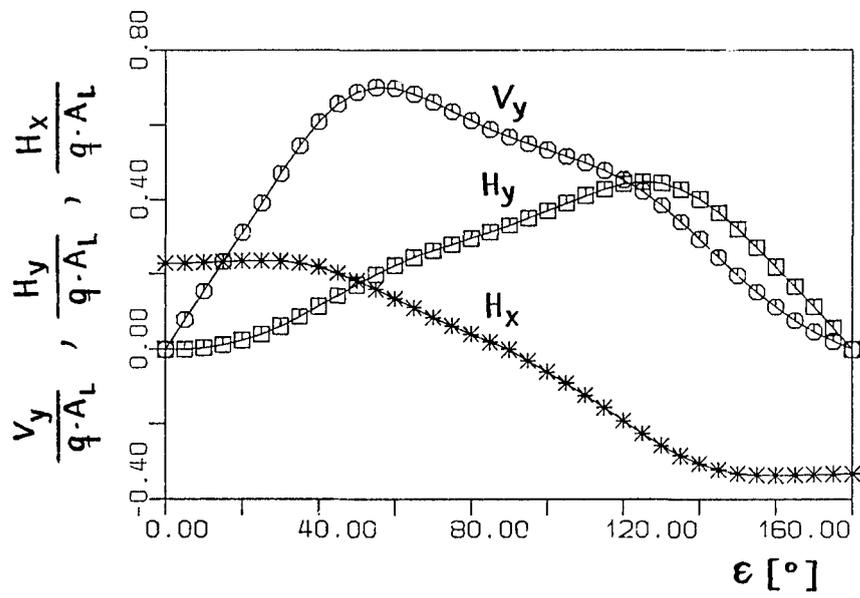
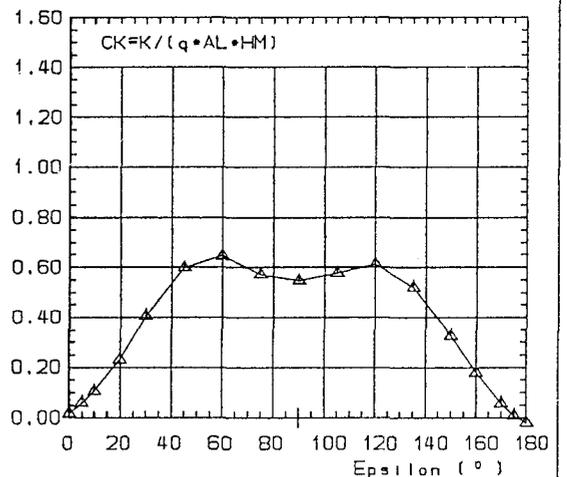
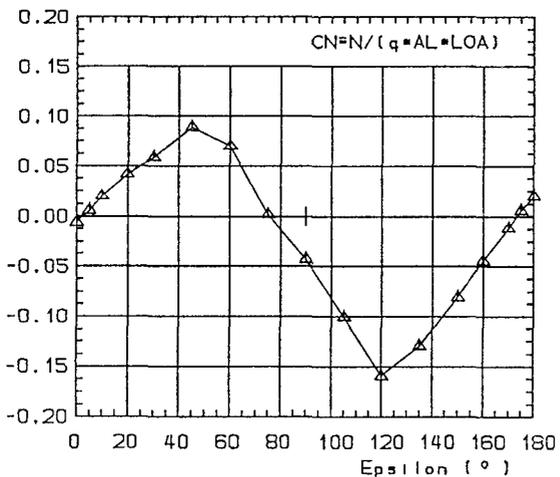
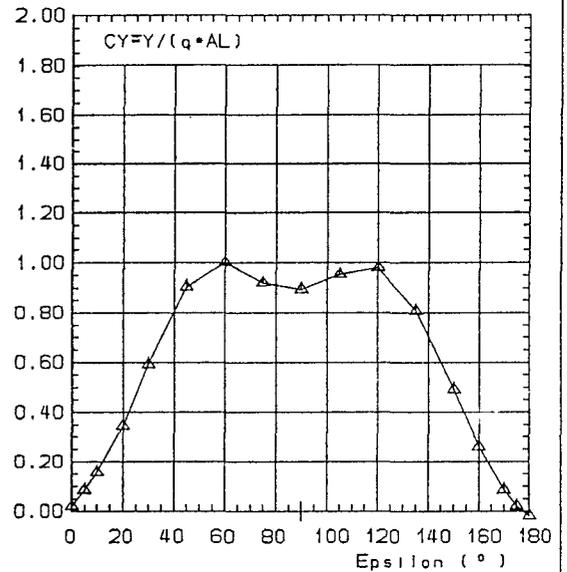
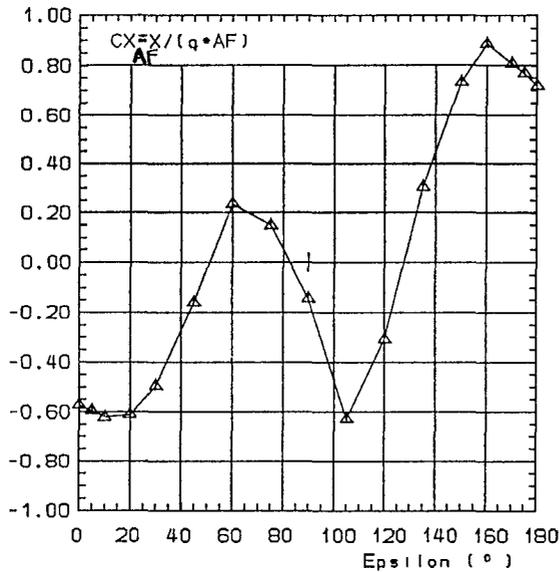
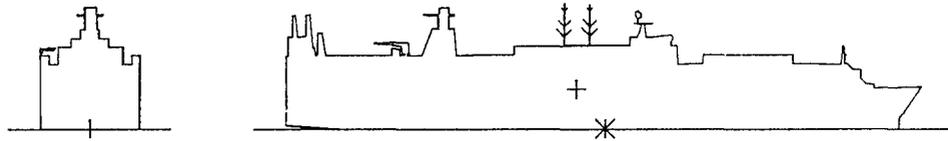


Bild 66: Schub längs und quer zum Positionieren eines Röhrentransporters im Wind als Funktion des Windeinfallswinkels

Anhang: Windlastbeiwerte

Bild		Kennung	Quelle
A.1	Autotransporter	CAR0201BN	IS
A.2	Containerschiff, voll	CON0101BN	IS
A.3	Containerschiff, leer	CON0104BN	IS
A.4	Containerschiff, teilbeladen	CON0107BN	IS
A.5	Containerschiff, voll	CON0201BN	IS
A.6	Containerschiff, leer	CON0202BN	IS
A.7	Cargo/Containerschiff	CON0301BN	IS
A.8	Taucherbasisschiff	DIV0101BJ	IS
A.9	Bohrschiff	DRI0101BN	IS
A.10	Fäherschiff	FER0201BN	IS
A.11	Fäherschiff	FER0301BN	IS
A.12	Fischkutter	FIS0101BN	Aage (71)
A.13	Frachtschiff, beladen	FRE0101BN	Aage (71)
A.14	Frachtschiff, leer	FRE0102BN	Aage (71)
A.15	Frachtschiff, beladen	FRE0201BN	Aage (71)
A.16	Frachtschiff, Container an Deck	FRE0202BN	Aage (71)
A.17	Forschungsschiff	RES0201BN	IS
A.18	Schnellboot	SPE0102BN	IS
A.19	Offshore-Versorgungsschiff	SUP0101BN	IS
A.20	Offshore-Versorgungsschiff	SUP0107BN	IS
A.21	Gastanker, beladen	TAG0101BN	IS
A.22	Gastanker, in Ballast	TAG0102BN	IS
A.23	Tanker, beladen	TAN0201BN	IS
A.24	Tanker, in Ballast	TAN0202BN	IS
A.25	Quader, geneigt nach Luv	OBJ0101BN	IS
A.26	Quader, geneigt nach Lee	OBJ0101SN	IS

IS = Messung Institut für Schiffbau der Universität Hamburg



Laenge PP LPP M 180.00
 Laenge OA LOA M 195.00
 Breite in der WL BWL M 30.00
 Lateralflaeche AL M² 4584.16
 Frontflaeche AF M² 811.68

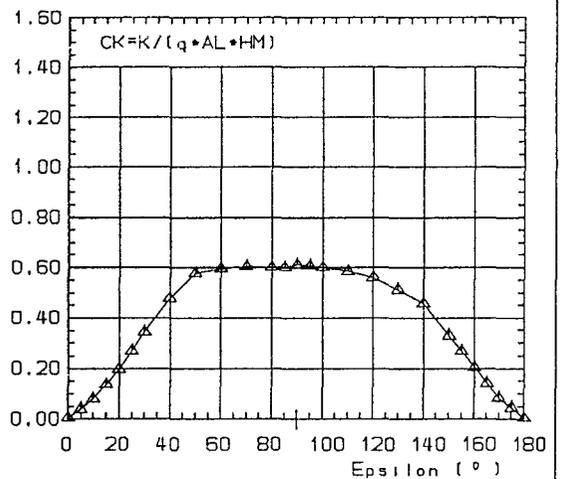
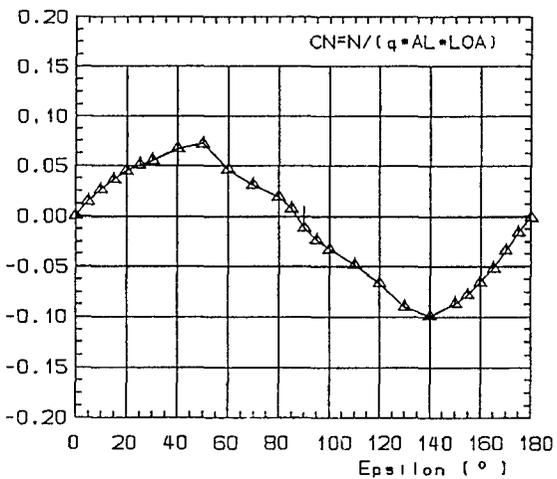
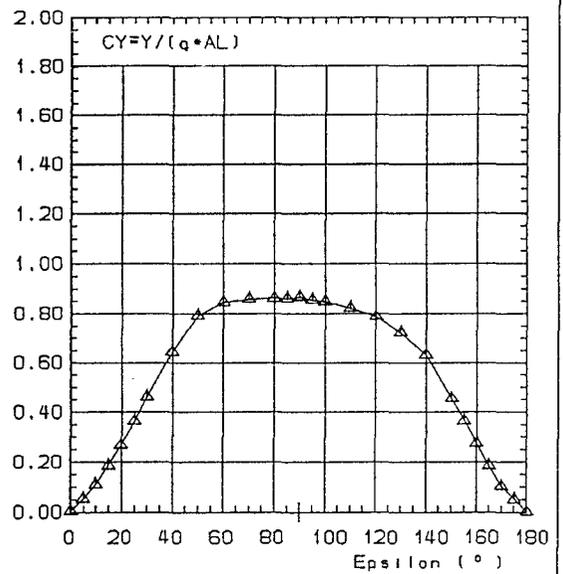
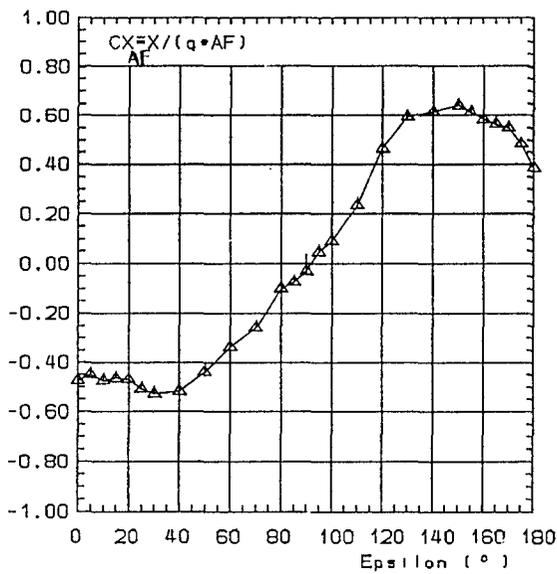
Schwerpunkt von AL vor * SL M -8.98
 Schwerpunkt von AL ueber WL SH M 12.56
 Mittlere Hoehe von AL HM M 23.51
 Tiefgang vorn TV M 8.50
 Tiefgang hinten TH M 8.50

Masstab 1:150 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.69E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON - 0°: WIND VON VORN $0 - \rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich * , CK bezueglich WL

Kennung
CAR0201BN

A.1 Autotransporter

Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg



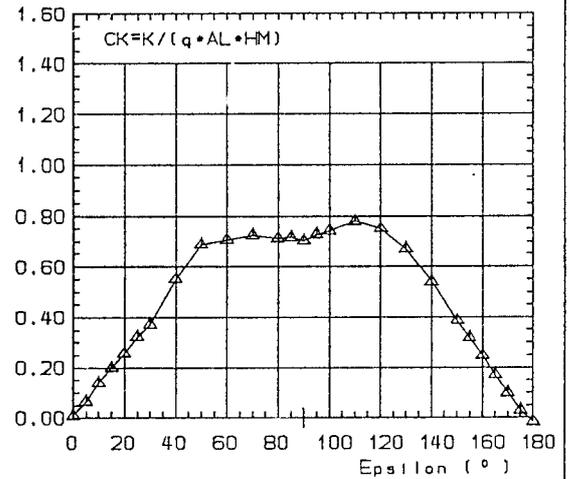
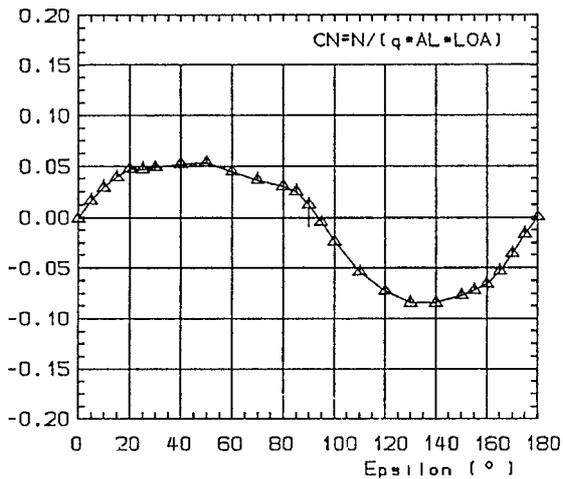
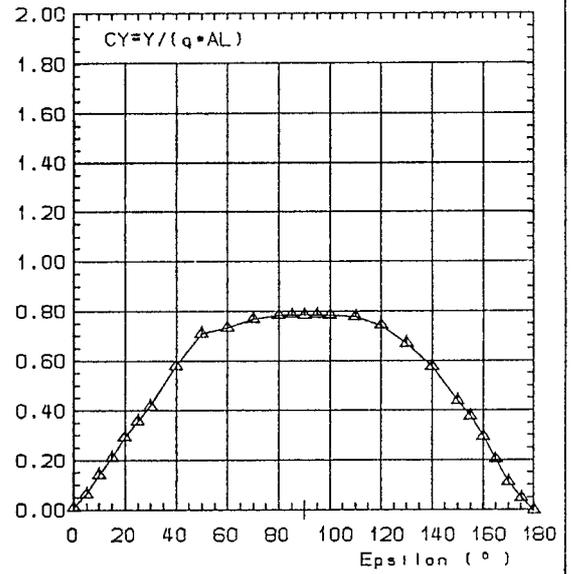
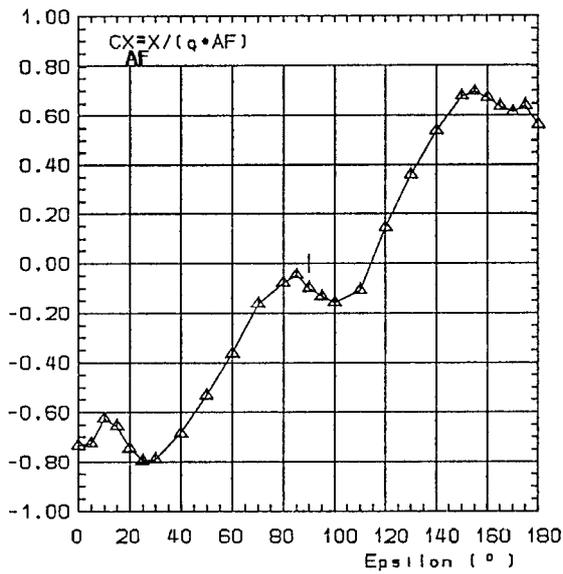
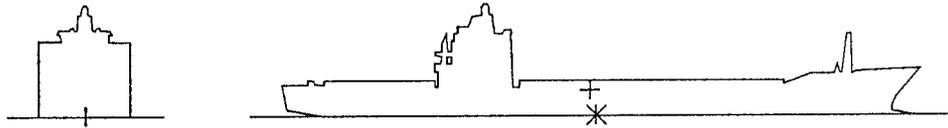
Laenge PP	LPP M	194.51	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-3.87
Laenge OA	LOA M	210.75	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	10.08
Breite in der WL	BWL M	30.50	Mittlere Hoehe von AL	HM M	17.80
Lateralflaeche	AL M ²	3751.11	Tiefgang vorn	TV M	11.60
Frontflaeche	AF M ²	801.97	Tiefgang hinten	TH M	11.60

