

286 | März 1972

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

B. Wagner

Untersuchungen zur Frage des effektiven Zusatzwiderstandes durch den Wind auf der Grundlage von Modellversuchen für Unter- und Überwasserschiffe

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 286

Untersuchungen zur Frage des effektiven Zusatzwiderstandes

durch den Wind auf der Grundlage von Modellversuchen

für Unter- und Überwasserschiffe

(Forschungsschiff "Meteor" und andere Schiffstypen)

von

B. Wagner, Kiel

März 1972

1. Einführung

Bei der zusammenfassenden Darstellung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens "Windkräfte an Überwasserschiffen" /1/ wurde bereits auf die Frage des effektiven Zusatzwiderstandes durch den Wind hingewiesen. Danach ist die direkte Komponente der Luftkraft in Schiffslängsrichtung nur ein Teil der Widerstandserhöhung durch den Wind. Ein weiterer Teil kommt dadurch zustande, daß mit der Luft-Längskraft auch eine Luft-Seitenkraft auftritt, der durch eine hydrodynamische Rumpfkraft entgegengewirkt werden muß. Diese wird durch Abdrift des Rumpfes und Ruderlegen erzeugt, wodurch allerdings ein Zusatzwiderstand auftritt. Dieser ist von der Größe der Luft-Seitenkraft und von der Rumpfform abhängig, also ein Teil des effektiven Zusatzwiderstandes durch den Wind.

Zur Ermittlung des gesamten effektiven Zusatzwiderstandes durch den Wind benötigt man neben den Ergebnissen von Windkanalversuchen mit dem entsprechenden Überwasserschiff bei unterschiedlichen Anstellwinkeln zum Wind auch die Ergebnisse von Schrägschleppversuchen mit dem zugehörigen Rumpf (Unterwasserschiff) im benötigten Driftwinkelbereich.

Leider sind bisher nur wenige Schrägschleppversuche bekannt, denen man die nötigen Angaben über die Widerstandserhöhung bei Drift des Rumpfes bzw. Ruderlage entnehmen kann. Dem hier vorliegenden Bericht ging daher ein eingehendes Studium zugänglicher Schrägschleppversuchsergebnisse voraus. Beabsichtigt ist eine systematische Darstellung der veröffentlichten Schrägschleppversuchsergebnisse.

Ausgangspunkt des vorliegenden Berichtes war die Ermittlung der effektiven Luft-Längskraft für das Forschungsschiff "Meteor", für das Untersuchungen des Über- und Unterwasserschiffes bei unterschiedlichen Schräganströmwindwinkeln im Windkanal vorliegen /2/. Im Gegensatz zu den in /1/ gegebenen Beispielen für ein Frachtschiff und ein Fährschiff ergab sich für die "Meteor" kaum ein nennenswerter Zusatzwiderstand durch die vom Wind verursachte Abdrift.

Es schien daher angebracht, die Untersuchung auch auf andere typische Fahrzeugarten auszudehnen, um allgemeingültigere Aussagen zu gewinnen.

2. Die Berechnung der effektiven Luft-Längskraft bei seitlichem Wind

Die Berechnung kann nur für Schiffstypen durchgeführt werden, für die sowohl die Ergebnisse von Windkanalversuchen bei verschiedenen Kursen zum Wind als auch Ergebnisse von Rumpfschrägschleppversuchen mit den nötigen Angaben über die Widerstandserhöhung bei Abdrift vorliegen.

2.1 Windkräfte

Mehrkomponentenmessungen mit Überwasserschiffsmodellen im Windkanal, wie sie zum Beispiel im Institut für Schiffbau durchgeführt wurden /3/, liefern die Komponenten der Windkraft (Luft-Querkraft C_A und Luft-Widerstand D_A , bzw. Luft-Längskraft X_A und Luft-Seitenkraft Y_A) sowie das Luftkraftmoment um die Hochachse N_A in der Form dimensionsloser Beiwerte als Funktion des Anstellwinkels zum Wind ("aerodynamischer Driftwinkel") β_A . Die Beiwerte werden auf den Staudruck der Anströmgeschwindigkeit v_A ($= \frac{\rho_A}{2} \cdot v_A^2$) und die Überwasserlateralfläche A_{LA} bzw. $A_{LA} \cdot L_{OA}$ bezogen.

z.B. Längskraft-Beiwert $c_{XA} = X_A / (\frac{\rho_A}{2} \cdot v_A^2 \cdot A_{LA})$

Momentenbeiwert (aerodynamisches Giermoment)

$$c_{NA} = N_A / (\frac{\rho_A}{2} \cdot v_A^2 \cdot A_{LA} \cdot L_{OA}).$$

Die Beiwerte werden ohne Korrektur für die unterschiedlichen Gradienten der Windgeschwindigkeit im Windkanal und über der Meeresoberfläche verwendet. Der Gradient der maßgeblichen scheinbaren Windgeschwindigkeit v_A über der Meeresoberfläche hängt vom jeweiligen Verhältnis wahre Windgeschwindigkeit v_W zu Fahrtgeschwindigkeit v_H und vom Kurs zum Wind ab. Für vorliche Winde (β_A zwischen 0° und 60°), die im vorliegenden Fall interessieren, stellt der bei den Institutsmessungen vorhandene Gradient der Anlaufgrenzschicht über der Flurplatte, auf der die Modelle im Windkanal untersucht wurden, einen guten Mittelwert dar.

2.2 Hydrodynamische Rumpfkkräfte bei Schräganströmung

In Abhängigkeit vom hydrodynamischen Driftwinkel β_H ergeben Mehrkomponenten-Messungen an schräg geschleppten Modellen zunächst den Widerstand D_H und die Querkraft C_H , sowie das hydrodynamische Giermoment N_H , aus denen sich die dimensionslosen Beiwerte ermitteln lassen:

$$\text{Querkraftbeiwert} \quad c_{CH} = C_H / \left(\frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot L \cdot T \right)$$

$$\text{Widerstandsbeiwert} \quad c_{DH} = D_H / \left(\frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot L \cdot T \right)$$

$$\text{Giermomentenbeiwert} \quad c_{NH} = N_H / \left(\frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot L^2 \cdot T \right).$$

Hieraus erhält man die Beiwerte der Rumpf-Längskraft X_H und der Rumpf-Seitenkraft Y_H :

$$c_{XH} = c_{CH} \cdot \sin\beta_H - c_{DH} \cdot \cos\beta_H \approx c_{CH} \cdot \beta_H - c_{DH} \quad (\text{für kleine } \beta_H)$$

$$c_{YH} = c_{CH} \cdot \cos\beta_H + c_{DH} \cdot \sin\beta_H \approx c_{CH} + c_{DH} \cdot \beta_H \quad (\text{für kleine } \beta_H).$$

Bei der Analyse von Schrägschleppversuchen (vgl. /4/) zeigte sich, daß sich der hydrodynamische Querkraftbeiwert gut annähern läßt durch

$$c_{CH} = c_1 \cdot \beta_H + c_2 \cdot \beta_H^2 .$$

Für den Widerstandsbeiwert gilt

$$c_{DH} = c_{DHO} + c_{DHC} \quad \text{mit} \quad c_{DHO} = \text{Widerstandsbeiwert bei } \beta_H = 0^\circ \\ c_{DHC} = \text{Abdriftwiderstandsbeiwert.}$$

Bei Verwendung der "Gleitzahl" $\epsilon_{CH} = c_{DHC}/c_{CH}$ erhält man für

$$c_{DHC} = \epsilon_{CH} \cdot c_{CH} .$$

Setzt man für den Beiwert des induzierten (Abdrift-)Widerstandes

$$c_{DHC} = k \cdot \frac{c_{CH}^2}{\pi \cdot \Lambda} , \quad \text{so wird} \quad \epsilon_{CH} = k \cdot \frac{c_{CH}}{\pi \cdot \Lambda} \approx k_1 \cdot c_{CH} .$$

Für die Gleitzahl ϵ_{CH} wurde daher eine Ausgleichskurve mit einem linearen und einem quadratischen Glied benutzt:

$$\epsilon_{CH} = e_1 \cdot \beta_H + e_2 \cdot \beta_H^2 \quad (\text{ähnlich } c_{CH}) .$$

Analog hierzu wurde eine "Längskraft-Gleitzahl" ϵ_{YH} definiert:

$$\epsilon_{YH} = \frac{c_{XH} - c_{XHO}}{c_{YH}}$$

Für kleine Driftwinkel (nur solche interessieren) gilt mit den oben angegebenen Beziehungen für c_{XH} und c_{YH} , sowie unter Beachtung von

$$c_{DH} = c_{DHO} + \epsilon_{CH} \cdot c_{CH} \quad \text{und} \quad c_{DHO} = -c_{XHO}$$

$$\epsilon_{YH} = \frac{c_{CH} \cdot \beta_H - c_{DHO} - \epsilon_{CH} \cdot c_{CH} + c_{DHO}}{c_{CH} + c_{DH} \cdot \beta_H} = \frac{\beta_H - \epsilon_{CH}}{1 + \beta_H (c_{DH}/c_{CH})}$$

Vereinfacht man diese Beziehung weiter, so läßt sich mit genügender Genauigkeit setzen

$$\epsilon_{YH} \approx \beta_H - \epsilon_{CH}$$

Daher gilt auch $\epsilon_{YH} \approx (1 - e_1) \cdot \beta_H - e_2 \cdot \beta_H^2$

Stellt man in einem Diagramm die Funktion $\epsilon_{CH} = f(\beta_H)$ und die Gerade $\epsilon_{CH} = \beta_H$ dar, so kann man demnach zwischen Kurve und Gerade direkt die Längskraft-Gleitzahl ϵ_{YH} entnehmen.