Massstab 1:150 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.10E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 - ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
CON0101BN

A.2 Containerschiff, voll

Institut fuer
Schiffbau
Universitaet Hamburg



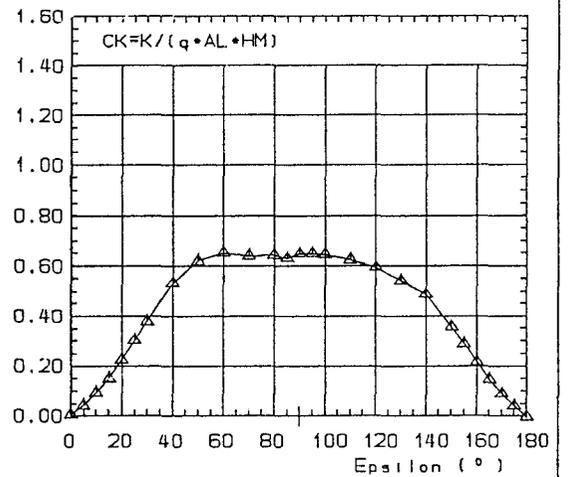
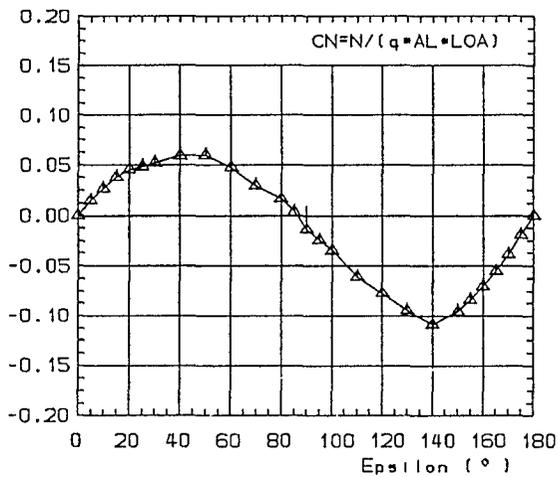
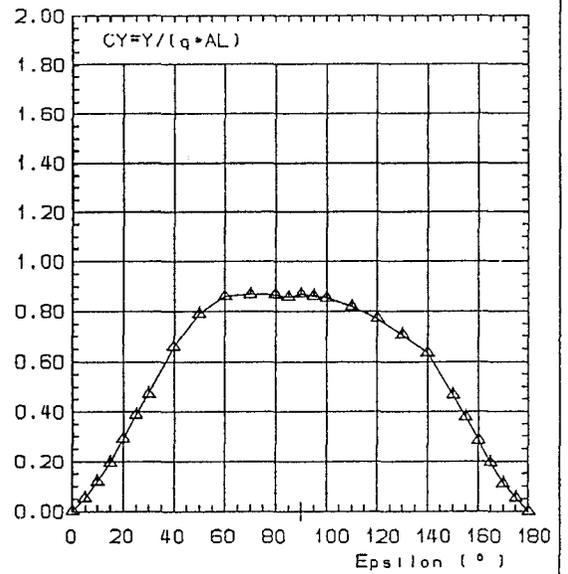
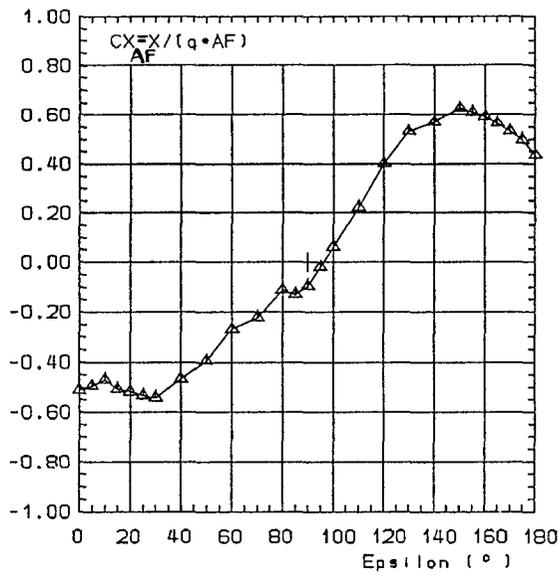
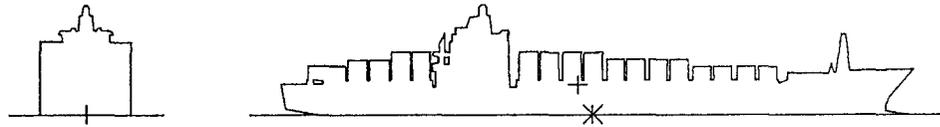
Laenge PP	LPP M	194.51	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-2.14
Laenge OA	LOA M	210.75	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	8.67
Breite in der WL	BWL M	30.50	Mittlere Hoehe von AL	HM M	13.98
Lateralfloechen	AL M ²	2947.30	Tiefgang vorn	TV M	9.60
Frontfloechen	AF M ²	857.06	Tiefgang hinten	TH M	9.60

Massstab 1:150 Kruegung 0.0° RE-Zahl 2.10E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 = ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
CON0104BN

A.3 Containerschiff, leer

Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg



Laenge PP LPP M 194.51
 Laenge OA LOA M 210.75
 Breite in der WL BWL M 30.50
 Lateralflaeche AL M² 3773.51
 Frontflaeche AF M² 857.06

Schwerpunkt von AL vor * SL M -4.87
 Schwerpunkt von AL ueber WL SH M 10.22
 Mittlere Hoehe von AL HM M 17.91
 Tiefgang vorn TV M 9.60
 Tiefgang hinten TH M 9.60

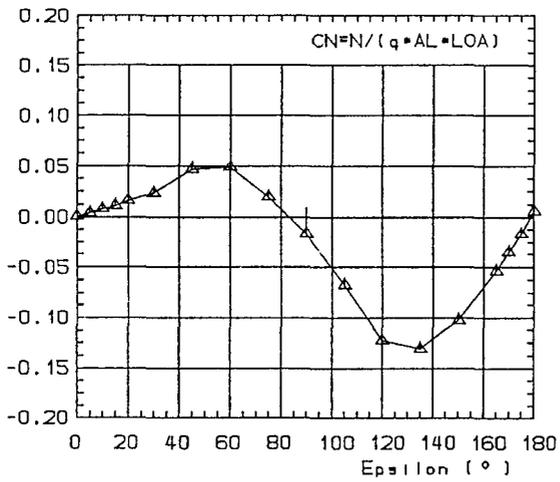
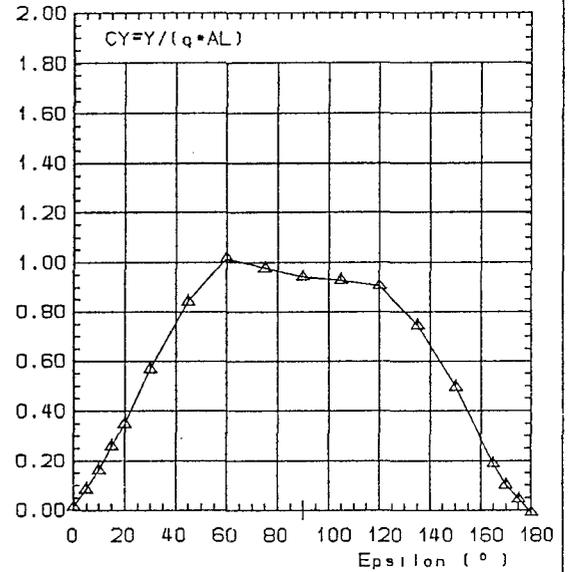
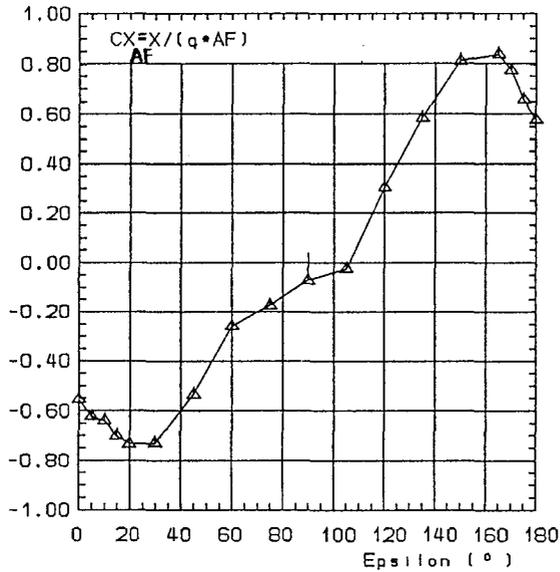
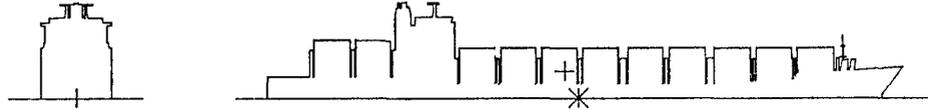
Maasstab 1:150 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.10E+06
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Windprofil gleichfoermig
 $0 = \rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES

Kennung
CON0107BN

A.4 Containerschiff, teilbeladen

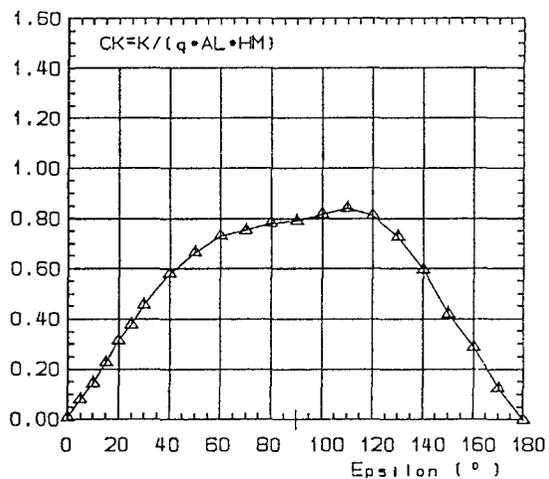
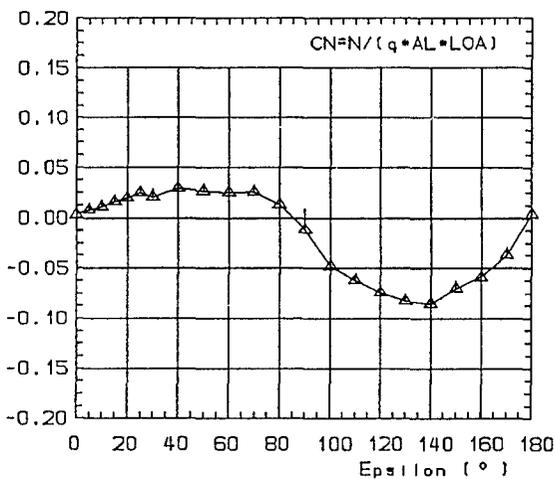
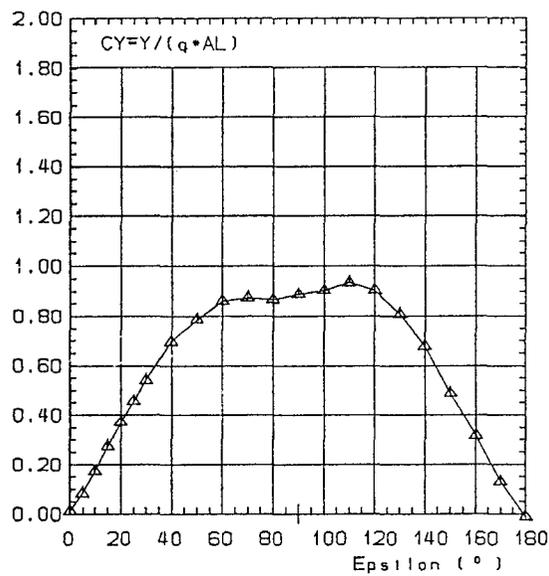
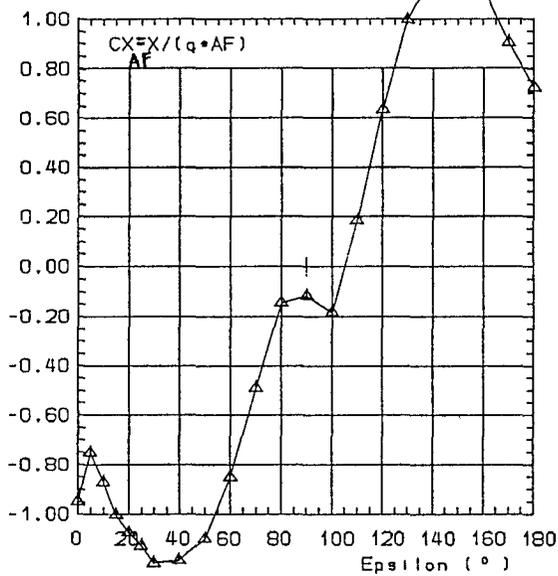
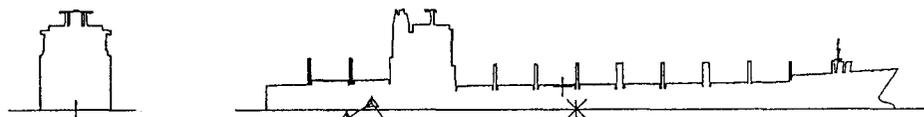
Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg



Laenge PP	LPP M	206.50	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-4.86
Laenge OA	LOA M	216.40	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	9.38
Breite in der WL	BVL M	23.77	Mittlere Hoehe von AL	HM M	16.46
Lateralflaeche	AL M ²	3562.72	Tiefgang vorn	TV M	9.14
Frontflaeche	AF M ²	674.06	Tiefgang hinten	TH M	9.14

Masstab 1:144 Kraengung 0.0° RE-Zahl 3.10E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON - 0°: WIND VON VORN $0 = \rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung CON0201BN	A.5 Containerschiff, voll	Institut fuer Schiffbau Universitaet Hamburg
-----------------------------	------------------------------	--



Laenge PP LPP M 206.50
 Laenge OA LOA M 216.40
 Breite in der WL BWL M 23.77
 Lateralfleache AL M² 2601.84
 Frontfleache AF M² 710.84

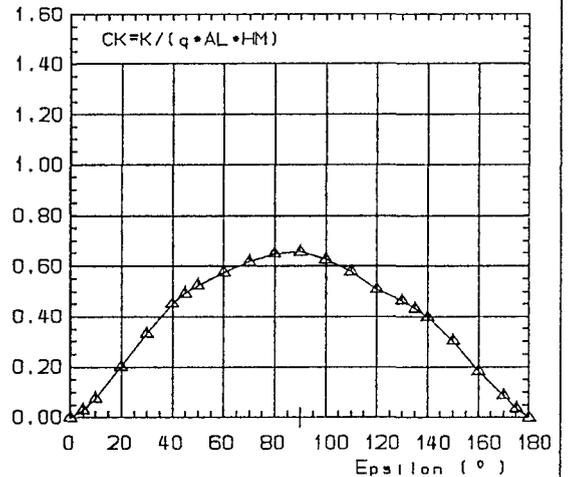
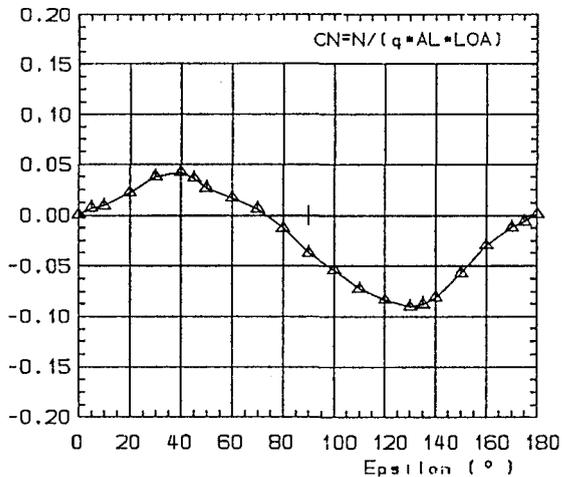
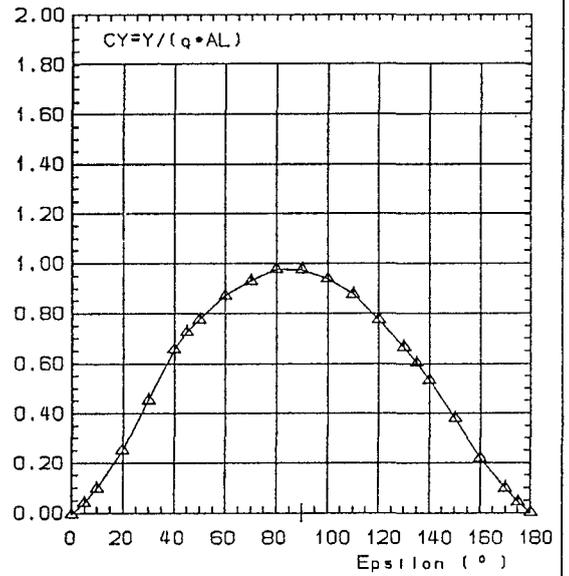
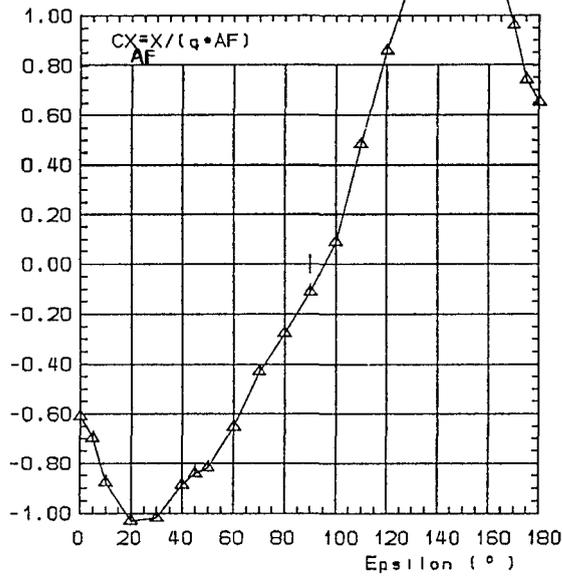
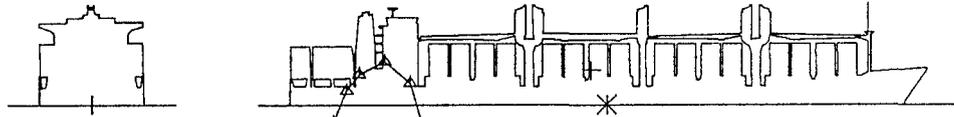
Schwerpunkt von AL vor * SL M -4.70
 Schwerpunkt von AL ueber WL SH M 7.90
 Mittlere Hoehe von AL HM M 12.02
 Tiefgang vorn TV M 5.87
 Tiefgang hinten TH M 8.00

Maassstab 1:144 Kraengung 0.0° RE-Zahl 3.70E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON - 0°: WIND VON VORN $q = \rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
CON0202BN

A.6 Containerschiff, leer

Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg



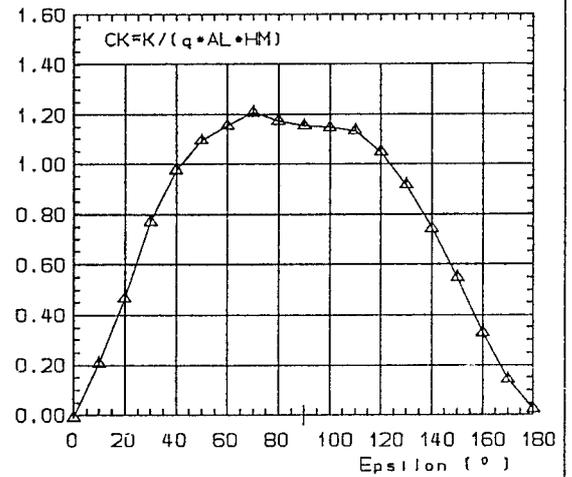
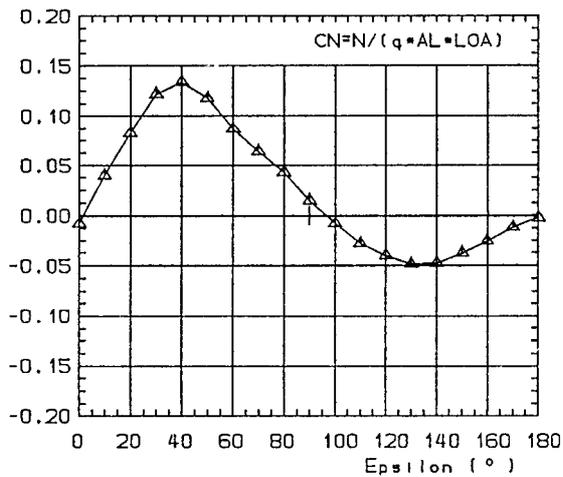
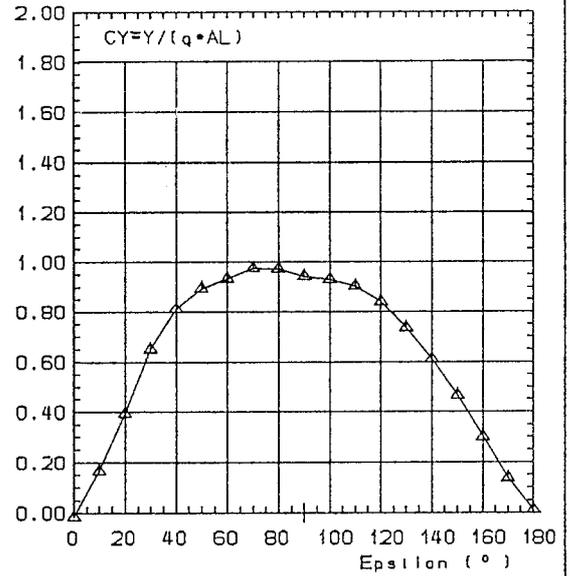
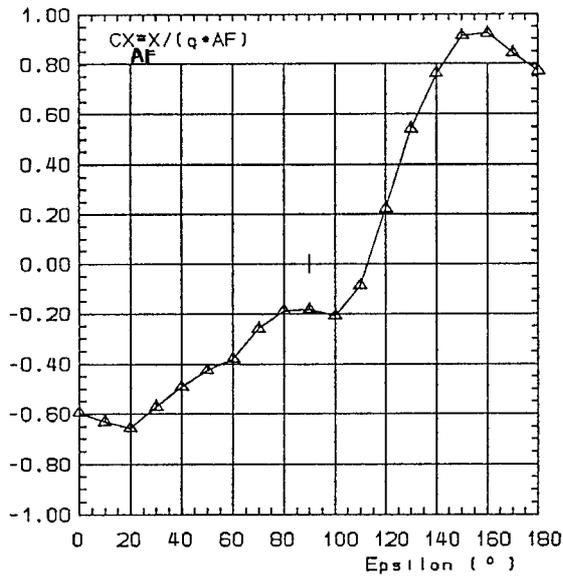
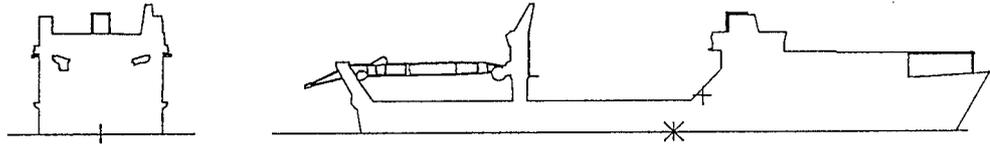
Laenge PP	LPP M	187.30	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-4.92
Laenge OA	LOA M	198.25	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	11.07
Breite in der WL	BWL M	32.20	Mittlere Hoehe von AL	HM M	18.61
Lateralflaeche	AL M ²	3689.73	Tiefgang vorn	TV M	12.20
Frontflaeche	AF M ²	826.32	Tiefgang hinten	TH M	12.20

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.7 Cargo/Containerschiff

Institut fuer
Schiffbau
Universitaet Hamburg

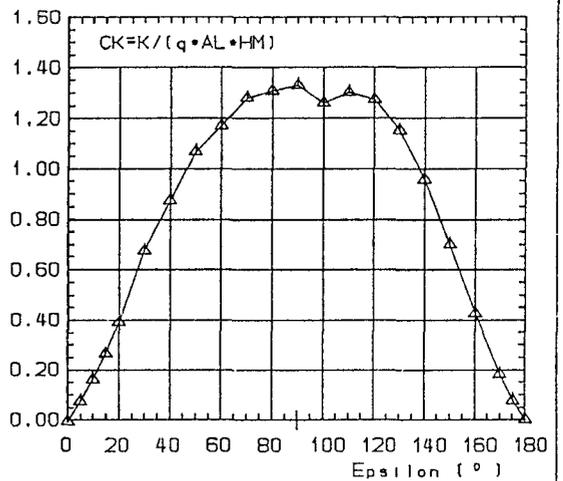
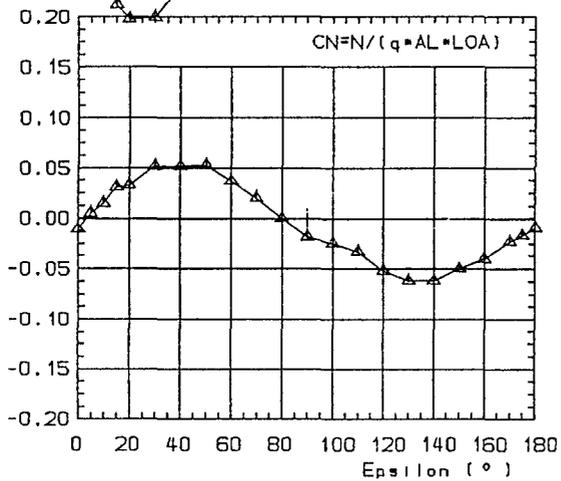
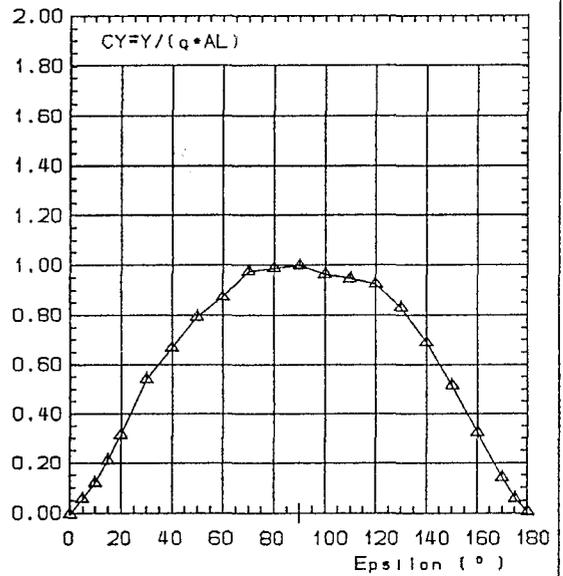
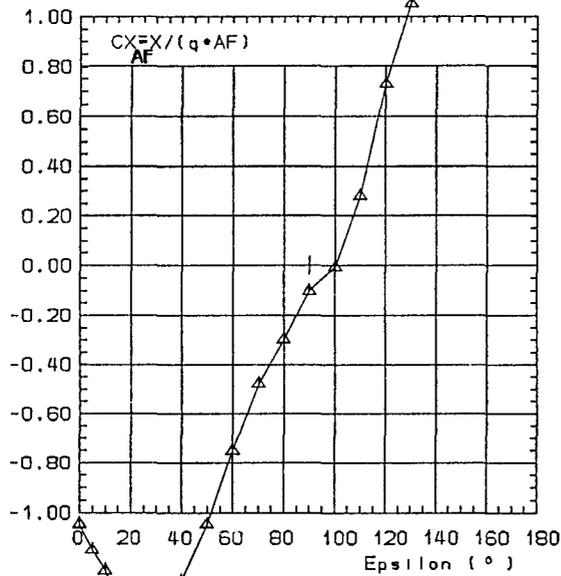
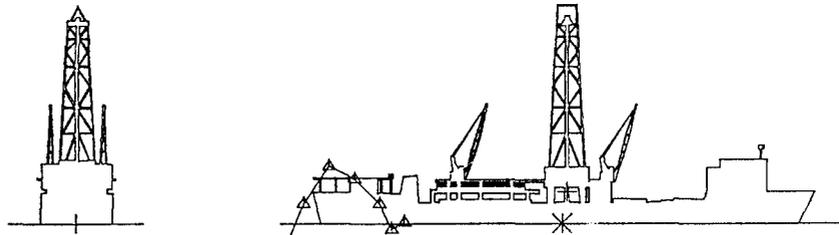


Laenge PP	LPP M	90.00
Laenge OA	LOA M	101.00
Breite in der WL	BWL M	19.60
Lateralflaeche	AL M ²	946.09
Frontflaeche	AF M ²	344.37

Schwerpunkt von AL vor *	SL M	4.64
Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	6.08
Mittlere Hoehe von AL	HM M	9.37
Tiefgang vorn	TV M	5.50
Tiefgang hinten	TH M	5.50

Massstab 1:200 Kraengung 0.0° RE-Zahl 1.50E+06 Windprofil 1/11 Bezugshoehe 10 M
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 - ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung DIV0101BJ	A.8 Taucherbasissschiff	Institut fuer Schiffbau Universitaet Hamburg
-----------------------------	--------------------------------	--



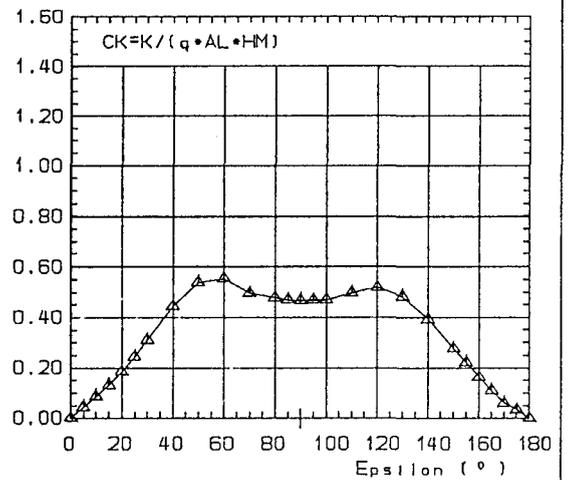
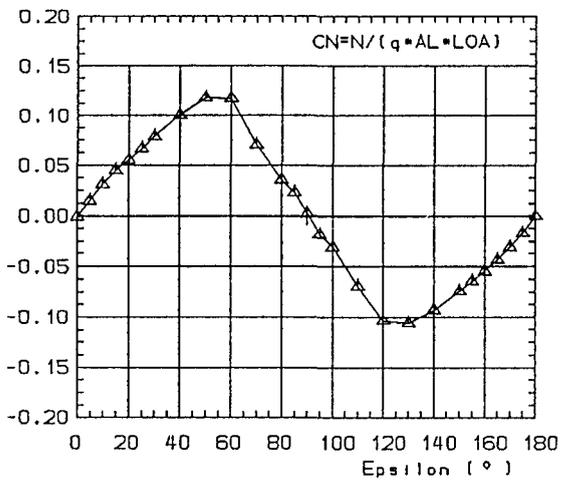
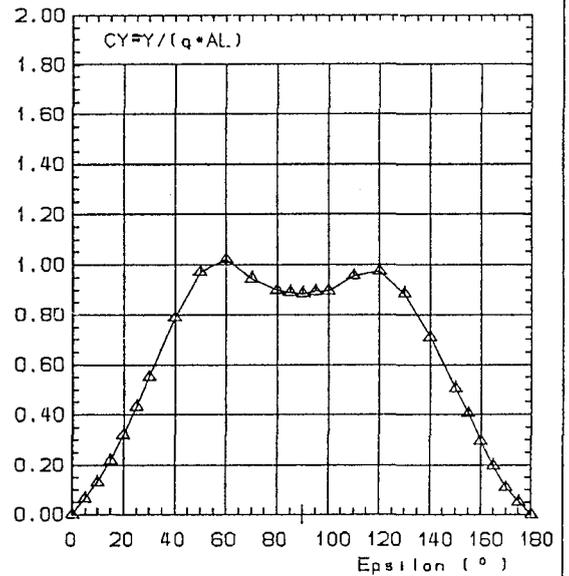
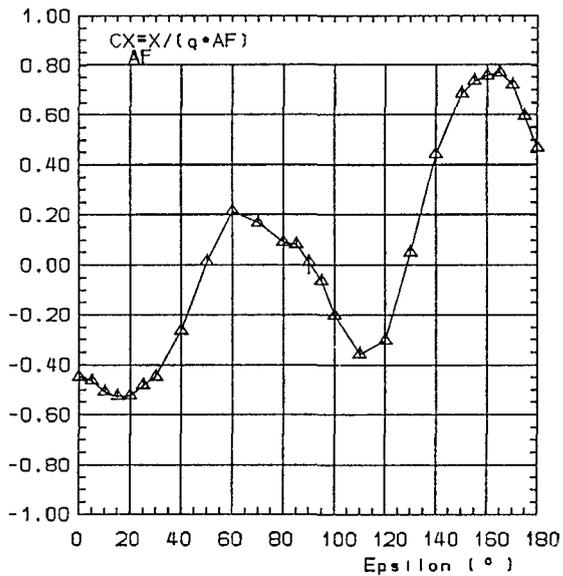
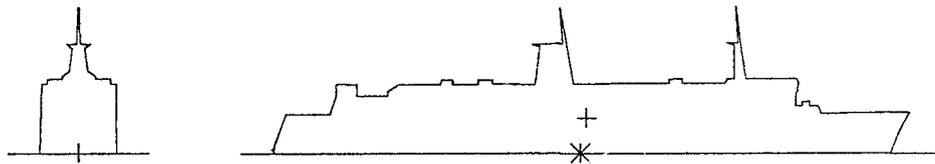
Laenge PP	LPP M	137.00	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	1.22
Laenge OA	LOA M	150.10	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	9.59
Breite in der WL	BWL M	21.35	Mittlere Hoehe von AL	HM M	12.47
Lateralflaeche	AL M ²	1872.00	Tiefgang vorn	TV M	7.00
Frontflaeche	AF M ²	556.41	Tiefgang hinten	TH M	7.00