Wird $\beta_H > \epsilon_{CH}$, so wird ϵ_{YH} positiv, was einem Vortrieb entspricht. Es läßt sich in dieser Darstellung sofort erkennen, ob ein Rumpf bei Abdrift eine große zusätzliche Längskraft erfährt oder nicht, d.h. ob der effektive Zusatzwiderstand durch den Wind stark von der direkten Luftlängskraft abweicht oder nur ein geringer Einfluß des Driftwinkels zu erwarten ist (vgl. Abb. 2, 5, 8 usw.).

Wegen der bei Abdrift anderen Wellenbildung des Schiffes ist bei den Ergebnissen der Schrägschleppversuche grundsätzlich der Einfluß der Froudeschen Zahl zu beachten. Demzufolge sind auch Windkanalversuchsergebnisse mit schräg angeströmten Unterwasserschiffsmodellen nur unter dem Vorbehalt zu verwenden, daß der Einfluß der Froudeschen Zahl gering ist. Da bisher von keinem Rumpf sowohl Windkanalversuchsergebnisse als auch Schrägschleppversuchsergebnisse bei unterschiedlichen Froudeschen Zahlen vorliegen, kann hierüber noch kein abschließendes Urteil abgegeben werden. Vorliegende Rumpfuntersuchungen bei verschiedenen Froudeschen Zahlen (z.B. /4/, /5/) zeigen, daß der Einfluß der Froudeschen Zahl auf die Schrägschleppversuchsergebnisse zwar deutlich ist, jedoch von geringerer Größenordnung als der Abdrifteinfluß selbst.

2.3 Berechnung der effektiven Längskraft durch den Wind

Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Betrachtungsweisen: Man kann vom Kräftegleichgewicht in Fahrtrichtung (x_H) und senkrecht dazu (y_H) oder vom Kräftegleichgewicht in Schiffs-

längsrichtung (x) und senkrecht dazu (y) ausgehen. Beide Richtungen unterscheiden sich um den Driftwinkel β_H . Um den Rechenaufwand klein zu halten, wurden in beiden Fällen Vereinfachungen vorgenommen.

2.3.1 Berechnung im $x_H - y_H$ - System (Abb. 1)

Die Berechnungen werden für bestimmte angenommene Verhältnisse (v_W/v_H) = wahre Windgeschwindigkeit/Fahrtgeschwindigkeit und verschiedene Kurswinkel β_A zum Scheinbaren Wind v_A durchgeführt.

2.3.1.1 Ermittlung von v_A/v_H

Mit $\chi_A = \beta_A + \beta_H$ = Fahrtrichtung zum Scheinbaren Wind und v_W/v_H ergibt sich

$$\frac{v_A}{v_H} = \sqrt{\left(\frac{v_W}{v_H}\right)^2 - \sin^2 \chi_A} + \cos \chi_A$$

Da der Driftwinkel klein und zunächst unbekannt ist, kann näherungsweise $\chi_A \approx \beta_A$ gesetzt werden, d.h. der Einfluß des Driftwinkels auf v_A/v_H ist gering.

2.3.1.2 Errechnung von c_{CH}

Für die Luftkraftkomponente in y_H -Richtung gilt $Y_{HA} = c_{YHA} \cdot \frac{\rho_A}{2} v_A^2 \cdot A_{LA}$

Der Beiwert $c_{YHA} \approx c_{YA}$ wird als Funktion des Winkels β_A den Windkanalversuchsergebnissen entnommen. Das Kräftegleichgewicht senkrecht zu x_H ergibt dann

$$c_{YHA} \cdot \frac{\rho_A}{2} \cdot v_A^2 \cdot A_{LA} = c_{CH} \cdot \frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot L \cdot T \quad \text{und hieraus}$$

$$c_{CH} = c_{YHA} \cdot \frac{\rho_A}{\rho_H} \cdot \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2$$

2.3.1.3 Ermittlung des Driftwinkels β_H

kann entweder grafisch aus der Darstellung $c_{CH} = f(\beta_H)$ oder analytisch unter Beachtung der Ausgleichskurve für c_{CH} erfolgen:

$$c_{CH} = c_1 \cdot \beta_H + c_2 \cdot \beta_H^2 \quad \text{ergibt für}$$

$$\beta_H = -\frac{c_1}{2c_2} + \sqrt{\left(\frac{c_1}{2c_2}\right)^2 + \frac{c_{CH}}{c_2}} .$$

2.3.1.4 Beiwerte der Luftkraftkomponenten in x_H - und y_H -Richtung

$$c_{YHA} = c_{YA} \cdot \cos\beta_H - c_{XA} \cdot \sin\beta_H \approx c_{YA} - c_{XA} \cdot \beta_H \quad (\text{für kleine } \beta_H)$$

$$c_{XHA} = c_{YA} \cdot \sin\beta_H + c_{XA} \cdot \cos\beta_H \approx c_{YA} \cdot \beta_H + c_{XA} \quad (\text{für kleine } \beta_H)$$

Hieraus geht hervor, daß der Einfluß von β_H auf c_{YHA} gering ist, in 2.3.1.2 also zu Recht $c_{YHA} \approx c_{YA}$ gesetzt werden konnte.

2.3.1.5 Ermittlung der effektiven Luftkraft in Fahrtrichtung x_H

Die Gleitzahl der hydrodynamischen Kräfte am Schiffsrumpf ϵ_{CH} kann nun bestimmt werden, da $\epsilon_{CH} = f(\beta_H)$ grafisch oder analytisch (Ausgleichskurve) gegeben ist.

Hiermit erhält man für den effektiven Luftkraftbeiwert in Fahrtrichtung x_H :

$$c_{XHA}(\text{eff}) = c_{XHA} - \epsilon_{CH} \cdot c_{YHA}$$

mit $\epsilon_{CH} \cdot c_{YHA}$ = Längskrafterhöhung durch Abdrift des Rumpfes:

Da die Luftkraftkomponente senkrecht zu x_H gleich der Rumpferquerkraft ist, also

$$c_H = Y_{HA} \quad \text{gilt,}$$

wird die Widerstandserhöhung durch Abdrift

$$D_{HC} = \epsilon_{CH} \cdot c_H = \epsilon_{CH} \cdot Y_{HAY} = X_{HAY})$$

die durch die Seitenkraft Y_{HA} hervorgerufene zusätzliche Kraft in x_H -Richtung (vgl. /1/).

Setzt man die oben angegebenen Beziehungen für c_{YHA} und c_{XHA} ein, so ergibt sich

$$c_{XHA(\text{eff})} = c_{YA} \cdot \beta_H + c_{XA} - \epsilon_{CH} (c_{YA} - c_{XA} \cdot \beta_H)$$

$$c_{XHA(\text{eff})} = c_{XA} (1 + \epsilon_{CH} \cdot \beta_H) + c_{YA} (\beta_H - \epsilon_{CH})$$

2.3.2 Berechnung im x - y - System

2.3.2.1 Ermittlung von v_A/v_H unterscheidet sich nicht von 2.3.1.1

Wir setzen wiederum $\chi_A \approx \beta_A$, vernachlässigen also zunächst β_H und erhalten

$$\frac{v_A}{v_H} = \sqrt{\left(\frac{v_W}{v_H}\right)^2 - \sin^2 \chi_A} + \cos \chi_A$$

2.3.2.2 Ermittlung von c_{YA}

Die Kräfte senkrecht zur Schiffslängsrichtung müssen im Gleichgewicht stehen, also $Y_A = Y_H$ oder

$$c_{YA} \cdot \frac{\rho_A}{2} \cdot v_A^2 \cdot A_{LA} = c_{YH} \cdot \frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot L \cdot T \quad \text{und hieraus}$$

$$c_{YH} = c_{YA} \cdot \frac{\rho_A}{\rho_H} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \cdot \frac{A_{LA}}{L \cdot T}$$

2.3.2.3 Der Driftwinkel β_H kann ermittelt werden, wenn der Zusammenhang $\beta_H = f(c_{YH})$ grafisch oder analytisch gegeben ist. Hierbei kann für kleine Driftwinkel β_H angenähert gesetzt werden $c_{YH} \approx c_{CH}$ (vergl. 2.3.1.3).

2.3.2.4 Die Gleitzahl der zusätzlichen Längskraft ϵ_{YH} kann ermittelt werden, da β_H bekannt ist und aus Schrägschleppversuchsergebnissen die Beziehung $\epsilon_{YH} = f(\beta_H)$ ermittelt wurde: (vergl. 2.2)

$$\epsilon_{YH} = \frac{\beta_H - \epsilon_{CH}}{1 + \beta_H(c_{DH}/c_{CH})} \approx \beta_H - \epsilon_{CH} = f(\beta_H).$$

2.3.2.5 Effektiver Längskraftbeiwert

Die zusätzliche Längskraft durch Abdrift ist

$$X_H - X_{Ho} = \epsilon_{YH} \cdot Y_H = \epsilon_{YH} \cdot Y_A, \text{ denn } Y_A = Y_H \text{ (s. oben !)}.$$

Demnach wird der effektive Längskraftbeiwert

$$\underline{c_{XA(\text{eff})} = c_{XA} + \epsilon_{YH} \cdot c_{YA}}$$

Der Unterschied zwischen beiden Methoden besteht darin, daß nach der ersten der effektive Beiwert in Fahrtrichtung x_H ermittelt wird, nach dem zweiten Verfahren jedoch der effektive Längskraftbeiwert. Bei kleinen Driftwinkeln ist der Unterschied zwischen den Beiwerten gering. Die zweite, einfachere Methode liefert etwas zu große Beiwerte.