Massstab 1:100 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.87E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON - 0°: WIND VON VORN 0 - ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
DRI0101BN

A.9 Bohrschiff

Institut fuer
Schiffbau
Universitaet Hamburg



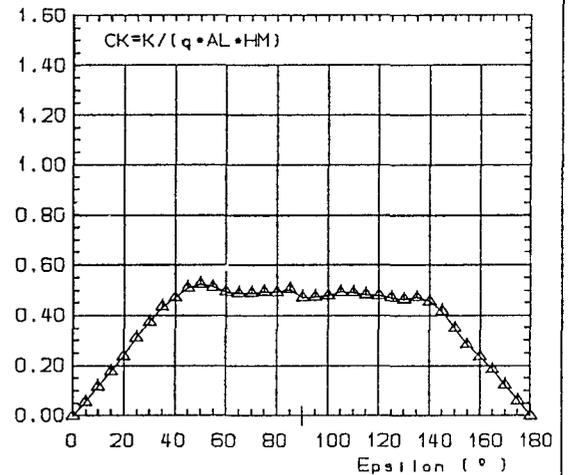
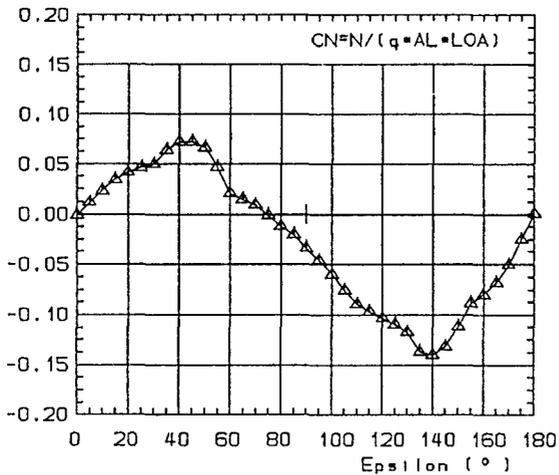
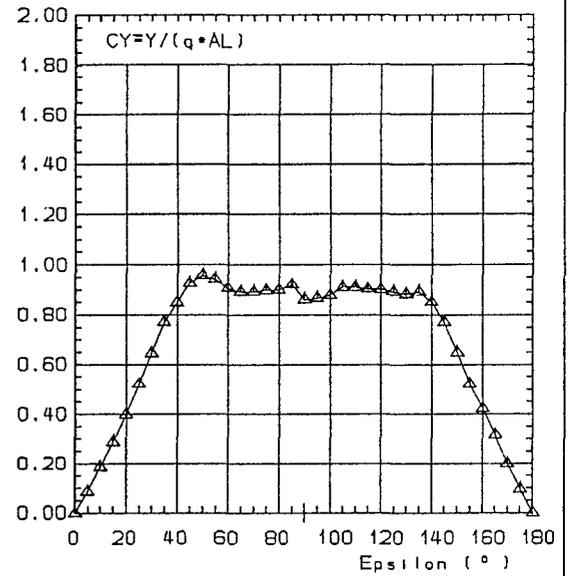
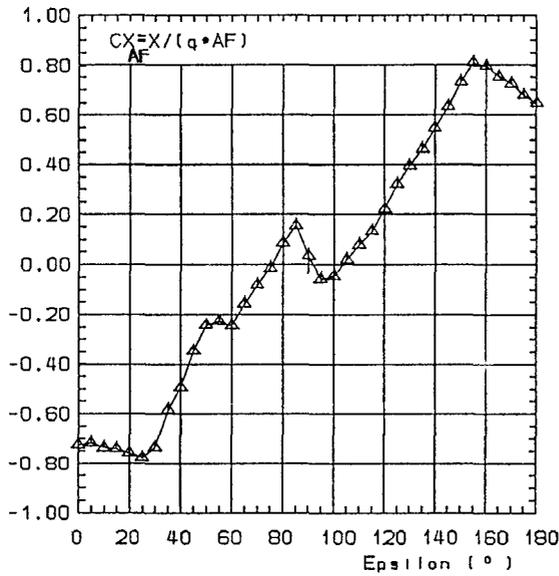
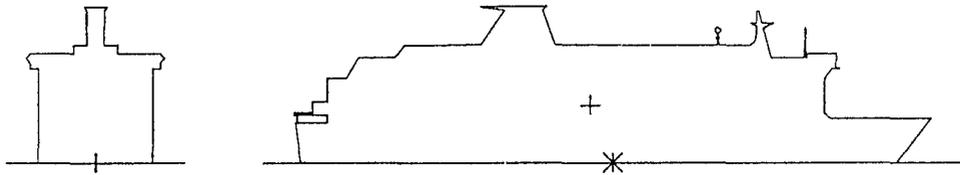
Laenge PP	LPP M	139.60	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	1.36
Laenge OA	LOA M	143.90	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	8.15
Breite in der WL	BWL M	17.35	Mittlere Hoehe von AL	HM M	14.77
Lateralflaeche	AL M ²	2125.75	Tiefgang vorn	TV M	5.90
Frontflaeche	AF M ²	325.33	Tiefgang hinten	TH M	5.90

Massstab 1:100 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.16E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°; WIND VON VORN $\sigma = \rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
FER0201BN

A.10 Fährschiff

Institut fuer
Schiffbau
Universitaet Hamburg

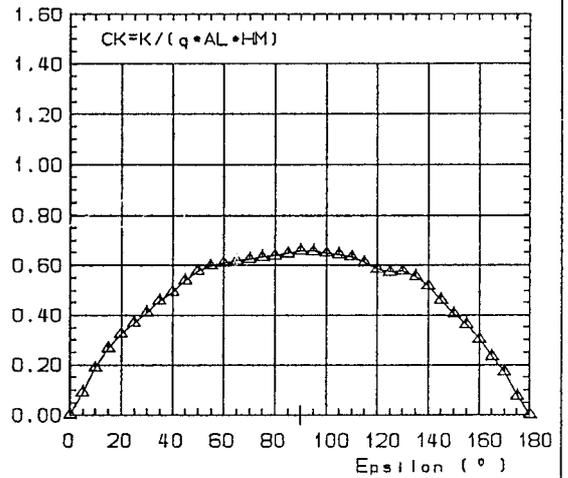
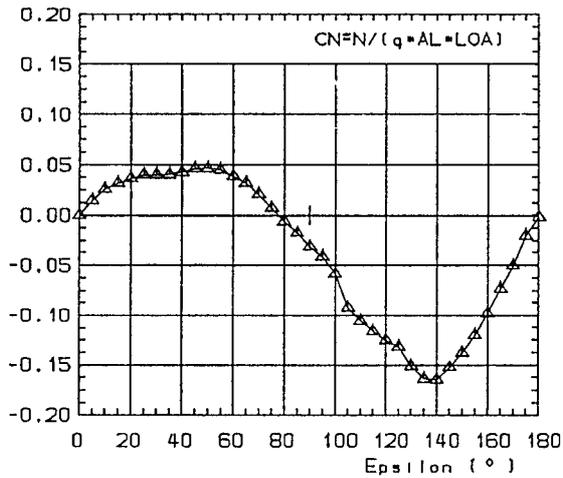
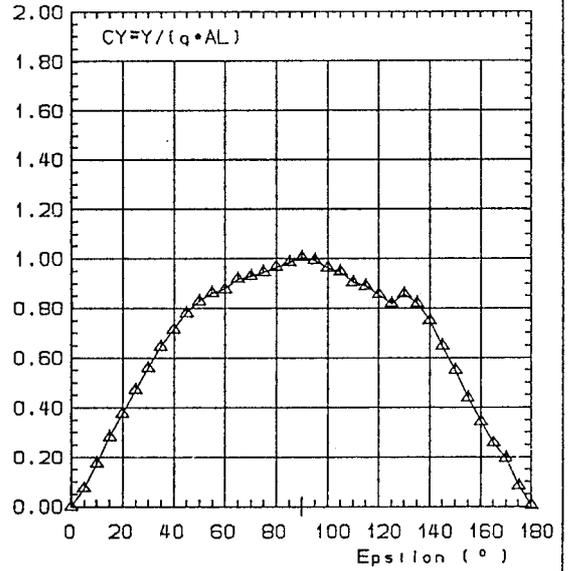
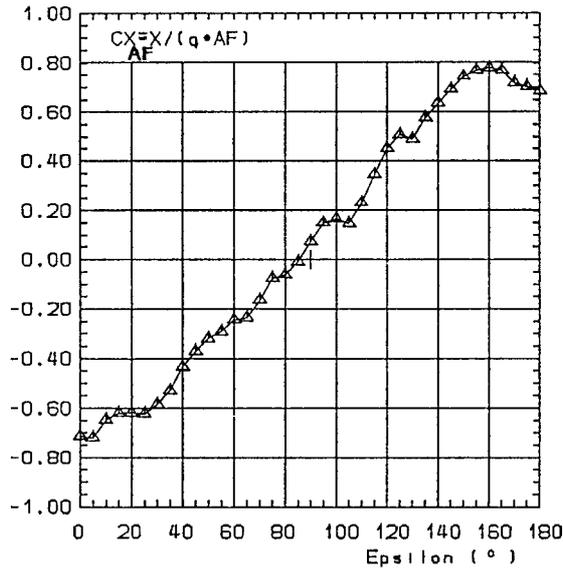
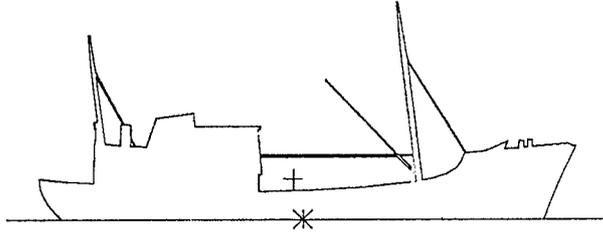
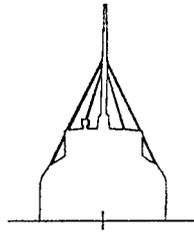


Laenge PP LPP M 144.00
 Laenge OA LOA M 161.00
 Breite in der WL BWL M 29.00
 Lateralfloeche AL M² 4223.29
 Frontfloeche AF M² 898.21

Schwerpunkt von AL vor * SL M -5.90
 Schwerpunkt von AL ueber WL SH M 14.85
 Mittlere Hoehe von AL HM M 26.23
 Tiefgang vorn TV M 6.05
 Tiefgang hinten TH M 6.05

Massstab 1:150 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.15E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN $0 = \rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung FER0301BN	A.11 Fährschiff	Institut fuer Schiffbau Universitaet Hamburg
-----------------------------	------------------------	--



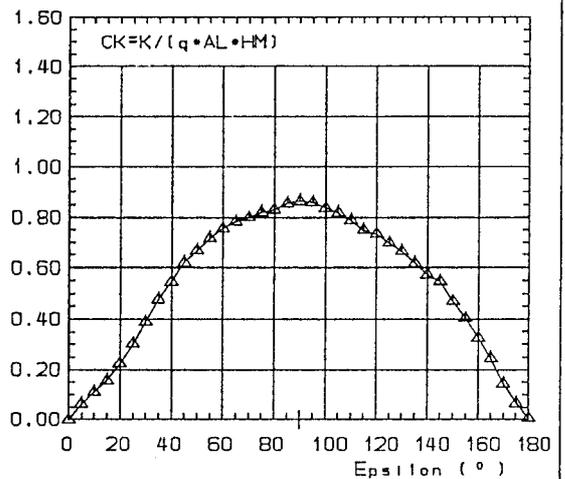
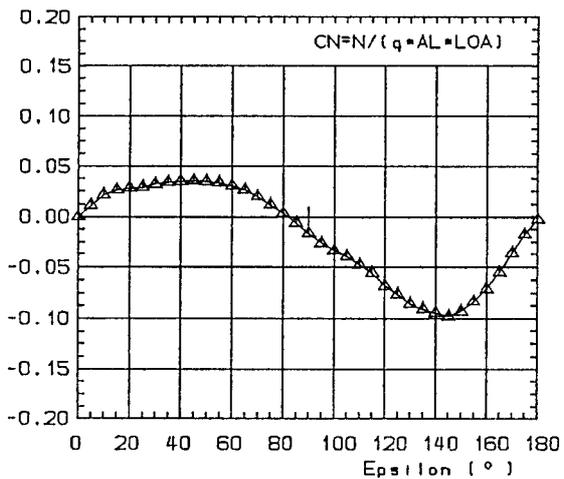
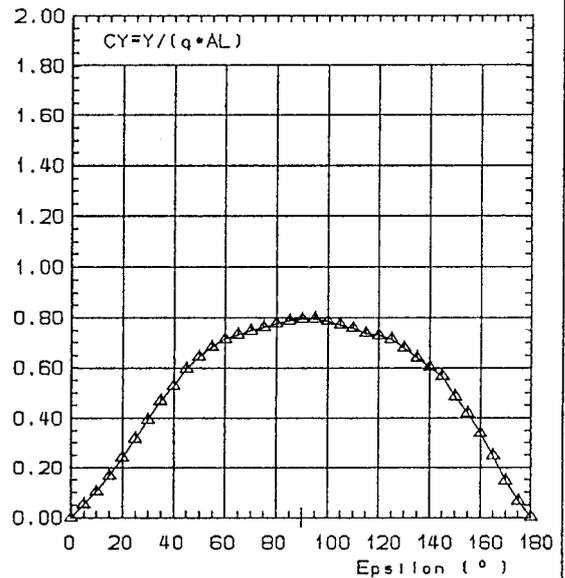
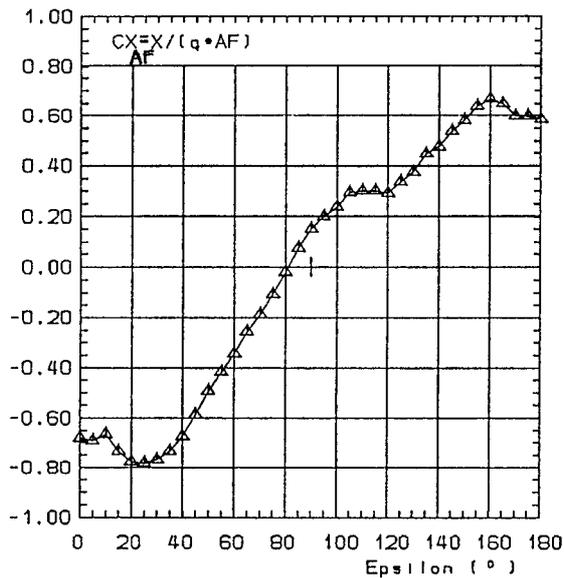
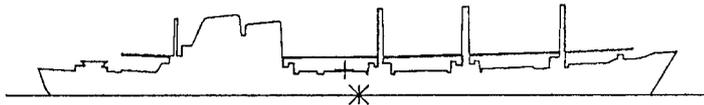
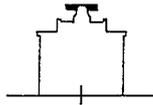
Laenge PP	LPP M	22.20	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-0.47
Laenge OA	LOA M	25.05	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	1.95
Breite in der WL	BWL M	5.80	Mittlere Hoehe von AL	HM M	3.26
Lateralfloechen	AL M ²	72.80	Tiefgang vorn	TV M	2.50
Frontfloechen	AF M ²	24.10	Tiefgang hinten	TH M	2.50