Maßgebend für den Windeinfluß auf das Fahrverhalten ist die Komponente in Fahrtrichtung x_H , die sich um den Driftwinkel β_H von der Schiffslängsrichtung unterscheidet.

Man könnte den in Längsrichtung x geringeren Fortschritt - entsprechend einer geringeren Fahrtgeschwindigkeit $v_{HX} = v_H \cdot \cos \beta_H$ -

durch den Ansatz eines fiktiven Widerstandszuwachses ausgleichen. Bei quadratischem Widerstandsanstieg würde dieser

$$\Delta D_H = D_H(1 - \cos^2 \beta_H), \text{ da } D_H = c_{DH} \cdot \frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot L \cdot T$$

$$D_{Hx} = c_{DH} \cdot \frac{\rho_H}{2} \cdot v_{Hx}^2 \cdot L \cdot T$$

$$\Delta D_H = D_H \cdot \sin^2 \beta_H \approx D_H \cdot \beta_H^2, \text{ mit dem Beiwert}$$

$$\Delta c_{DH} = c_{DH} \cdot \beta_H^2 \text{ (kleine Winkel } \beta_H).$$

3. Einfluß der effektiven Luft-Längskraft auf den Gesamtwiderstand des Schiffes

Der Anteil des Luftwiderstandes am Gesamtwiderstand des Schiffes hängt von der Windrichtung zum Schiff und vom Verhältnis der Windgeschwindigkeit zur Fahrtgeschwindigkeit ab.

Die Berechnung des Einflusses der effektiven Luft-Längskraft auf den Schiffswiderstand geht von der unter 2. behandelten Ermittlung des Beiwertes der effektiven Luftlängskraft aus, die bei seitlichem Wind und der dabei auftretenden Drift des Schiffes normalerweise größer ist als die direkte Luftkraftkomponente in Längsrichtung. Zum Vergleich soll die Berechnung sowohl für den Luftlängskraftbeiwert c_{XA} als auch für den effektiven Luftlängskraftbeiwert $c_{XA(\text{eff})}$ erfolgen.

Zunächst werden die Beziehungen mit dem Luftlängskraftbeiwert $c_{XA} = f(v_W/v_H; \beta_A)$ entwickelt:

Mit dem Beiwert des gesamten hydrodynamischen Widerstandes

$$c_T = \frac{R_T(H)}{\frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot S}, \text{ (mit } S = \text{benetzte Oberfläche des Schiffsrumpfes)}$$

der bei einem gegebenen Schiffsrumpf von der Froudeschen Zahl F_n

und der Reynoldszahl R_n abhängt, ergibt sich für den gesamten (hydrodynamischen und aerodynamischen) Widerstand des Schiffes

$$R_{H+A} = c_T(F_n, R_n) \cdot \frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot S + c_{XA}(v_W/v_H; \beta_A) \cdot \frac{\rho_A}{2} \cdot v_A^2 \cdot A_{LA} \cdot$$

mit dem Beiwert

$$c_{H+A} = \frac{R_{H+A}}{\frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot S} = c_T(F_n, R_n) + \frac{\rho_A}{\rho_H} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \cdot \frac{A_{LA}}{S} \cdot c_{XA}(v_W/v_H, \beta_A)$$

$$c_{H+A} = c_T(v_H) \cdot \left\{ 1 + \frac{\rho_A}{\rho_H} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \cdot \frac{A_{LA}}{S} \cdot \frac{c_{XA}(v_W/v_H, \beta_A)}{c_T(v_H)} \right\}$$

Wir schreiben $c_{H+A} = c_T(v_H) \cdot (1 + \varepsilon_A)$.

Hierin ist

$$\varepsilon_A = \frac{\rho_A}{\rho_H} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \cdot \frac{A_{LA}}{S} \cdot \frac{c_{XA}(v_W/v_H, \beta_A)}{c_T(v_H)}$$

$$\varepsilon_A = \frac{\rho_A}{\rho_H} \cdot \frac{A_{LA}}{S} \cdot \frac{1}{c_T(v_H)} \cdot c_{XA}(v_W/v_H, \beta_A) \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2$$

$$\varepsilon_A = k \cdot c_{XA}(v_W/v_H, \beta_A) \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2$$

das Verhältnis des Luft-Zusatzwiderstandes zum hydrodynamischen Widerstand.

"k" ist für ein bestimmtes Schiff bei einer vorgegebenen Geschwindigkeit eine Konstante. Sie hängt ab von der Fahrtgeschwindigkeit v_H , dem Verhältnis Überwasserlateralfäche zu benetzter Oberfläche und dem Dichteverhältnis $\rho_A/\rho_H \approx 1/835$.

Die folgenden Beispielrechnungen sollen zeigen, in welchen Grenzen sowohl die direkten als auch die effektiven Luft-Längskraftbeiwerte liegen, und zwar für Kurse zum Scheinbaren

Wind β_A bis zu 60° und für Verhältnisse v_W/v_H bis 3. Die Rechnungen werden für unterschiedliche Schiffstypen durchgeführt, in einigen Fällen für mehrere Beladungszustände.

Durch Berechnung der ϵ_A -Werte besteht die Möglichkeit, für die ausgewählten Schiffstypen die Verhältnisse des Luft-Zusatzwiderstandes zum hydrodynamischen Widerstand im interessierenden Kurswinkel- und Windgeschwindigkeitsbereich miteinander zu vergleichen. Hierbei werden die Kurswinkel γ_W zum wahren Wind wie folgt errechnet:

$$\sin \gamma_W = \frac{v_A}{v_W} \cdot \sin \beta_A = \frac{(v_A/v_H)}{(v_W/v_H)} \cdot \sin \beta_A$$

4. Beispielrechnungen

Für die Berechnungen wurden folgende Schiffe bzw. Schiffstypen ausgewählt:

1. Forschungsschiff "Meteor" 2615 BRT
2. Fährschiff "Kronprins Harald" (zwei Rumpfformen),
7000 BRT
3. Stückgut-Frachtschiff 10000 tdw, beladen und in Ballast
4. Tanker, 50000 tdw, beladen und in Ballast
5. Seeschlepper

4.1 Berechnungen für das Forschungsschiff "Meteor"

Für das Forschungsschiff wurden Windkanalversuche mit einem Modell des Überwasserschiffs und des Unterwasserschiffs vom Institut für Schiffbau durchgeführt (s. /2/).

Hauptabmessungen des Schiffes:

Länge L_{pp} = 72,80 m A_{LA} = 664 m² (Überwasserlateralfäche)
Breite B = 13,50 m S = 1245 m² (benetzte Oberfläche)
Tiefg. T = 5,10 m ∇ = 2865 m³ (Verdrängung)
 $A_{LA}/L \cdot T = 664/(72,8 \cdot 5,1) = 1,787.$

Geschwindigkeit $v_H = 12 \text{ kn} = 6,18 \text{ m/s}.$

4.1.1 Effektive Luft-Längskraft-Beiwerte

Grundlage der Berechnungen sind die den IfS-Versuchen entnommenen Luft-Längskraft- und Luft-Seitenkraft-Beiwerte für folgende Winkel:

β_A	c_{XA}	c_{YA}	β_A	c_{XA}	c_{YA}
0°	-0,231	0,017	45°	-0,199	0,666
15°	-0,248	0,190	60°	-0,136	0,799
30°	-0,237	0,444			

Diese Beiwerte sind nicht für den Windgeschwindigkeitsgradienten über der Flurplatte der Windkanalmeßstrecke korrigiert worden; dies gilt für alle bei den Beispielrechnungen verwendeten Windkanalversuchsergebnissen für Überwasserschiffe.

4.1.2 Kennzahlen des Unterwasserrumpfes

Hier standen leider keine Schrägschleppversuchsergebnisse zur Verfügung; es mußte auf die Ergebnisse der Messungen am Unterwasserrumpf im Windkanal zurückgegriffen werden (s. /2/). In diesem Falle wurden die Versuchsergebnisse für die über der Flurplatte vorhandene Grenzschicht korrigiert, sie gelten also näherungsweise für homogene Anströmung (Korrekturfaktor $f = 1,11$).

Verhältniswerte des Rumpfes:

Seitenverhältnis $\Lambda = 2 T/L = 0,140$ $L/B = 5,40$

Völligkeitsgrad $\delta = 0,540$

Schlankheitsgrad $c_{\Psi} = \sqrt[3]{V/L^3} = 7,42 \cdot 10^{-3}$

Entsprechend 2.2 wurden die Gleitzahlen ϵ_{CH} im interessierenden Driftwinkelbereich ermittelt und durch eine Ausgleichskurve (nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate) geglättet. Es ergab sich:

$$\epsilon_{CH} = 1,32 \cdot \beta_H - 1,97 \cdot \beta_H^2, \text{ näherungsweise für}$$

$$\epsilon_{YH} = -0,32 \cdot \beta_H + 1,97 \cdot \beta_H^2.$$

Die geglätteten Gleitzahlen sowie die verwendeten Seitenkraftbeiwerte sind in folgender Tabelle enthalten und in Abb. 2 dargestellt.