Massstab 1:50 Kraegung 0.0° RE-Zahl 1.70E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN $0 = \rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
FIS0101BN

A.12 Fischkutter

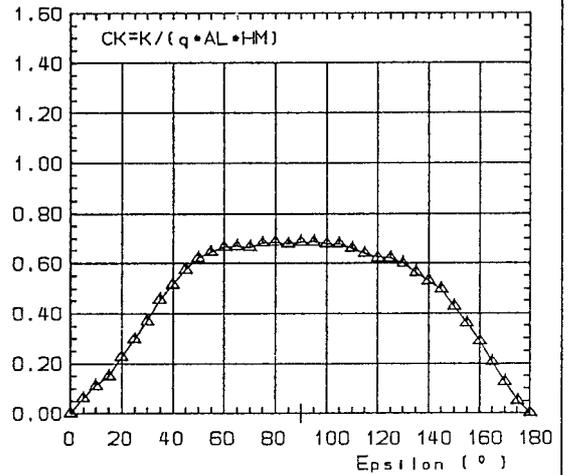
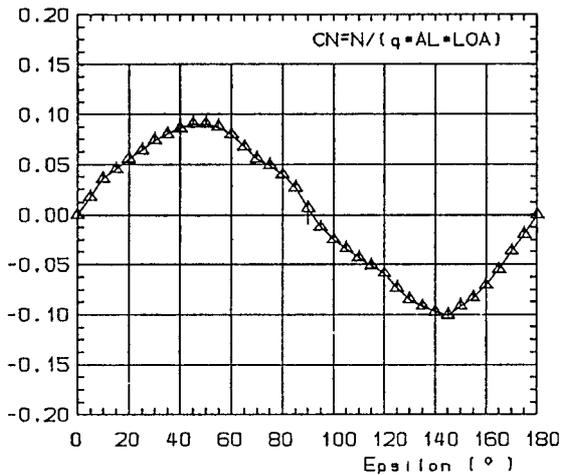
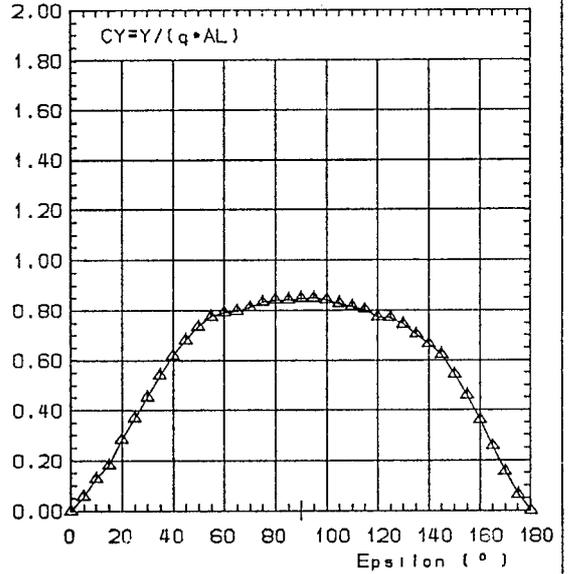
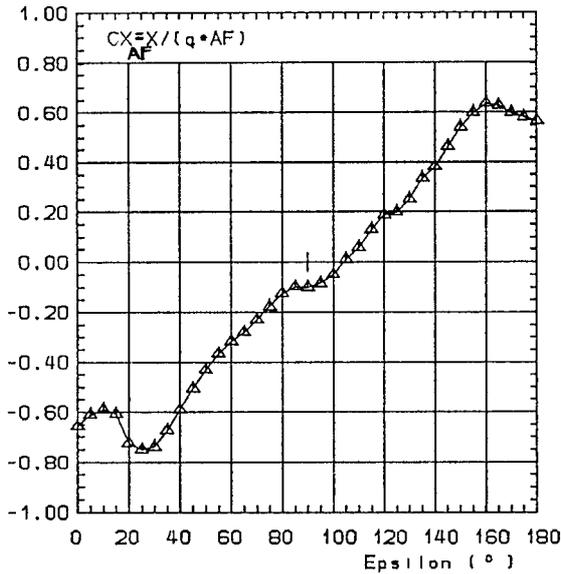
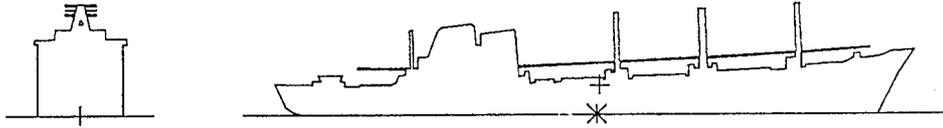
Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg



Laenge PP	LPP M	127.50	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-3.15
Laenge OA	LOA M	141.10	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	5.73
Breite in der WL	BWL M	18.50	Mittlere Hoehe von AL	HM M	8.92
Lateralflaeche	AL M ²	1192.46	Tiefgang vorn	TV M	7.32
Frontflaeche	AF M ²	316.00	Tiefgang hinten	TH M	7.32

Massstab 1:273 Kraengung 0.0° RE-Zahl 1.70E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 = ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

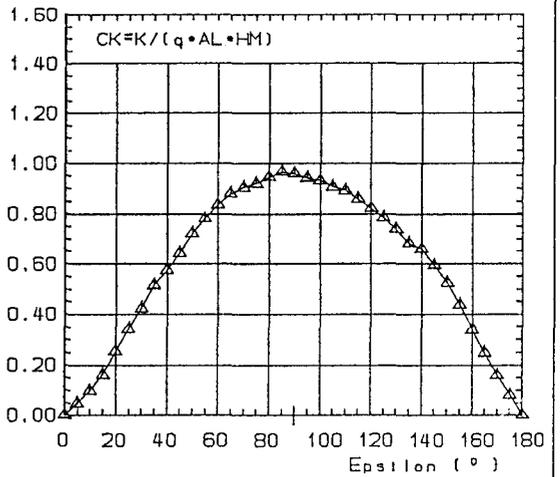
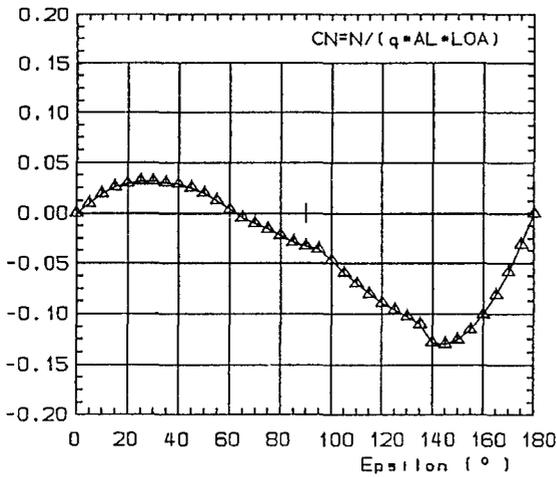
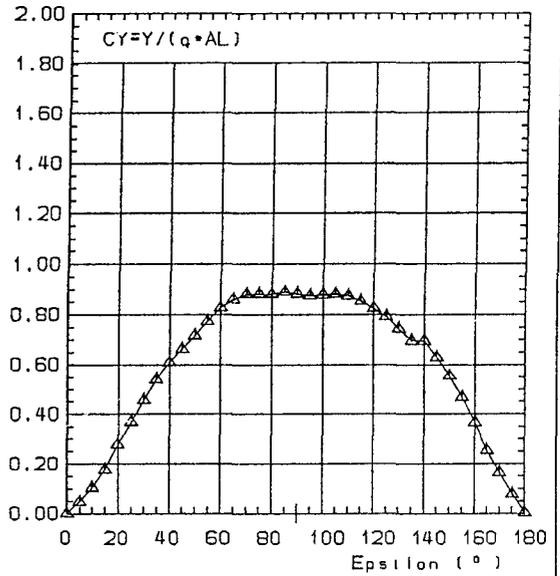
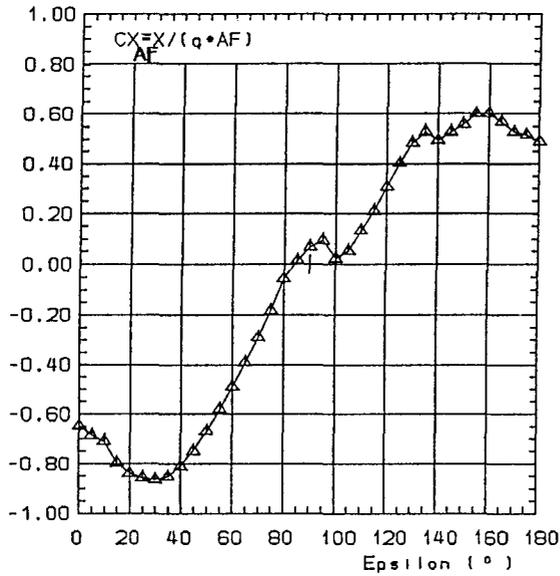
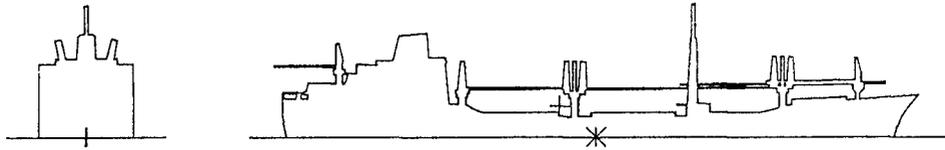
Kennung FRE0101BN	A.13 Frachtschiff, beladen	Institut fuer Schiffbau Universitaet Hamburg
-----------------------------	-----------------------------------	--



Laenge PP	LPP M	127.50	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	0.60
Laenge OA	LOA M	141.10	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	6.65
Breite in der WL	BWL M	18.50	Mittlere Hoehe von AL	HM M	10.91
Lateralflaeche	AL M ²	1539.79	Tiefgang vorn	TV M	2.55
Frontflaeche	AF M ²	359.53	Tiefgang hinten	TH M	6.30

Massstab 1:273 Kraengung 0.0° RE-Zahl 1.70E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON - 0°: WIND VON VORN $0 = \rho u^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

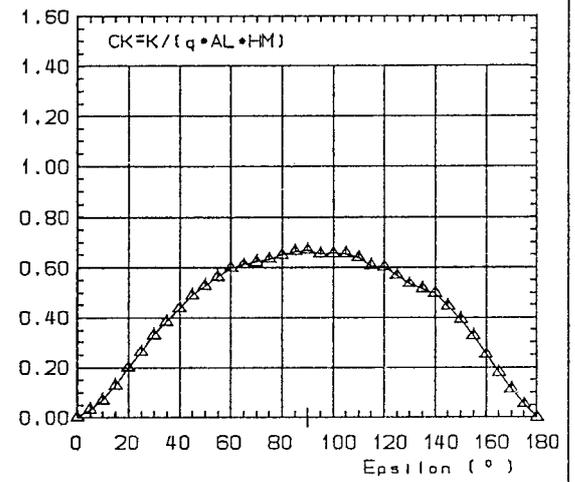
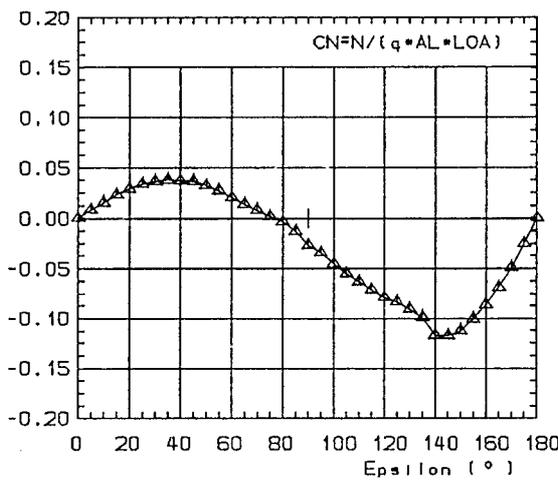
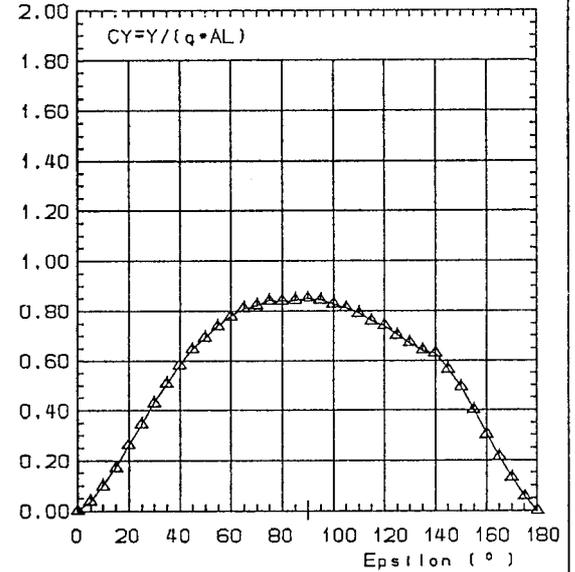
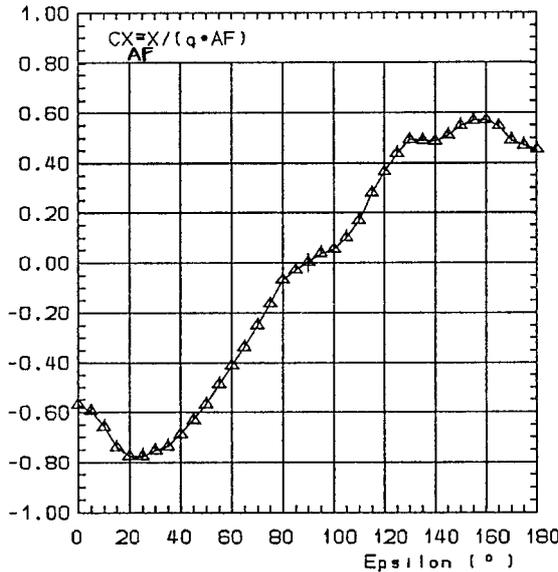
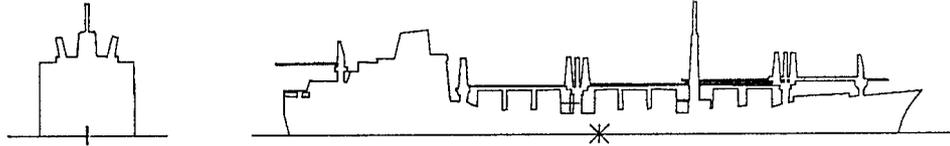
Kennung FRE0102BN	A.14 Frachtschiff, leer	Institut fuer Schiffbau Universitaet Hamburg
-----------------------------	--------------------------------	--



Laenge PP	LPP M	144.78	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-9.18
Laenge OA	LOA M	155.45	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	7.70
Breite in der WL	BWL M	23.10	Mittlere Hoehe von AL	HM M	11.16
Lateralflaeche	AL M ²	1734.80	Tiefgang vorn	TV M	8.69
Frontflaeche	AF M ²	488.02	Tiefgang hinten	TH M	8.69

Masstab 1:296 Kraengung 0.0° RE-Zahl 1.70E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 = ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung FRE0201BN	A.15 Frachtschiff, beladen	Institut fuer Schiffbau Universitaet Hamburg
-----------------------------	-----------------------------------	--



Laenge PP	LPP M	144.78
Laenge OA	LOA M	155.45
Breite in der WL	BWL M	23.10
Lateralfloech	AL M ²	1971.36
Frontfloech	AF M ²	488.02

Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-7.15
Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	7.70
Mittlere Hoehe von AL	HM M	13.32
Tiefgang vorn	TV M	8.69
Tiefgang hinten	TH M	8.69