β_H	ϵ_{CH}	+ ϵ_{YH}	c_{YH}	Der Einfluß der Froude- schen Zahl mußte bei diesen Berechnungen vernachlässigt werden.
0	0	0	0	
2	0,0437	-0,0088	0,0106	
4	0,0826	-0,0128	0,0220	
6	0,1166	-0,0119	0,0340	
8	0,1458	-0,0062	0,0466	
10	0,1704	0,0041	0,0620	
12	0,1902	0,0192	0,0809	

4.1.3 Berechnung der effektiven Luft-Längskraftbeiwerte

Die Rechnung wurde nach dem Verfahren gemäß 2.3.2 durchgeführt. Zur Abkürzung des Verfahrens wurde die Driftwinkel- und Gleitzahlermittlung grafisch vorgenommen mit Hilfe von Abb. 2. Der Genauigkeitsverlust ist gering. Die Berechnung erfolgte in einer Tabelle:

β_A	$\frac{v_W}{v_H}$	$\frac{v_A}{v_H}$	c_{XA}	c_{YA}	c_{YH}	β_H°	ϵ_{YH}	$\epsilon_{YH} \cdot c_{YA}$	$c_{XA(eff)}$
15°	3	3,96	-0,248	0,190	0,0064	1,22°	-0,0060	-0,0011	-0,2491
	2	2,95	-0,248	0,190	0,0036	0,7	-0,0038	-0,0007	-0,2487
	1	1,932	-0,248	0,190	0,0015	0,3	-0,0018	-0,0003	-0,2483
30°	3	3,82	-0,237	0,444	0,0139	2,6	-0,0105	-0,0047	-0,2417
	2	2,80	-0,237	0,444	0,0075	1,42	-0,0067	-0,0030	-0,2400
	1	1,732	-0,237	0,444	0,0029	0,55	-0,0031	-0,0014	-0,2384
45°	3	3,62	-0,199	0,666	0,0187	3,4	-0,0120	-0,0080	-0,2070
	2	2,58	-0,199	0,666	0,0095	1,8	-0,0082	-0,0055	-0,2045
	1	1,414	-0,199	0,666	0,0029	0,55	-0,0031	-0,0021	-0,2011
60°	3	3,37	-0,136	0,799	0,0194	3,54	-0,0124	-0,0099	-0,1459
	2	2,30	-0,136	0,799	0,0091	1,74	-0,0077	-0,0062	-0,1422
	1	1,00	-0,136	0,799	0,0017	0,35	-0,0017	-0,0014	-0,1374

Die Berechnungsergebnisse zeigen, daß bei der "Meteor" der Driftwinkel- einfluß auf die effektiven Luft-Längskraftbeiwerte gering ist. Lediglich für die größten betrachteten Windgeschwindigkeiten ($v_W/v_H = 3$) treten nennenswerte Differenzen zwischen dem direkten und dem effektiven Luft-Längskraftbeiwert auf. Die Ergebnisse wurden in Abb. 3 dargestellt.

4.1.4 Verhältnis des Luftzusatzwiderstandes zum hydrodynamischen Widerstand

Mit Hilfe der nunmehr bekannten effektiven Luft-Längskraftbeiwerte lassen sich die Verhältnisse ϵ_A und $\epsilon_{A(eff)}$ der Luft-Längskraft zum hydrodynamischen Widerstand berechnen, wenn die benetzte Oberfläche S und der Beiwert des hydrodynamischen Widerstandes c_T bekannt sind (vergl. 3.).

Die Berechnungen wurden für $v_H = 12 \text{ kn} = 6,18 \text{ m/s}$ durchgeführt. Nach dem Jahrbuch der S.T.G. 1965 ergibt sich die benetzte Oberfläche S , umgerechnet auf den Tiefgang $T = 5,10 \text{ m}$ mit $S = 1245 \text{ m}^2$ (Jahrbuch S.T.G. 1965, Seite 162).

Nach den Angaben im Jahrbuch der S.T.G. 1968 (Seite 169) kann der Beiwert des hydrodynamischen Widerstandes mit $c_T = 3,75 \cdot 10^{-3}$ angenommen werden.

Mit $A_{LA}/S = 664/1245 = 0,533$ erhalten wir dann für

$$\epsilon_A = \frac{S_A}{S_H} \cdot \frac{A_{LA}}{S} \cdot \frac{1}{c_T(v_H)} \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 = \frac{0,533 \cdot 10^3}{835 \cdot 3,75} \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2$$

$$\epsilon_A = 0,1702 \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2, \text{ entsprechend gilt}$$

$$\epsilon_{A(\text{eff})} = 0,1702 \cdot c_{XA(\text{eff})} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2.$$

Folgende Tabelle enthält die Berechnungsergebnisse:

β_A	$\frac{v_W}{v_H}$	$\frac{v_A}{v_H}$	v_A		$\left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2$	c_{XA}	$c_{XA(\text{eff})}$	ϵ_A	$\epsilon_{A(\text{eff})}$	v_W	γ_W
			(kn)	(m/s)							
0°	3	4	48	24,7	16	0,231	0,231	0,630	0,630	36	0°
	2	3	36	18,5	9	0,231	0,231	0,354	0,354	24	0°
	1	2	24	12,36	4	0,231	0,231	0,1575	0,1575	12	0°
15°	3	3,96	47,5	24,5	15,7	0,248	0,2491	0,662	0,665	36	20°
	2	2,95	35,4	18,2	8,7	0,248	0,2487	0,367	0,3685	24	22,5°
	1	1,93	23,2	11,95	3,73	0,248	0,2483	0,1574	0,1576	12	30°
30°	3	3,82	45,8	23,6	14,6	0,237	0,2417	0,589	0,601	36	39,5°
	2	2,80	33,6	17,3	7,83	0,237	0,2400	0,316	0,320	24	44,5°
	1	1,73	20,8	10,7	3	0,237	0,2384	0,121	0,1217	12	60°
45°	3	3,62	43,5	22,4	13,1	0,199	0,2070	0,443	0,461	36	59,6°
	2	2,58	30,9	15,9	6,64	0,199	0,2045	0,225	0,231	24	66°
	1	1,41	17,0	8,74	2	0,199	0,2011	0,068	0,068	12	90°
60°	3	3,37	40,4	20,8	11,4	0,136	0,1459	0,264	0,283	36	84,8°
	2	2,30	27,6	14,2	5,29	0,136	0,1422	0,122	0,128	24	90°
	1	1,00	12,0	6,18	1,00	0,136	0,1374	0,023	0,023	12	120°

Die Ergebnisse wurden in Abb. 4 über der Luftgeschwindigkeit aufgetragen, jeweils für konstante Kurse zum Scheinbaren Wind. Eine weitere Darstellung zeigt die Abhängigkeit von ϵ_A bzw. $\epsilon_{A(\text{eff})}$ vom Kurs zum Scheinbaren und Wahren Wind für konstante Windgeschwindigkeiten v_W . Man erkennt deutlich die starke Beeinflussung der Fahrtleistung der "Meteor" durch den Wind. Wind von Sturmstärke ($v_W = 36 \text{ kn}$ für $v_W/v_H = 3$) ergibt bei Wind schräg von vorn einen Windwiderstand, der mehr als 60 Prozent des hydrodynamischen Widerstandes ausmacht. Das ist auf die - in Relation zum Unterwasserschiff - erheblichen Aufbauten des Schiffes zurückzuführen. Die "Meteor" muß also bei Gegenwind starke Fahrtverluste hinnehmen.

4.2 Berechnungen für das Fährschiff "Kronprins Harald"

Fährschiffe sind wegen ihres großen Überwasserschiffes und des schlanken Rumpfes (mit geringer Verdrängung) in hohem Maße den Einflüssen von seitlichem Wind ausgesetzt.

Bei den Windkanalversuchen des IfS was auch ein Modell des Fährschiffes "Kronprins Harald" untersucht worden. Die Ergebnisse dieser Versuche bilden die Grundlage dieser Berechnungen (s./1/).

Hauptabmessungen des Schiffes:

Länge $L_{WL} = 122,7 \text{ m}$ $A_{LA} = 1860 \text{ m}^2$ (Überwasserlateralf.)
 Breite $B = 18,1 \text{ m}$ $V = 6160 \text{ m}^3$ (Verdrängung)
 Tiefg. $T = 5,5 \text{ m}$ $A_{LA}/(L \cdot T) = 2,76$
 Geschwindigkeit $v_H = 20 \text{ kn} \hat{=} 10,3 \text{ m/s}$.

4.2.1 Luft-Längskraftbeiwerte und -Seitenkraftbeiwerte

Den IfS-Windkanalversuchsergebnissen wurden folgende Luft-Längs- und Seitenkraftbeiwerte des Schiffes entnommen:

β_A	c_{XA}	c_{YA}	β_A	c_{XA}	c_{YA}
0°	-0,045	0,000	45°	-0,012	0,825
15°	-0,054	0,210	60°	0,020	0,879
30°	-0,047	0,516			

4.2.2 Kennzahlen des Unterwasserrumpfes

Schrägschleppversuche für den Fährschiffsrumpf wurden nicht durchgeführt. Es wurden daher die Ergebnisse von Versuchen benutzt, die von Graff (s./5/) mit dem Rumpf eines Fracht- und Fahrgastschiffes bei verschiedenen Driftwinkeln durchgeführt wurden. Die Versuche von Graff zeigen den Einfluß der Froudeschen Zahl und der Vorschiffsform. Neben einer "Normalform" untersuchte er auch eine "Wulstform" und eine "Keilform" des Vorschiffes. Hier wurden lediglich die Ergebnisse für die "Normalform" und die "Wulstform" verwendet.