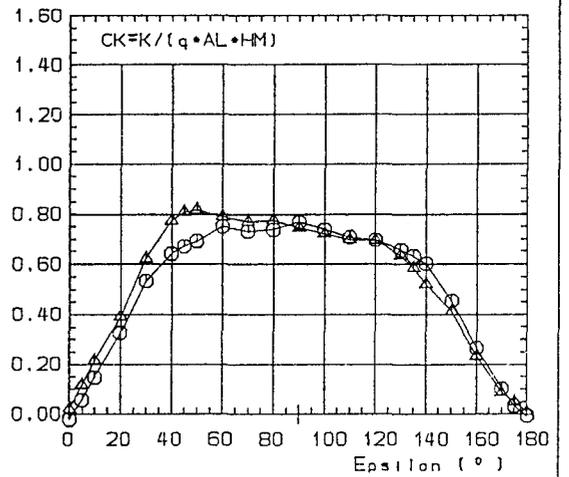
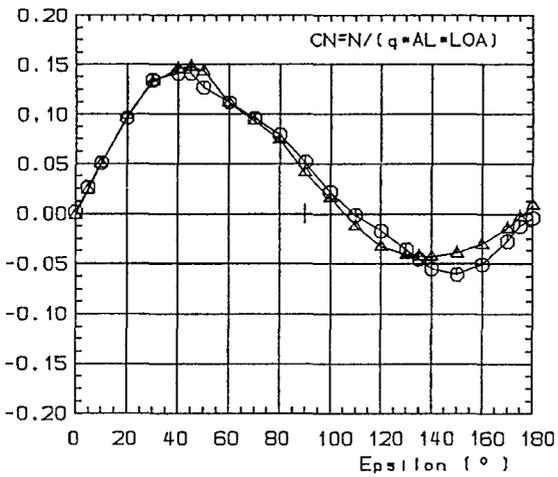
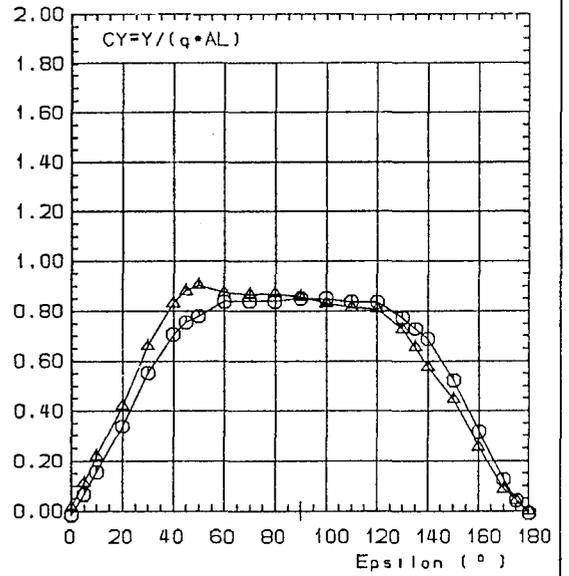
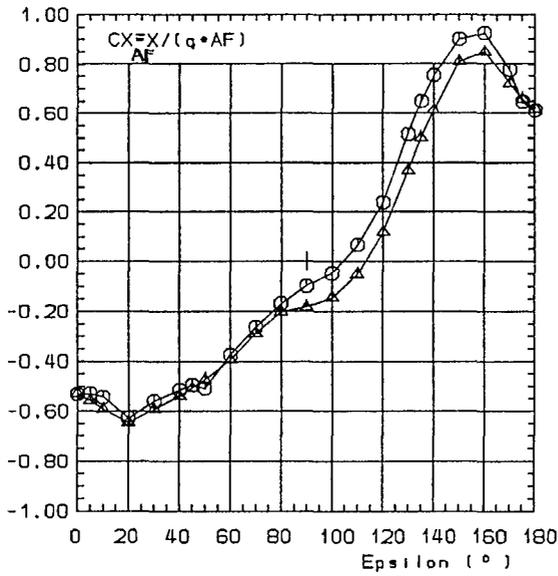
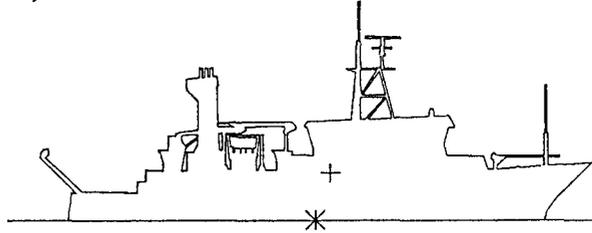
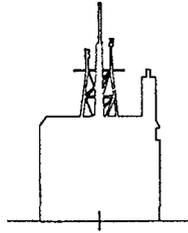
Massstab 1:296 Kraengung 0.0° RE-Zahl 1.70E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON - 0°: WIND VON VORN 0 = ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
FRE0202BN

A.16 Frachtschiff, Container an Deck

Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg

Δ Wind von Backbord, ○ Wind von Steuerbord



Laenge PP	LPP M	48.00
Laenge OA	LOA M	55.00
Breite in der WL	BWL M	12.50
Lateralflaeche	AL M ²	434.78
Frontflaeche	AF M ²	160.70

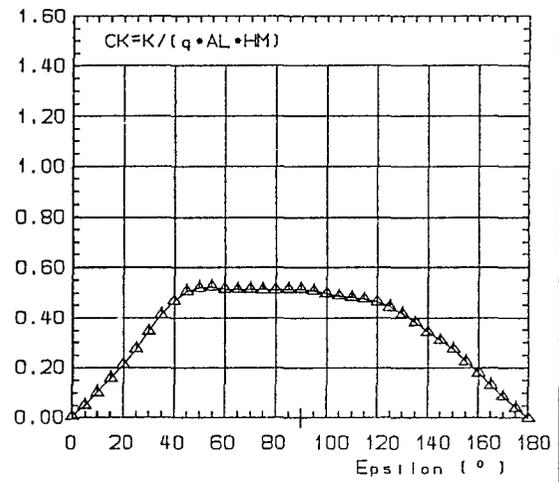
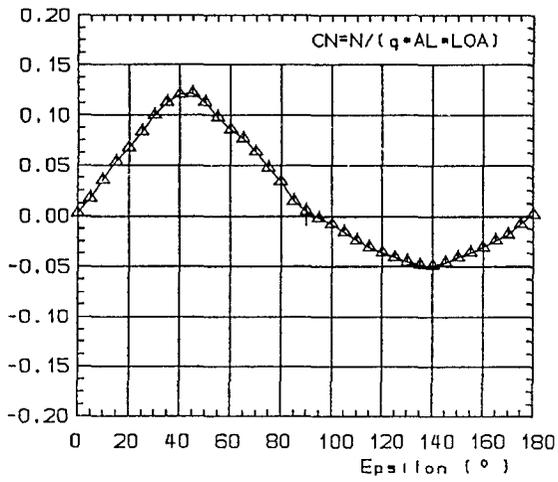
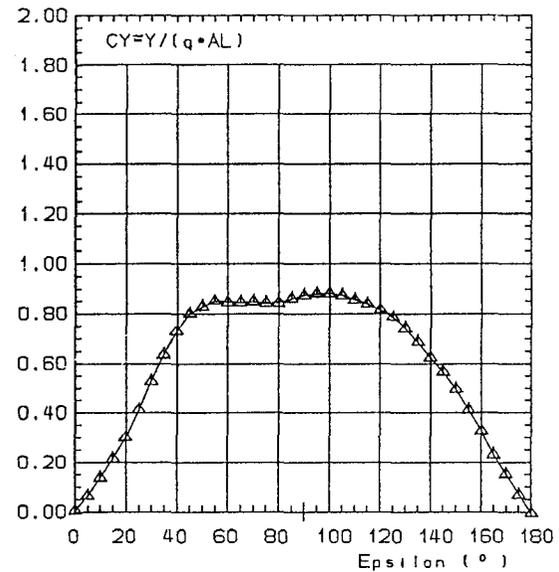
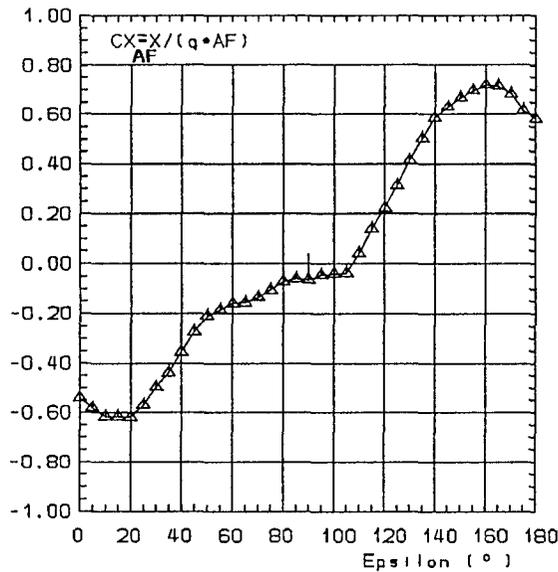
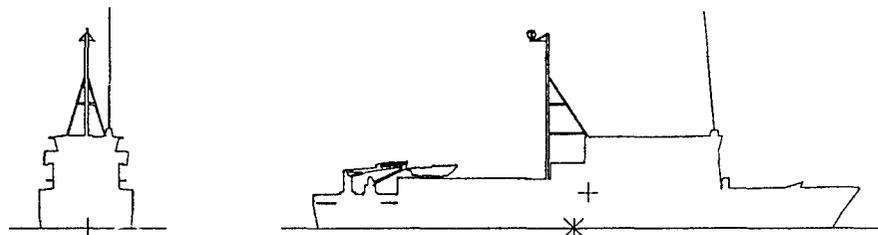
Schwerpunkt von AL vor *	SL M	1.48
Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	5.10
Mittlere Hoehe von AL	HM M	7.91
Tiefgang vorn	TV M	3.95
Tiefgang hinten	TH M	3.95

Masstab 1:40 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.80E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON - 0°; WIND VON VORN 0 - ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
RES0201BN

A.17 Forschungsschiff

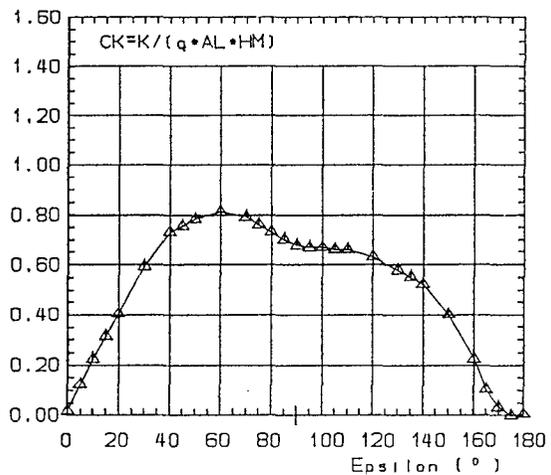
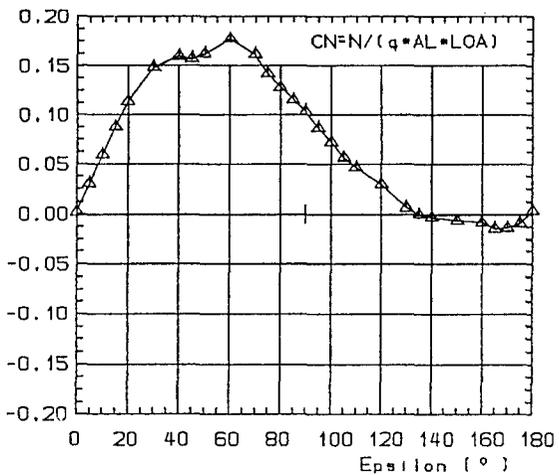
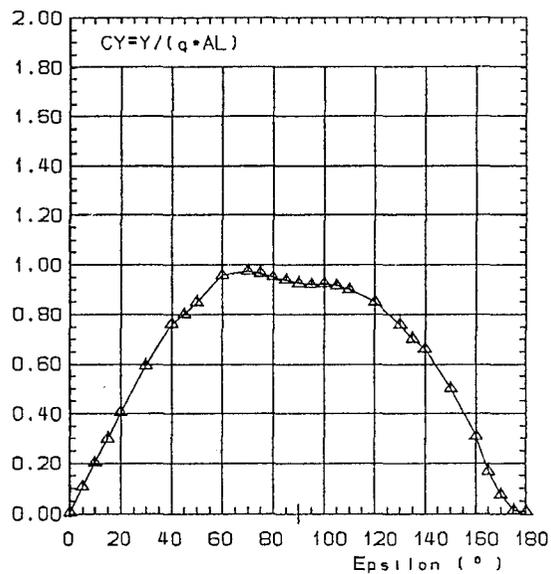
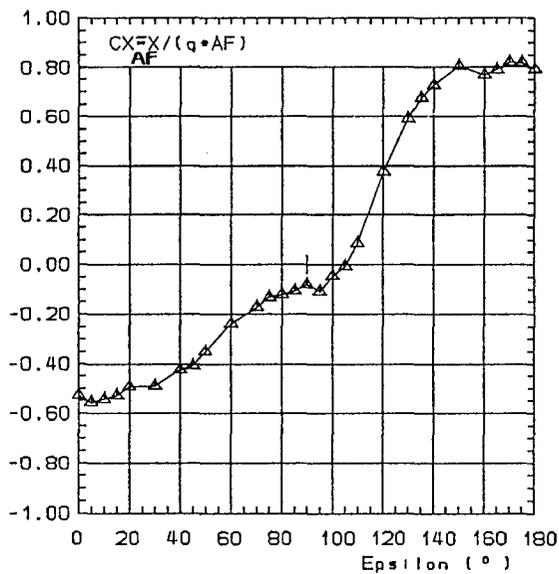
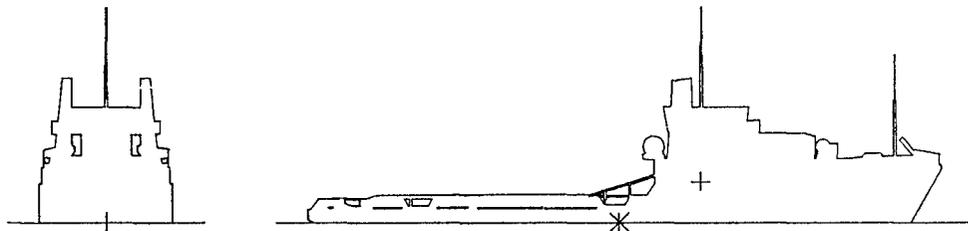
Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg



Laenge PP	LPP M	50.90	Schwerpunkt von AL vor *	SL M	1.41
Laenge OA	LOA M	53.60	Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	3.55
Breite in der WL	BWL M	9.20	Mittlere Hoehe von AL	HM M	5.93
Lateralflaeche	AL M ²	317.63	Tiefgang vorn	TV M	2.50
Frontflaeche	AF M ²	78.64	Tiefgang hinten	TH M	2.50

Massstab 1:50 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.15E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON - 0°: WIND VON VORN 0 - $\rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung SPE0102BN	A.18 Schnellboot	Institut fuer Schiffbau Universitaet Hamburg
-----------------------------	-------------------------	--



Laenge PP LPP M 58.35
 Laenge OA LOA M 61.95
 Breite in der WL BWL M 13.00
 Lateralfloeche AL M² 336.80
 Frontfloeche AF M² 137.48

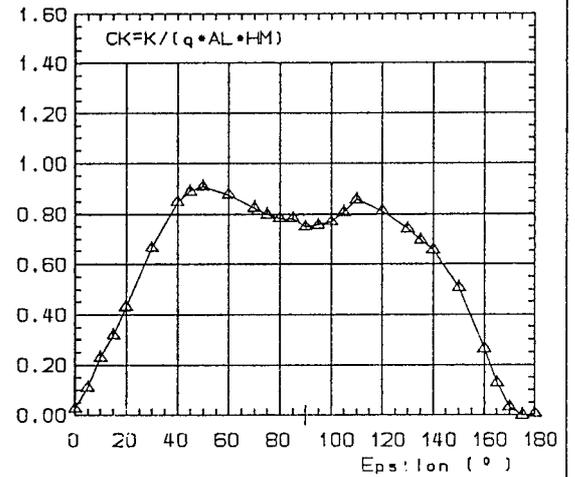
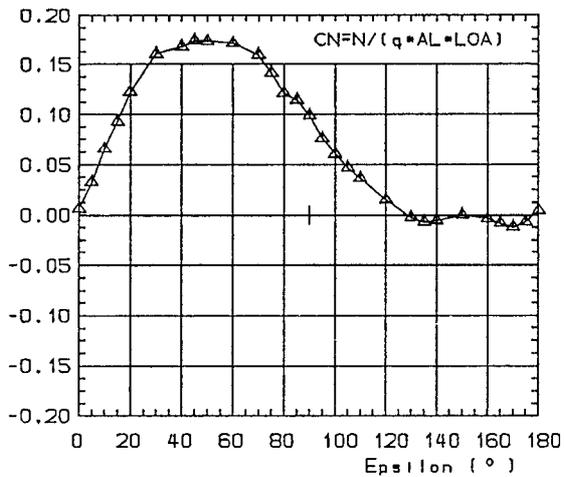
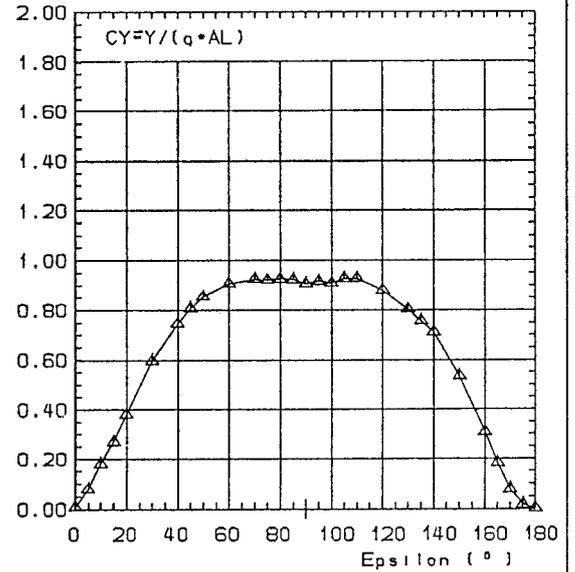
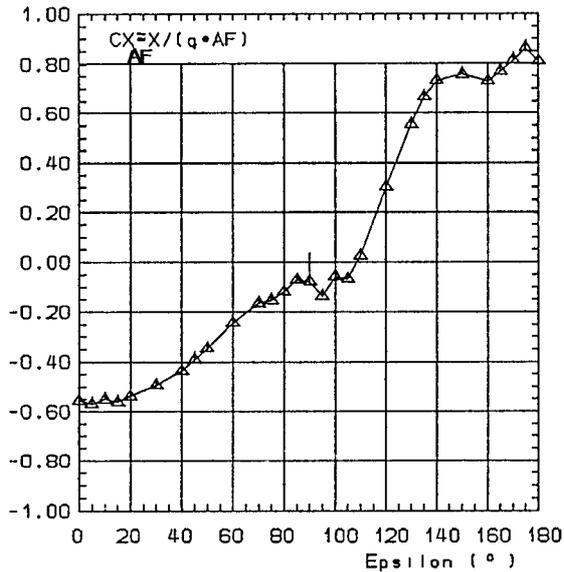
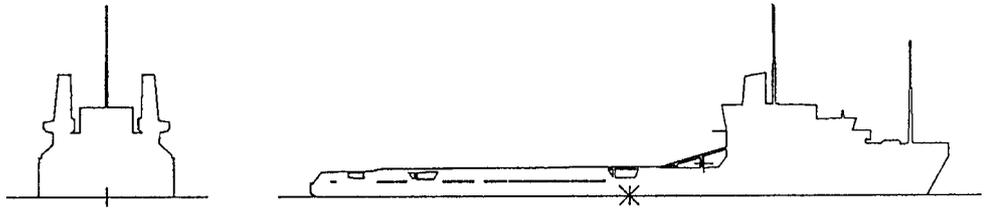
Schwerpunkt von AL vor * SL M 7.95
 Schwerpunkt von AL ueber WL SH M 4.08
 Mittlere Hoehe von AL HM M 5.76
 Tiefgang vorn TV M 4.85
 Tiefgang hinten TH M 4.85

Massstab 1:50 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.30E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 - ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
SUP0101BN

A.19 Offshore-Versorgungsschiff

Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg



Laenge PP LPP M 58.35
 Laenge OA LOA M 61.00
 Breite in der WL BWL M 13.00
 Lateralflaeche AL M² 260.33
 Frontflaeche AF M² 110.12

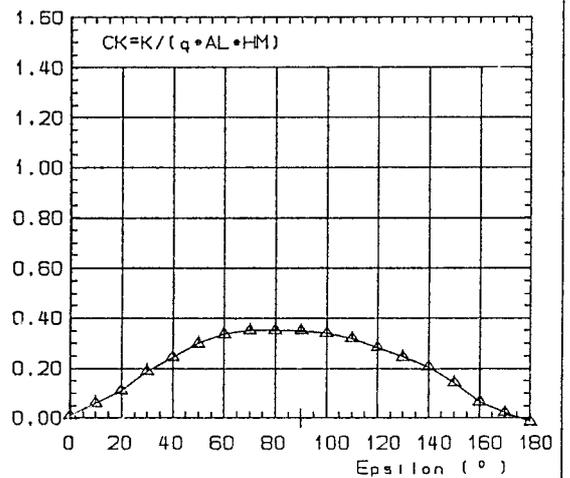
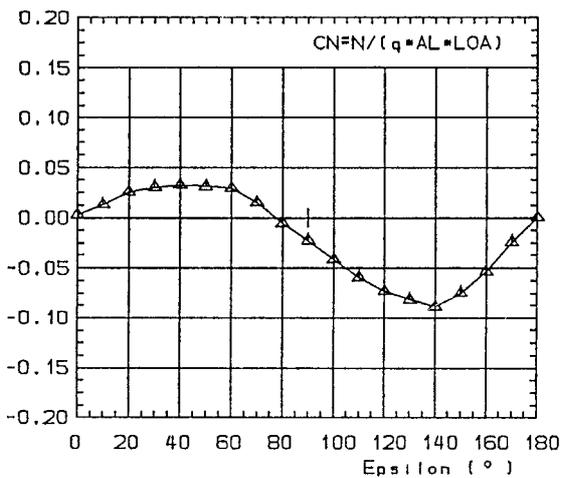
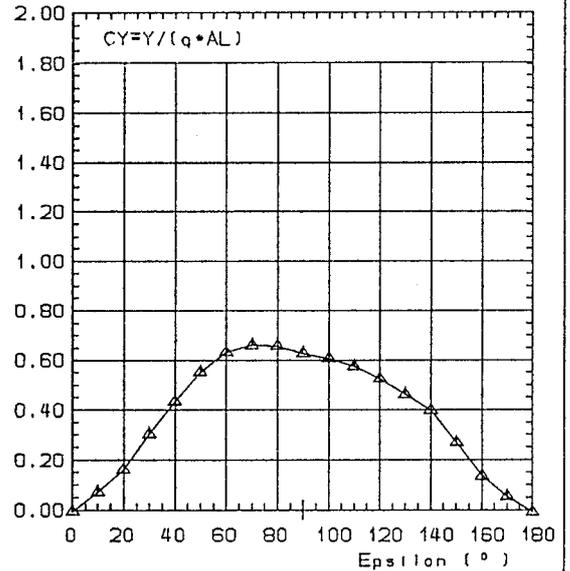
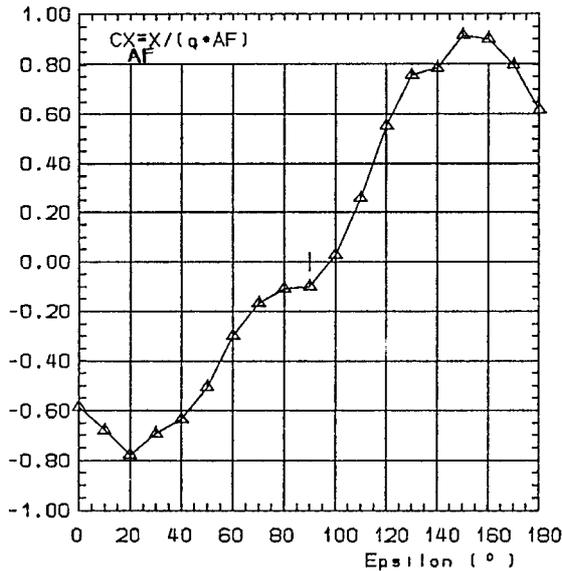
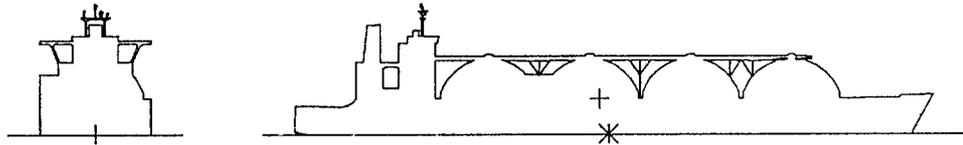
Schwerpunkt von AL vor * SL M 7.12
 Schwerpunkt von AL ueber WL SH M 3.14
 Mittlere Hoehe von AL HM M 4.27
 Tiefgang vorn TV M 4.85
 Tiefgang hinten TH M 4.85

Massstab 1:50 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.27E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 = ρU²/2 STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
SUP0107BN

A.20 Offshore-Versorgungsschiff

Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg



Laenge PP	LPP M	260.00
Laenge OA	LOA M	274.00
Breite in der WL	BWL M	47.20
Lateralflaeche	AL M ²	7537.41
Frontflaeche	AF M ²	1692.27

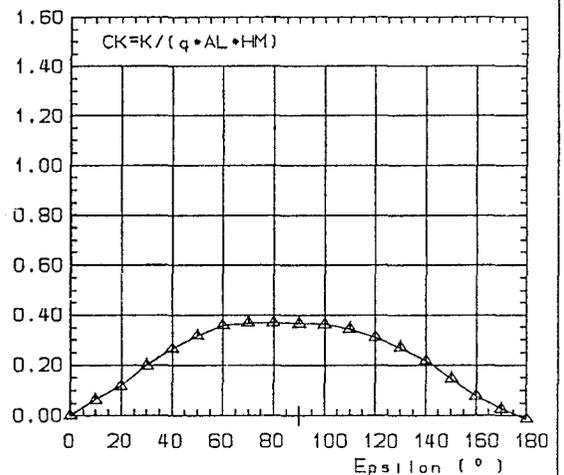
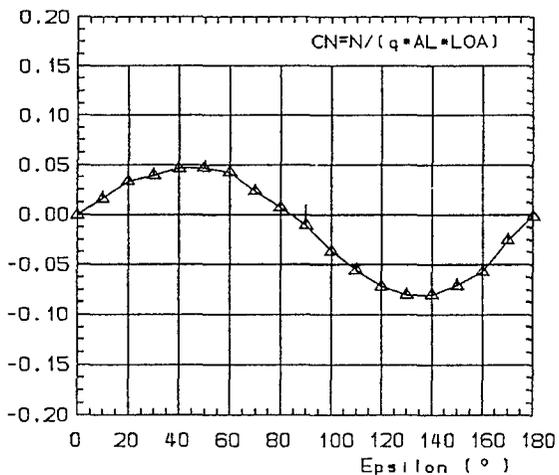
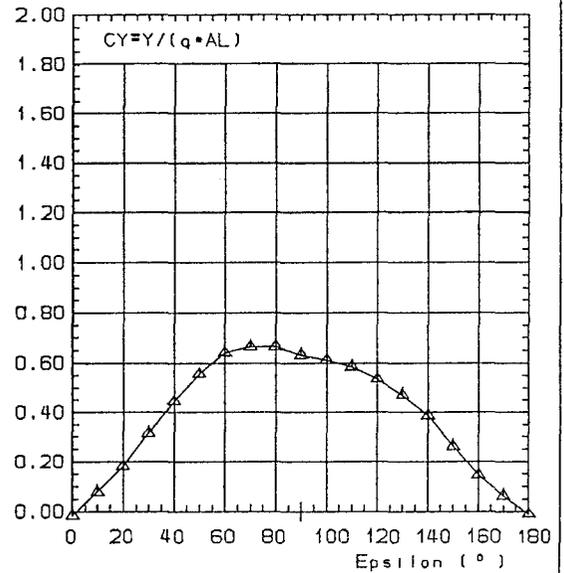
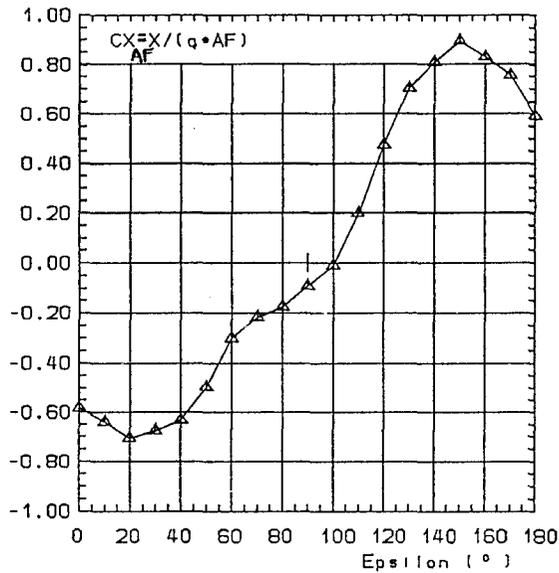
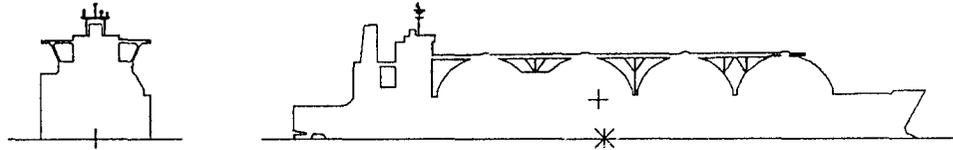
Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-3.99
Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	15.72
Mittlere Hoehe von AL	HM M	27.51
Tiefgang vorn	TV M	10.95
Tiefgang hinten	TH M	10.95

Maasstab 1:190 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.91E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 - $\rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
TAG0101BN

A.21 Gastanker, beladen

Institut fuer
Schiffbau
Universitaet Hamburg



Laenge PP	LPP M	260.00
Laenge OA	LOA M	274.00
Breite in der WL	BWL M	47.20
Lateralflaeche	AL M ²	8313.74
Frontflaeche	AF M ²	1827.12

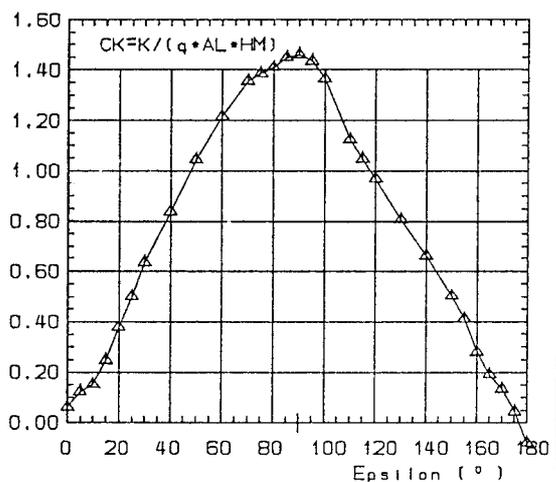
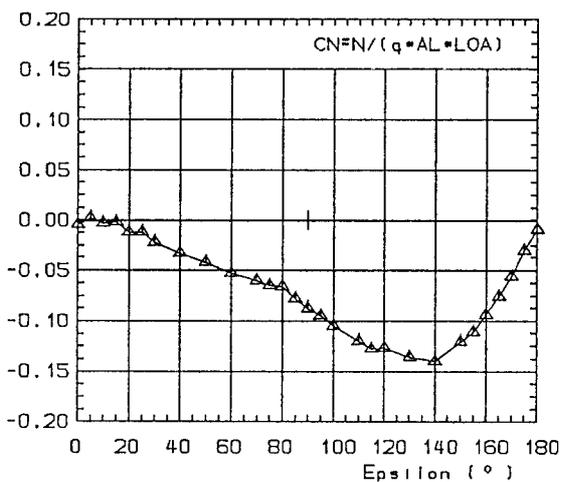
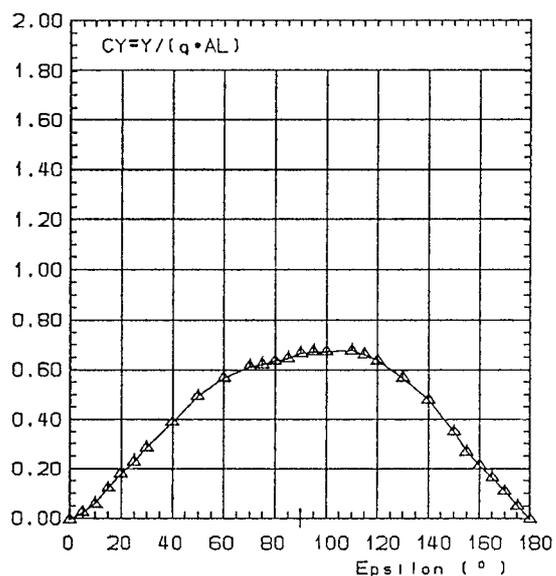
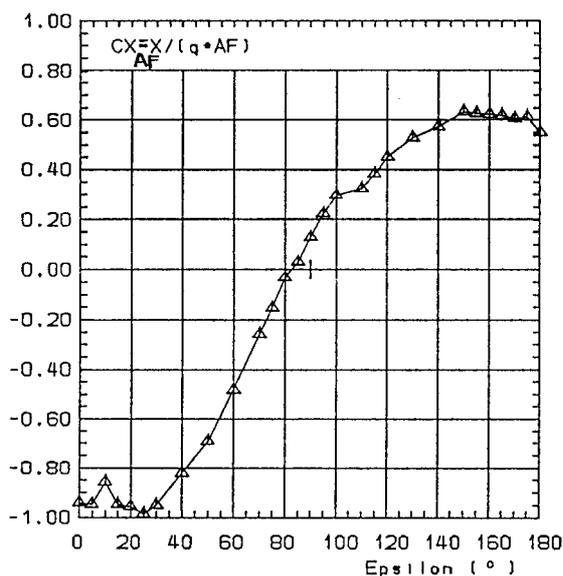
Schwerpunkt von AL vor *	SL M	-2.53
Schwerpunkt von AL ueber WL	SH M	17.07
Mittlere Hoehe von AL	HM M	30.34
Tiefgang vorn	TV M	7.27
Tiefgang hinten	TH M	8.81