Formverhältnisse des Unterwasserschiffes:

$$L/B = 8,12, \quad B/T = 3, \quad \Lambda = 2 \cdot T/L = 0,082.$$

Das Seitenverhältnis Λ des Unterwasserrumpfes wird als wichtigste Einflußgröße auf die Rumpfkkräfte bei Schräganströmung betrachtet. Bei der Berechnung der effektiven Luft-Längskraftbeiwerte wurde von einem Tiefgang des Schiffes ausgegangen, der diesem Seitenverhältnis nicht entspricht ($\Lambda=0,082$ würde einem $T=5,04m$ entsprechen). Es wurde mit dem Normaltiefgang des Schiffes $T=5,5 m$ gerechnet, da das Verhältnis $A_{LA}/L \cdot T$ den bei Seitenwind auftretenden Driftwinkel entscheidend beeinflußt und somit auch den Längskraftzuwachs bei Abdrift.

Die Ausgleichskurven für die Gleitzahlen ϵ_{CH} und ϵ_{YH} lauten:

$$\text{Normalform} \quad \epsilon_{CH} = 1,94 \cdot \beta_H - 3,89 \cdot \beta_H^2, \quad \epsilon_{YH} = -0,94 \cdot \beta_H + 3,89 \cdot \beta_H^2$$

$$\text{"Wulstform"} \quad \epsilon_{CH} = 2,88 \cdot \beta_H - 11,77 \cdot \beta_H^2, \quad \epsilon_{YH} = -1,88 \cdot \beta_H + 11,77 \cdot \beta_H^2$$

Die Gleitzahlen gelten für eine Froudesche Zahl von $F_n = 0,230$ und wurden mit den benötigten Seitenkraftbeiwerten in folgender Tabelle sowie in Abb. 5 dargestellt.

β_H	Normalform			Wulstform		
	ϵ_{CH}	ϵ_{YH}	c_{YH}	ϵ_{CH}	ϵ_{YH}	c_{YH}
2°	0,0630	-0,0281	0,0066	0,0862	-0,0513	0,0086
4°	0,1166	-0,0467	0,0134	0,1439	-0,0741	0,0164
6°	0,1609	-0,0562	0,0257	0,1728	-0,0681	0,0260
8°	0,1952	-0,0556	0,0407	0,1729	-0,0339	0,0386

4.2.3 Berechnung der effektiven Luft-Längskraftbeiwerte

Der Rechnungsgang in abgekürzter Form ist für Normal- und Wulstform des Rumpfes in folgender Tabelle enthalten:

(Verhältnismerte v_A/v_H sind identisch mit den in der Tabelle unter 4.1.3 angegebenen Werten).

β_A°	$\frac{v_W}{v_H}$	c_{XA}	c_{YA}	c_{YH}	β_H°		$-\epsilon_{YH}$		$-c_{XA(eff)}$	
					N	W	N	W	N	W
15	3	-0,054	0,210	0,0109	3,3	2,6	0,040	0,061	0,0623	0,0668
	2	-0,054	0,210	0,0061	1,85	1,4	0,026	0,0375	0,0595	0,0619
	1	-0,054	0,210	0,0026	0,8	0,6	0,012	0,018	0,0565	0,0578
30	3	-0,047	0,516	0,0250	5,75	5,7	0,056	0,071	0,0760	0,0835
	2	-0,047	0,516	0,0134	3,85	3,25	0,046	0,069	0,0708	0,0826
	1	-0,047	0,516	0,0051	1,5	1,15	0,022	0,033	0,0585	0,0640
45	3	-0,012	0,825	0,0358	7,2	7,4	0,058	0,047	0,0598	0,0508
	2	-0,012	0,825	0,0182	4,7	4,4	0,051	0,076	0,0540	0,0746
	1	-0,012	0,825	0,0054	1,6	1,2	0,023	0,034	0,0310	0,0400
60	3	-0,020	0,879	0,0330	6,85	7,0	0,058	0,054	0,0310	0,0275
	2	-0,020	0,879	0,0154	4,2	3,75	0,048	0,0725	0,0222	0,0437
	1	-0,020	0,879	0,0029	0,85	0,65	0,013	0,019	-0,0086	-0,0033

Die effektiven Luft-Längskraftbeiwerte wurden für das Fährschiff mit beiden Rumpfformen in Abb. 6 über dem Kurswinkel zum Scheinbaren Wind aufgetragen. Es ist hier deutlich der starke Einfluß des als Parameter benutzten Verhältnisses v_W/v_H zu erkennen. Hier ist also der Einfluß

des bei Seitenwind vorhandenen Driftwinkels auf die effektive Luft-Längskraft wesentlich stärker ausgeprägt als bei der "Meteor". Auch der Unterschied zwischen beiden Rumpfformen ist beachtlich. Der größte effektive Längskraftbeiwert tritt bei $\beta_A = 30^\circ$ auf. Er ist bei $v_W/v_H = 3$ (entsprechend $v_W = 60$ kn, Windstärke Bft. 11) um 62 bis 78 Prozent größer als der direkte Luft-Längskraftbeiwert.

Bei $\beta_A = 45^\circ$ sind die effektiven Luft-Längskraftbeiwerte zwar wieder etwas geringer, sie sind aber in diesem Falle sogar 4,98 bzw. 4,23 mal so groß wie die direkten Luft-Längskraftbeiwerte ohne Driftwinkeleinfluß!

Die Berechnungsergebnisse zeigen, daß in diesem Falle die "Wulstform" ungünstiger ist, also eine größere Widerstandserhöhung bei seitlichem Wind auftritt.

4.2.4 Verhältnis des Luftzusatzwiderstandes zum hydrodynamischen Widerstand

Mit den Daten des Schiffsrumpfes der "Kronprinz Harald"

$$B/T = 3,28; \quad \delta = 0,508; \quad \varphi = 0,590; \quad c_V = \nabla/L^3 = 3,34 \cdot 10^{-3}$$

$$v_H = 20 \text{ kn} = 10,3 \text{ m/s}$$

$$F_n = 10,3 / \sqrt{9,81 \cdot 122,7} = 0,295$$

wird der Beiwert des hydrodynamischen Widerstandes c_T nach Taylor-Gertler abgeschätzt, da Schleppversuchsergebnisse nicht bekannt sind:

1. Restwiderstandsbeiwert $c_R = 1,46 \cdot 10^{-3}$ ($F_n = 0,295$; $\varphi = 0,59$;
B/T = 3,28)

2. Reibungswiderstandsbeiwert nach Schoenherr

$$c_F = 1,538 \cdot 10^{-3} \quad (R_n = 9,64 \cdot 10^8)$$

3. Rauheitszuschlag $\Delta c_F = 0,4 \cdot 10^{-3}$ gewählt

4. folglich erhält man für den Beiwert

$$c_T = c_R + c_F + \Delta c_F = (1,46 + 1,54 + 0,40) \cdot 10^{-3} = 3,40 \cdot 10^{-3}$$

Die benetzte Oberfläche S ergibt sich (ebenfalls nach Taylor-Gertler) mit

$$S = c_S \cdot \sqrt{V} \cdot L = 2,547 \cdot \sqrt{6160 \cdot 122,7} = 2210 \text{ m}^2.$$

Bemerkung: Die Schrägschleppversuchsergebnisse für den Fracht- und Fahrgastschiffs-Rumpf gelten für $F_n = 0,230$. Der Froudezahl-Einfluß wird jedoch als sekundär angesehen, d.h. die Berechnungen des Verhältnisses Luftlängskraft zu hydrodynamischem Widerstand erfolgt für die Dienstgeschwindigkeit des Fährschiffes $v_H = 20 \text{ kn}$, was einer höheren Froudezahl entspricht.

Die Verhältnisse ϵ_A bzw. $\epsilon_{A(\text{eff})}$ werden nur für die "Normalform" des Rumpfes ausgeführt; das Schiff besitzt keinen Wulstbug.

Die Berechnungen sind in folgender Tabelle enthalten (gekürzt):

Mit $A_{LA} = 1860 \text{ m}^2$ und $S = 2210 \text{ m}^2$ wird $A_{LA}/S = 1860/2210 = 0,842$.

Man erhält für

$$\epsilon_A = \frac{1}{835} \cdot 0,842 \cdot \frac{1}{3,4 \cdot 10^{-3}} \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 = 0,2965 \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2$$

β_A°	$\frac{v_W}{v_H}$	$\frac{v_A}{v_H}$	(kn)	v_A (m/s)	c_{XA}	$c_{XA(\text{eff})}$	ϵ_A	$\epsilon_{A(\text{eff})}$	v_W	γ_W
0	3	4	80	41,2	-0,045	-0,045	0,2135	0,2135	60	0°
	2	3	60	30,9	-0,045	-0,045	0,1200	0,1200	40	0°
	1	2	40	20,6	-0,045	-0,045	0,0533	0,0533	20	0°
15	3	3,96	79,2	40,7	-0,054	-0,0623	0,2515	0,2900	60	20°
	2	2,95	59,0	30,4	-0,054	-0,0595	0,1395	0,1535	40	22,5°
	1	1,93	38,6	19,9	-0,054	-0,0565	0,0598	0,0625	20	30°
30	3	3,82	76,4	39,3	-0,047	-0,0760	0,2030	0,3290	60	39,5°
	2	2,80	56	28,8	-0,047	-0,0708	0,1092	0,1645	40	44,5°
	1	1,73	34,6	17,8	-0,047	-0,0585	0,0418	0,0520	20	60°
45	3	3,62	72,4	37,3	-0,012	-0,0598	0,0466	0,2330	60	59,6°
	2	2,58	51,5	26,5	-0,012	-0,0540	0,0236	0,1062	40	66°
	1	1,41	28,3	14,6	-0,012	-0,0310	0,0071	0,0183	20	90°
60	3	3,37	67,4	34,6	-0,020	-0,0310	-0,0674	0,1044	60	84,8°
	2	2,30	46,0	23,7	-0,020	-0,0222	-0,0314	0,0348	40	90°
	1	1,00	20	10,3	-0,020	+0,0086	-0,0059	0,0025	20	120°

In Abb. 7 und 8 wurden die Verhältniszahlen ϵ_A und $\epsilon_{A(\text{eff})}$ für konstante Winkel β_A über der Luftgeschwindigkeit v_A sowie für konstante Windgeschwindigkeiten v_W über den Kurswinkeln zum scheinbaren und wahren Wind aufgetragen.