Masstab 1:190 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.90E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 - $\rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
TAG0102BN

A.22 Gastanker, in Ballast

Institut fuer
Schiffbau
Universitaet Hamburg

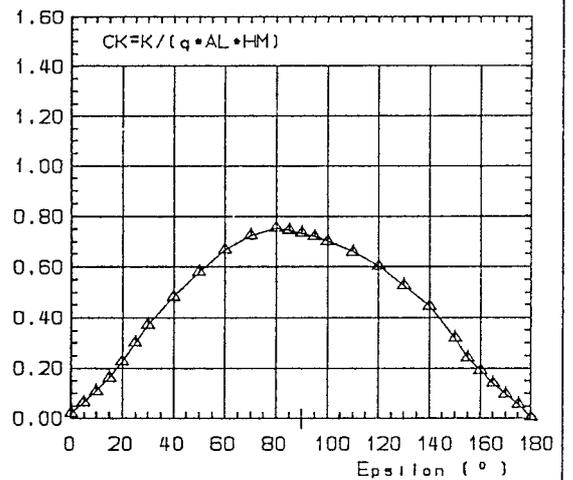
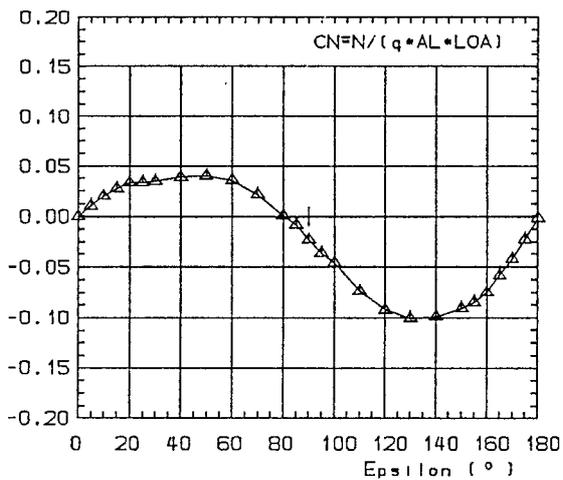
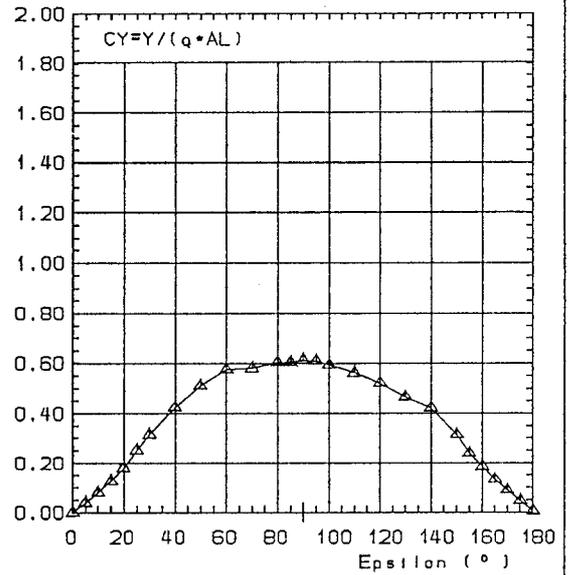
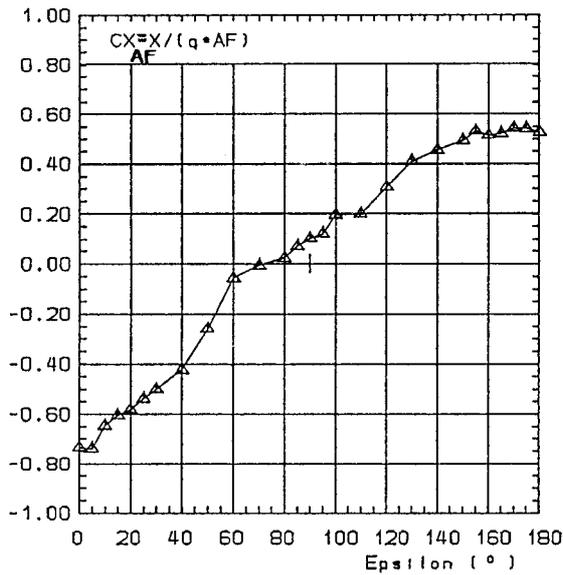
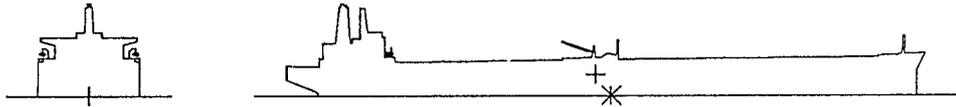


Laenge PP LPP M 336.00
 Laenge OA LOA M 351.40
 Breite in der WL BWL M 55.40
 Lateralfloechе AL M² 3401.47
 Frontfloechе AF M² 1131.79

Schwerpunkt von AL vor * SL M -24.45
 Schwerpunkt von AL ueber WL SH M 6.83
 Mittlere Hoehe von AL HM M 9.68
 Tiefgang vorn TV M 23.50
 Tiefgang hinten TH M 23.50

Maassstab 1:250 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.69E+06 Windprofil gleichfoernig
 EPSILON = 0°: WIND VON VORN 0 = $\rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung TAN0201BN	A.23 Tanker, beladen	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

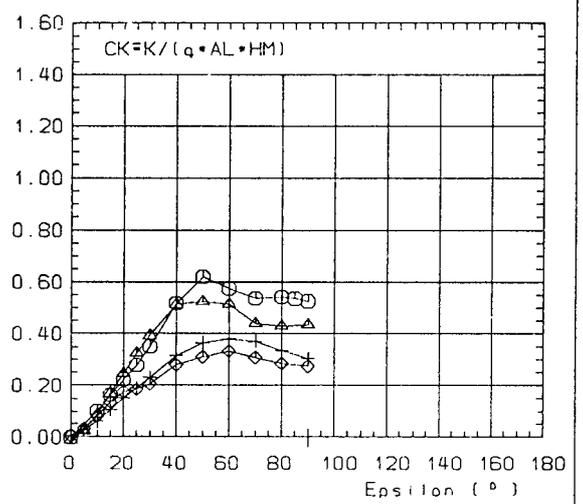
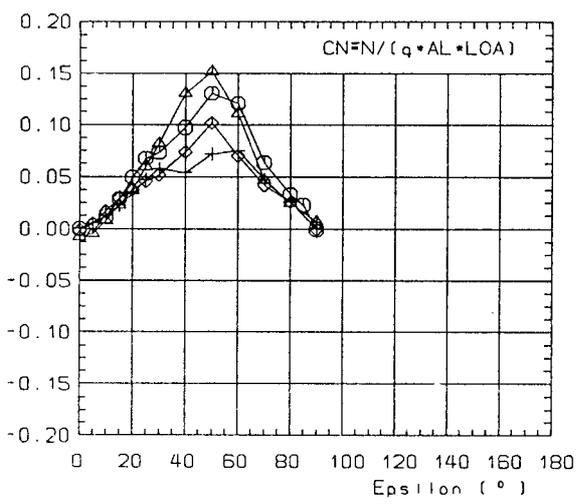
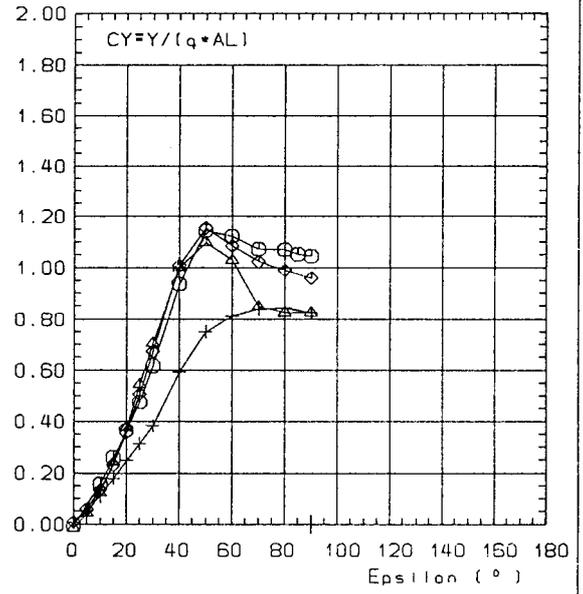
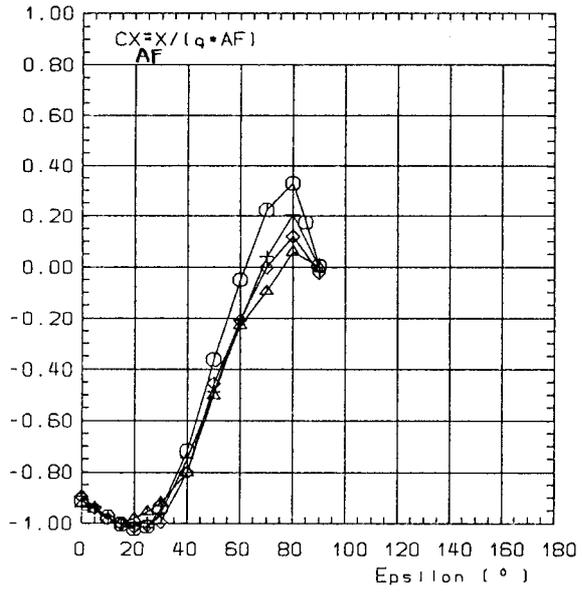
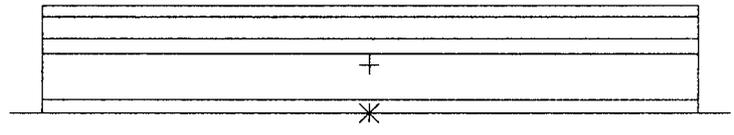
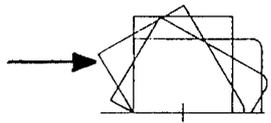
Masstab 1:250 Kraengung 0.0° RE-Zahl 2.09E+06 Windprofil gleichfoermig
 EPSILON - 0°: WIND VON VORN 0 - $\rho U^2 / 2$ STAUDRUCK DES WINDES
 CN bezueglich *, CK bezueglich WL

Kennung
TAN0202BN

A.24 Tanker, in Ballast

Institut fuer
 Schiffbau
 Universitaet Hamburg

Krängung : $\circ 0^\circ$, $\Delta 30^\circ$, $\diamond 60^\circ$, $+ 90^\circ$



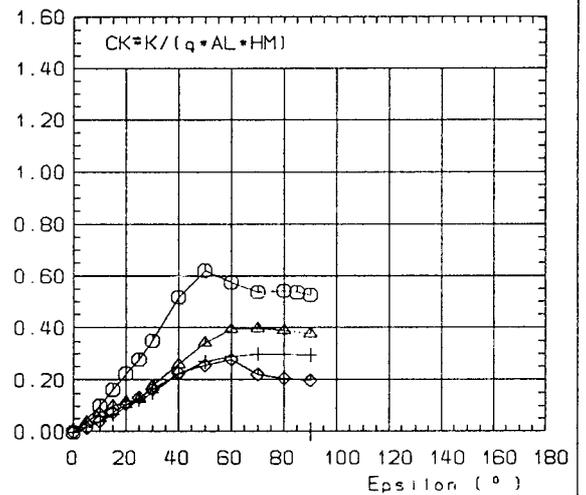
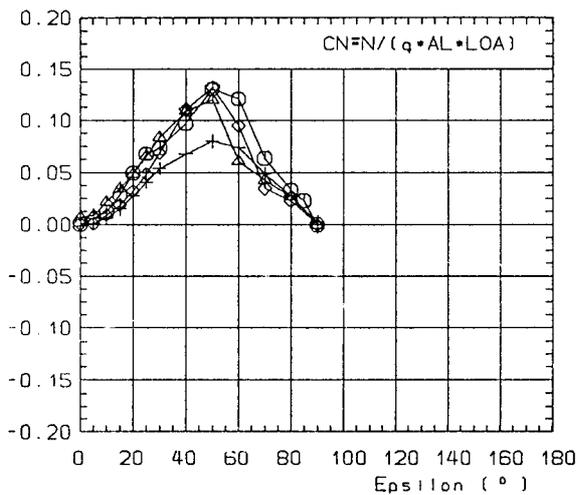
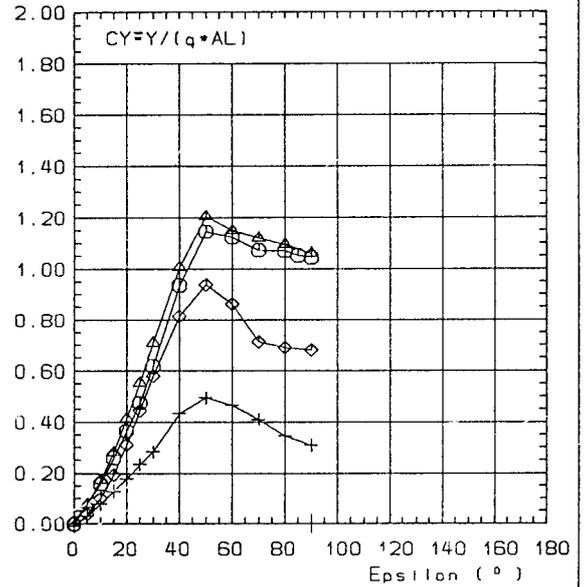
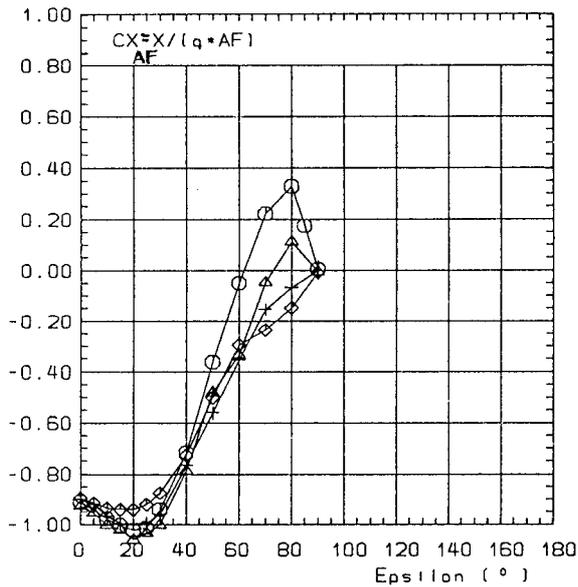
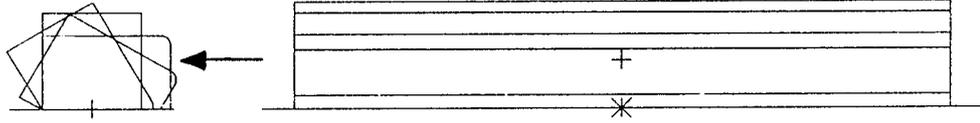
Laenge PP	LPPCM	100.00	Schwerpunkt von AL vor *	SLCM	0.00
Laenge OA	LOACM	100.00	Schwerpunkt von AL ueber VL	SHCM	7.50
Breite in der VL	BVLCM	15.00	Mittlere Hoehe von AL	HMCM	15.00
Lateralflaeche	AL CM ²	1500.00	Tiefgang vorn	TVCM	0.00
Frontflaeche	AF CM ²	225.00	Tiefgang hinten	THCM	0.00

Kennung
OBJ0101BN

A.25 Quader, geneigt nach Luv

Institut fuer
Schiffbau
Universitaet Hamburg

Krängung: \circ 0° , Δ 30° , \diamond 60° , $+$ 90°



Laenge PP	LPPCM	100.00
Laenge OA	LOACM	100.00
Breite in der WL	BWLCM	15.00
Lateralflaeche	AL CM ²	1500.00
Frontflaeche	AF CM ²	225.00

Schwerpunkt von AL vor *	SLCM	0.00
Schwerpunkt von AL ueber WL	SHCM	7.50
Mittlere Hoehe von AL	HMC	15.00
Tiefgang vorn	TVM	0.00
Tiefgang hinten	THCM	0.00

Kennung
OBJ0101SN

A.26 Quader, geneigt nach Lee

Institut fuer
Schiffbau
Universitaet Hamburg