Die absolut größte Luft-Längskraft tritt bei etwa $\beta_A = 30^\circ$ bzw. $\gamma_W = 40^\circ$ auf. Der Rumpfeinfluß ist gesondert markiert worden und wird bei größeren Winkeln β_A noch größer. Die zusätzliche Längskraft durch Abdrift beträgt bei $\beta_A = 45^\circ$ schon ein Mehrfaches der direkten Luftkraftkomponente in Schiffslängsrichtung. Bei $\beta_A = 60^\circ$ ist die direkte Luftlängskraft ("Vortrieb") nach vorn gerichtet. Sie wird unter dem Driftwinkeleinfluß umgekehrt, also zum "Widerstand".

Bei einer Windgeschwindigkeit von $v_W = 60$ kn, was Windstärke 11 nach Beaufort entspricht, beträgt der Windwiderstand bei Fahrt gegen den Wind 22 Prozent, bei einem Kurs von ca. $35 - 40^\circ$ zum wahren Wind dagegen 33 Prozent des hydrodynamischen Widerstandes. Selbst bei seitlichem Wind muß noch mit einem Windwiderstand von 8 Prozent des Wasserwiderstandes gerechnet werden.

4.3 Berechnungen für ein Stückgut-Frachtschiff von 10 000 tdw

Hier interessiert naturgemäß vor allem die Ballastfahrt, da dann das Verhältnis Überwasserlateralfläche zu Unterwasserschiff besonders ungünstig ist. Zum Vergleich wurden auch die Verhältnisse am voll beladenen Schiff betrachtet.

Hauptabmessungen des Schiffes: (Klammerwerte für Ballastfahrt)

Länge $L_{WL} = 150,00$ m $A_{LA} = 1437$ m² (1930 m²) (Überwasser-
 $L_{pp} = 146,20$ m $\nabla = 15800$ (9120) m³ lateralfläche)

Breite $B = 20,00$ m

Tiefg. $T = 8,18$ m (4,87 m)

Geschwindigkeit $v_H = 18$ kn = 9,27 m/s.

4.3.1 Luft-Längskraft- und -Seitenkraft-Beiwerte

Bei der Untersuchung verschiedener Überwasserschiffsformen im Windkanal des IfS wurde auch ein 10 000 tdw-Frachter mit verschiedenen Aufbautenanordnungen untersucht, und zwar auf Normal- und Ballasttiefgang (= 60 Prozent Normal-Tiefgang).

Hier werden die Ergebnisse für Mittschiffslage des Aufbaus verwendet.

Folgende Beiwerte wurden den Ergebnissen entnommen:

beladen:			Ballastfahrt		
β_A	c_{XA}	c_{YA}	β_A	c_{XA}	c_{YA}
0°	-0,164	0,000	0°	-0,128	0,000
15°	-0,165	0,194	15°	-0,128	0,207
30°	-0,220	0,427	30°	-0,160	0,469
45°	-0,190	0,667	45°	-0,124	0,692
60°	-0,119	0,784	60°	-0,087	0,754

4.3.2 Kennzahlen des Unterwasserrumpfes

Als geeignetster Rumpf wurde der "Mariner" angesehen, für den am IfS Schrägschleppversuche mit den nötigen Angaben durchgeführt wurden (s. /4/).

Verhältniszahlen des Rumpfes:

Seitenverhältnis $\Lambda = 2 T/L = 0,102$ $L/B = 6,95$

Völligkeitsgrad $\delta = 0,600$

Froudesche Zahl $F_n = 0,203$.

Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wurden folgende Ausgleichskurven für ϵ_{CH} und ϵ_{YH} ermittelt:

$$\epsilon_{CH} = 2,58 \cdot \beta_H - 6,85 \cdot \beta_H^2, \quad \epsilon_{YH} = -1,58 \cdot \beta_H + 6,85 \cdot \beta_H^2 .$$

Die benötigten Rumpfkennzahlen werden in folgender Tabelle zusammengestellt und in Abb. 9 dargestellt.

β_H	ϵ_{CH}	ϵ_{YH}	c_{YH}	
2°	0,0814	-0,0465	0,0097	Die ϵ_{CH} - und ϵ_{YH} -Werte entsprechen der Ausgleichskurve, c_{YH} wurde direkt aus den Meßwerten errechnet.
5°	0,1728	-0,0855	0,0241	
7°	0,2142	-0,0920	0,0345	
10°	0,2400	-0,0655	0,0537	
12°	0,2390	-0,0296	0,0693	

Diese Kennzahlen wurden für beide Fahrtzustände ("beladen" und "in Ballast") verwendet.

4.3.3 Berechnung der effektiven Luft-Längskraftbeiwerte

Die folgenden Tabellenrechnungen zeigen die Berechnung in abgekürzter Form.

4.3.3.1 Beladenes Fahrzeug

$$A_{LA}/(L \cdot T) = 1437/(146,2 \cdot 8,18) = 1,202.$$

4.3.3.2 Schiff "in Ballast"

$$A_{LA}/(L \cdot T) = 1930/(146,2 \cdot 4,87) = 2,71.$$

In den Tabellen wurden die Verhältnismerte v_A/v_H und $(v_A/v_H)^2$ weggelassen, da diese Werte den entsprechenden Tabellen unter 4.1 entnommen werden können.

4.3.3.1 Beladenes Fahrzeug

β_A	$\frac{v_W}{v_H}$	$-c_{XA}$	c_{YA}	c_{YH}	β_H^0	$-\epsilon_{YH}$	$-c_{XA(eff)}$
15°	3	0,165	0,194	0,0044	0,96	0,024	0,1697
	2	0,165	0,194	0,0024	0,55	0,014	0,1677
	1	0,165	0,194	0,0011	0,30	0,006	0,1662
30°	3	0,220	0,427	0,0090	1,90	0,044	0,2388
	2	0,220	0,427	0,0048	1,05	0,026	0,2311
	1	0,220	0,427	0,0018	0,45	0,011	0,2247
45°	3	0,190	0,667	0,0129	2,75	0,059	0,2294
	2	0,190	0,667	0,0064	1,40	0,033	0,2120
	1	0,190	0,667	0,0019	0,45	0,011	0,1973
60°	3	0,119	0,784	0,0129	2,75	0,059	0,1652
	2	0,119	0,784	0,0060	1,30	0,031	0,1433
	1	0,119	0,784	0,0011	0,30	0,006	0,1237

4.3.3.2 Schiff "in Ballast"

β_A	$\frac{v_W}{v_H}$	$-c_{XA}$	c_{YA}	c_{YH}	β_H^0	$-\epsilon_{YH}$	$-c_{XA(eff)}$
15°	3	0,128	0,207	0,0106	2,26	0,050	0,1384
	2	0,128	0,207	0,0059	1,25	0,030	0,1342
	1	0,128	0,207	0,0025	0,60	0,014	0,1309
30°	3	0,160	0,469	0,0223	4,45	0,082	0,1984
	2	0,160	0,469	0,0119	2,08	0,048	0,1825
	1	0,160	0,469	0,0046	1,00	0,025	0,1717
45°	3	0,124	0,692	0,0302	6,20	0,092	0,1877
	2	0,124	0,692	0,0150	3,20	0,066	0,1697
	1	0,124	0,692	0,0045	1,00	0,025	0,1413
60°	3	0,087	0,754	0,0279	5,75	0,091	0,1556
	2	0,087	0,754	0,0130	2,80	0,060	0,1322
	1	0,087	0,754	0,0025	0,60	0,014	0,0976

In Abb. 10 sind die effektiven Luft-Längskraftbeiwerte für beide Beladungszustände dargestellt worden.

Der Driftwinkeleinfluß ist bis etwa $\beta_A = 20^\circ$ noch gering und wird dann stärker, was in besonderem Maße für die Ballastfahrt gilt. Bei der höchsten betrachteten Windgeschwindigkeit $v_W = 54$ kn (Windstärke 10) ist der effektive Luft-Längskraftbeiwert bei $\beta_A = 45^\circ$ um 21 (beladen) bzw. 51 (Ballast) Prozent, bei $\beta_A = 60^\circ$ sogar um 39 (beladen) bzw. 79 Prozent größer als die direkten Luft-Längskraftbeiwerte.

Die maximalen Luft-Längskraftbeiwerte treten bei β_A ca. $30 - 40^\circ$ auf.

4.3.4 Verhältnis des Luftzusatzwiderstandes zum hydrodynamischen Widerstand

Die Beiwerte des hydrodynamischen Widerstandes wurden wiederum nach Taylor-Gertler ermittelt

a) beladen: mit $\delta = 0,661$, $\varphi = 0,674$, $c_{\psi} = 5,06 \cdot 10^{-3}$, $B/T = 2,45$,
 $F_n = 0,245$; $R_n = 1,186 \cdot 10^9$

erhält man:

$$c_R = 1,06 \cdot 10^{-3}, \quad c_F = 1,50 \cdot 10^{-3}$$

Mit $\Delta c_F = 0,30 \cdot 10^{-3}$ ergibt sich

für

$$c_T = 2,86 \cdot 10^{-3}$$

b) Ballast-
fahrt:

mit $\delta = 0,640$, $\varphi = 0,653$, $c_{\psi} = 2,92 \cdot 10^{-3}$, $B/T = 4,11$,
 $F_n = 0,245$; $R_n = 1,186 \cdot 10^9$

ergeben sich (es müssen die Werte für $B/T = 3,75$ genommen werden):

$$c_R = 0,84 \cdot 10^{-3}, \quad c_F = 1,50 \cdot 10^{-3}.$$

Damit wird mit $\Delta c_F = 0,30 \cdot 10^{-3}$ der Beiwert des hydrodynamischen Widerstandes

$$c_T = 2,64 \cdot 10^{-3}$$

Für die benetzte Oberfläche S ergibt sich ebenfalls nach Taylor-Gertler:

a) beladen: $c_S = 2,554$; demnach $S = 2,554 \cdot \sqrt{15800 \cdot 146,2} = 3890 \text{ m}^2$;

Ballast: $c_S = 2,594$; also $S = 2,594 \cdot \sqrt{9120 \cdot 146,2} = 3000 \text{ m}^2$.

Die Berechnungen wurden in folgender Tabelle durchgeführt.

a) beladen: $A_{LA}/S = 1437/3890 = 0,370$,

somit wird

$$\epsilon_A = \frac{1}{835} \cdot 0,370 \cdot \frac{1}{2,86 \cdot 10^{-3}} \cdot c_{XA} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 = 0,155 \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 .$$

b) Ballast: $A_{LA}/S = 1930/3000 = 0,644$;

es ergibt sich für

$$\epsilon_A = \frac{1}{835} \cdot 0,644 \cdot \frac{1}{2,64 \cdot 10^{-3}} \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 = 0,292 \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 .$$

Entsprechende Beziehungen gelten für $\epsilon_{A(\text{eff})}$.

β_A^0	$\frac{v_W}{v_H}$	v_A		"beladen"				"Ballast"			
		(kn)	(m/s)	$-c_{XA}$	$-c_{XA(\text{eff})}$	ϵ_A	$\epsilon_{A(\text{eff})}$	$-c_{XA}$	$-c_{XA(\text{eff})}$	ϵ_A	$\epsilon_{A(\text{eff})}$
0	3	72	37,0	0,164	0,1640	0,406	0,406	0,128	0,128	0,599	0,599
	2	54	27,8	0,164	0,1640	0,406	0,406	0,128	0,128	0,337	0,337
	1	36	18,52	0,164	0,1640	0,102	0,102	0,128	0,128	0,150	0,150
15	3	71,3	36,7	0,165	0,1697	0,401	0,413	0,128	0,1384	0,587	0,634
	2	53,1	27,4	0,165	0,1677	0,222	0,226	0,128	0,1342	0,325	0,341
	1	34,8	17,9	0,165	0,1662	0,095	0,096	0,128	0,1309	0,140	0,142
30	3	68,8	35,4	0,220	0,2388	0,498	0,540	0,160	0,1984	0,682	0,845
	2	50,4	26,0	0,220	0,2311	0,269	0,283	0,160	0,1825	0,369	0,420
	1	31,2	16,05	0,220	0,2247	0,102	0,104	0,160	0,1717	0,140	0,150
45	3	65,2	33,6	0,190	0,2294	0,386	0,466	0,124	0,1877	0,474	0,718
	2	46,4	23,9	0,190	0,2120	0,196	0,218	0,124	0,1697	0,241	0,329
	1	25,5	13,1	0,190	0,1973	0,059	0,061	0,124	0,1413	0,072	0,083
60	3	60,7	31,3	0,119	0,1652	0,210	0,292	0,087	0,1556	0,290	0,518
	2	41,4	21,4	0,119	0,1433	0,098	0,118	0,087	0,1322	0,135	0,204
	1	18,0	9,27	0,119	0,1237	0,019	0,019	0,087	0,0976	0,025	0,029

Die Verhältniszahlen ε_A und $\varepsilon_{A(\text{eff})}$ wurden in den Abb. 11 und 12 aufgetragen, und zwar für konstante Kurswinkel β_A über der Luftgeschwindigkeit und für konstante Windgeschwindigkeiten v_W über dem Kurswinkel zum scheinbaren und wahren Wind.

Die Geschwindigkeiten des wahren Windes v_W ergeben sich für die Verhältnisse $v_W/v_H = 3, 2, 1$ mit $v_W = 54, 36, 18$ kn. Die Kurswinkel zum wahren Wind können den Tabellen unter 4.1.4 bzw. 4.2.4 entnommen werden.

Die Ergebnisse zeigen sowohl den Unterschied zwischen Ballastfahrt und Fahrt im beladenen Zustand als auch den Driftwinkleinfluß sehr deutlich.

Der größte Luftwiderstand tritt bei Kurswinkeln von β_A ca. 30° bzw. γ_W ca. 40° auf. Bei der höchsten betrachteten Windgeschwindigkeit von $v_W = 54$ kn (entsprechend Windstärke 10) kann der gesamte Luftwiderstand bei beladenem Schiff mit bis zu 54 Prozent Widerstandserhöhung zu rechnen ist.

In Ballastfahrt ist die effektive Luft-Längskraft bei $\beta_A = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ um ca. 8, 24, 51, 79 Prozent größer als die direkte Luftkraftkomponente in Schiffslängsrichtung. Bei Fahrt im beladenen Zustand ist der Einfluß geringer.

4.4 Berechnungen für einen Tanker von 50000 tdw

Neben dem Fall des beladenen Tankers wurde auch hier der besonders interessierende Beladungsfall "in Ballast" untersucht.

Hauptabmessungen des Schiffes (Klammerwerte für Ballastfahrt)

Länge $L_{pp} = 215,0$ m $A_{LA} = 1916$ m² (Überwasserlateralfäche)
Breite B = 31,1 m $V = 60500$ m³ (36150 m³) (Verdrängung)
Tiefg. T = 11,3 m
(6,85 m)

Geschwindigkeit $v_H = 17$ kn = 8,75 m/s.

4.4.1 Luft-Längskraft- und -Seitenkraft-Beiwerte

Bei den Windkanalversuchen mit Überwasserschiffsmodellen im IfS wurde ein Tanker in der älteren Bauweise mit Brücke vor Mitte Schiff sowie in der neueren Bauweise mit dem gesamten Aufbau achtern untersucht, auf Normaltiefgang und in Ballast, mit 60 Prozent Normaltiefgang.

Für den vorliegenden Bericht wurden die Windkanalversuchsergebnisse des "moderneren" Tankers mit gesamtem Aufbau achtern verwendet.

Folgende Beiwerte wurden dem IfS-Bericht (/3/) entnommen:

β_A	<u>beladen</u>		β_A	<u>Ballastfahrt</u>	
	c_{XA}	c_{YA}		c_{XA}	c_{YA}
0°	-0,267	0,000	0°	-0,186	0,000
15°	-0,223	0,167	15°	-0,150	0,180
30°	-0,242	0,320	30°	-0,146	0,359
45°	-0,208	0,495	45°	-0,140	0,538
60°	-0,130	0,628	60°	-0,080	0,648

4.4.2 Kennzahlen des Unterwasserrumpfes

Es wurden die Ergebnisse von Schrägschleppversuchen mit einem ähnlichen Rumpf ausgewertet und verwendet. Diese Versuche wurden von Bülow im IfS durchgeführt (s. /6/).

Verhältnismerte des Rumpfes:

$$\begin{aligned} \text{Seitenverhältnis } \Lambda = 2 T/L &= 0,1057 & L/B &= 7,18 \\ \text{Völligkeitsgrad } \delta &= 0,746 & c_{\nabla} &= \nabla/L^3 = 5,9 \cdot 10^{-3} \\ \text{Froudesche Zahl } F_n &= 0,160 & & \end{aligned}$$

Auch hier wurden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate Ausgleichskurven für die Querkraft- und Seitenkraft-Gleitzahlen ermittelt. Sie lauten:

$$\varepsilon_{CH} = 1,91 \cdot \beta_H - 2,965 \cdot \beta_H^2 ; \varepsilon_{YH} = -0,91 \cdot \beta_H + 2,965 \cdot \beta_H^2.$$

Die Gleitzahlen (laut Ausgleichskurve) und die Seitenkraftbeiwerte sind in folgender Tabelle sowie in Abb. 13 enthalten :

β_H°	ϵ_{CH}	$-\epsilon_{YH}$	c_{YH}	
2	0,0631	0,0282	0,0102	
4	0,1189	0,0491	0,0240	
6	0,1673	0,0626	0,0402	
8	0,2088	0,0692	0,0585	Diese Rumpfkennzahlen wurden für beide Beladungszustände verwendet.
10	0,2426	0,0681	0,0785	
12	0,2695	0,0601	0,1015	

4.4.3 Berechnung der effektiven Luft-Längskraft-Beiwerte

4.4.3.1 beladenes Fahrzeug

Mit $A_{LA} = 1916 \text{ m}^2$ und $L \cdot T = 215 \cdot 11,30$ wird

$A_{LA}/(L \cdot T) = 1916/(215 \cdot 11,3) = 0,789$. Die Berechnung geht aus folgender Tabelle hervor:

β_A°	$\frac{v_W}{v_H}$	$-c_{XA}$	c_{YA}	c_{YH}	β_H°	$-\epsilon_{YH}$	$-c_{XA}(\text{eff})$
15	3	0,223	0,165	0,0025	0,52	0,0085	0,2244
	2	0,223	0,165	0,0012	0,24	0,0040	0,2237
	1	0,223	0,165	0,0005	0,10	0,0020	0,2233
30	3	0,242	0,320	0,0044	0,95	0,0150	0,2468
	2	0,242	0,320	0,0024	0,50	0,0080	0,2446
	1	0,242	0,320	0,0009	0,25	0,0040	0,2433
45	3	0,208	0,495	0,0062	1,35	0,0200	0,2179
	2	0,208	0,495	0,0031	0,70	0,0110	0,2134
	1	0,208	0,495	0,0009	0,20	0,0035	0,2097
60	3	0,130	0,628	0,0068	1,44	0,0213	0,1434
	2	0,130	0,628	0,0032	0,70	0,0110	0,1369
	1	0,130	0,628	0,0006	0,10	0,0020	0,1313

4.4.3.2 Schiff "in Ballast"

$$A_{LA}/(L \cdot T) = 2880 / (215 \cdot 6,85) = 1,955.$$

β_A^0	$\frac{v_W}{v_H}$	$-c_{XA}$	c_{YA}	c_{YH}	β_H^0	$-\epsilon_{YH}$	$-c_{XA(eff)}$
15	3	0,150	0,180	0,0066	1,42	0,0210	0,1538
	2	0,150	0,180	0,0037	0,82	0,0130	0,1523
	1	0,150	0,180	0,0016	0,32	0,0054	0,1510
30	3	0,146	0,359	0,0121	2,30	0,0320	0,1575
	2	0,146	0,359	0,0065	1,40	0,0208	0,1535
	1	0,146	0,359	0,0025	0,56	0,0092	0,1493
45	3	0,140	0,538	0,0169	3,00	0,0395	0,1613
	2	0,140	0,538	0,0084	1,72	0,0247	0,1533
	1	0,140	0,538	0,0025	0,56	0,0092	0,1450
60	3	0,080	0,648	0,0173	3,10	0,0405	0,1062
	2	0,080	0,648	0,0081	1,66	0,0240	0,0956
	1	0,080	0,648	0,0015	0,32	0,0054	0,0835

Die Berechnungsergebnisse wurden in Abb. 14 dargestellt, und zwar für $v_W/v_H = 0,1,2$ und 3 . Hier ist selbst in Ballastfahrt der Driftwinkeleinfluß gering. Die Überwasserlateralfläche des Schiffes ist, verglichen mit dem Unterwasserschiff, gering.

4.4.4 Verhältnis des Luftzusatzwiderstandes zum hydrodynamischen Widerstand

Nach Taylor-Gertler ergaben sich folgende Beiwerte c_T des hydrodynamischen Widerstandes.

a) beladen:

$$\text{mit } \delta = 0,80; \quad \varphi = 0,81; \quad c_V = 6,08 \cdot 10^{-3}, \quad B/T = 2,75$$

$$F_n = 0,191; \quad R_n = 1,65 \cdot 10^9$$

ergibt sich

$$c_R = 1,24 \cdot 10^{-3}; \quad c_F = 1,441 \cdot 10^{-3}.$$

Mit $\Delta c_F = 0,150 \cdot 10^{-3}$ erhält man für $c_T = 2,831 \cdot 10^{-3}$.

b) Ballastfahrt:

Formparameter: $\delta = 0,80$; $\varphi = 0,81$; $c_V = 3,63 \cdot 10^{-3}$;
 $B/T = 4,60$; $F_n = 0,191$; $R_n = 1,65 \cdot 10^9$.

Hier mußte der Beiwert des hydrodynamischen Widerstandes nach den Angaben für das maximale $B/T = 3,75$ geschätzt werden.

$$c_R = 1,10 \cdot 10^{-3}; c_F = 1,441 \cdot 10^{-3}; \Delta c_F = 0,150 \cdot 10^{-3},$$

so daß

$$c_T = 2,691 \cdot 10^{-3}$$

wird.

Durch Vergleich mit den Angaben über den Restwiderstandsbeiwert von Tankern in /7/ konnte ausreichende Übereinstimmung festgestellt werden (für $L/B = 6,91$, $\delta = 0,80$ und $B/T = 2,76$ wird für $F_n = 0,180$ ein $c_R = 1,225 \cdot 10^{-3}$ ermittelt) *). *) $C_R^* = \frac{R_R}{S \cdot V^{2/3} \cdot V^2} = 0,0038$
 $S/V^{2/3}$ ca. 6,20.

Die benetzten Oberflächen ergeben sich ebenfalls nach Taylor-Gertler wie folgt:

$$a) \text{ beladen: } S = 2,60 \cdot \sqrt{215 \cdot 60500} = \underline{9400 \text{ m}^2}$$

$$b) \text{ Ballastfahrt } S_{\text{Ball}} \cong S - 2 L \cdot \Delta T = 9400 - 1910 = \underline{7490 \text{ m}^2}.$$

Die Berechnungen erfolgten wiederum in Tabellenform. Hierbei gelten die Beziehungen

a) beladenes Schiff:

$$A_{LA}/S = 1916/9400 = 0,204,$$

also

$$E_A = \frac{1}{835} \cdot 0,204 \cdot \frac{1}{2,83 \cdot 10^{-3}} \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 = 0,0865 \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2.$$

b) Schiff in Ballast:

$$A_{LA}/S = 2880/7490 = 0,385,$$

also wird

$$\epsilon_A = \frac{1}{835} \cdot 0,385 \cdot \frac{1}{2,69 \cdot 10^{-3}} \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 = 0,1713 \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2$$

Entsprechende Beziehungen gelten auch hier für $\epsilon_{A(\text{eff})}$.

β_A^0	$\frac{v_W}{v_H}$	v_A		"beladen"				"Ballast"			
		(kn)	(m/s)	$-c_{XA}$	$-c_{XA(\text{eff})}$	ϵ_A	$\epsilon_{A(\text{eff})}$	$-c_{XA}$	$-c_{XA(\text{eff})}$	ϵ_A	$\epsilon_{A(\text{eff})}$
0	3	68	35,0	0,267	0,267	0,370	0,370	0,186	0,186	0,510	0,510
	2	51	26,2	0,267	0,267	0,208	0,208	0,186	0,186	0,286	0,286
	1	34	17,5	0,267	0,267	0,093	0,093	0,186	0,186	0,127	0,127
15	3	67,3	34,7	0,223	0,2244	0,303	0,305	0,150	0,1538	0,404	0,414
	2	50,1	25,8	0,223	0,2237	0,168	0,168	0,150	0,1523	0,223	0,227
	1	32,9	16,9	0,223	0,2233	0,072	0,072	0,150	0,1510	0,096	0,097
30	3	64,9	33,4	0,243	0,2468	0,307	0,312	0,146	0,1575	0,365	0,394
	2	47,6	24,5	0,243	0,2446	0,166	0,167	0,146	0,1535	0,197	0,208
	1	29,5	15,2	0,243	0,2433	0,063	0,063	0,146	0,1493	0,075	0,077
45	3	61,6	31,7	0,208	0,2179	0,236	0,247	0,140	0,1613	0,314	0,362
	2	43,8	22,6	0,208	0,2134	0,119	0,123	0,140	0,1533	0,159	0,174
	1	24,0	12,4	0,208	0,2097	0,036	0,036	0,140	0,1450	0,048	0,050
60	3	57,3	29,5	0,130	0,1434	0,128	0,141	0,080	0,1062	0,156	0,208
	2	39,2	20,2	0,130	0,1369	0,060	0,064	0,080	0,0956	0,073	0,087
	1	17,0	8,75	0,130	0,1313	0,011	0,011	0,080	0,0835	0,014	0,014

Die Winkel γ_W zwischen Schiffs- und Windrichtung wurden nicht in die Tabelle aufgenommen, da sie identisch sind mit den Winkeln in der entsprechenden Tabelle unter 4.2.4.

Die Verhältnismerte ϵ_A und $\epsilon_{A(\text{eff})}$ wurden in den Abb. 15 und 16 aufgetragen. Sie entsprechen qualitativ den Ergebnissen für das Frachtschiff, die Verhältnismerte sind jedoch kleiner und die Einflüsse des Driftwinkels auf die Ergebnisse geringer als beim Frachter.

Immerhin kann der Luftwiderstand bei einer Windgeschwindigkeit von 51 kn (entsprechend Windstärke 10) bis zu 50 Prozent des hydrodynamischen Widerstandes betragen. Dies gilt für die Ballastfahrt, im beladenen Zustand sind es bis zu 37 Prozent.

4.5 Berechnungen für einen Seeschlepper

Die geometrischen Verhältnisse sowie die Überwasserschiffsform eines Seeschleppers ähneln denen des Forschungsschiffes "Meteor". Da bei der HSVA Schrägschleppversuche mit dem Modell eines Seeschleppers durchgeführt wurden, einschließlich der Messung aller benötigten Komponenten der Rumpfkraft, bot sich hier die Möglichkeit eines Vergleichs.

Hauptabmessungen des Schiffes:

Länge $L_{pp} = 69,15 \text{ m}$ $A_{LA} = 503 \text{ m}^2$ (Überwasserlateralfäche, nach ähnlichen Seeschleppern geschätzt)
 Breite $B = 13,20 \text{ m}$
 Tiefg. $T = 5,59 \text{ m}$ $V = 3052 \text{ m}^3$ (Verdrängung)
 Geschwindigkeit $v_H = 18,5 \text{ kn} = 9,52 \text{ m/s}$.

4.5.1 Luft-Längskraft- und -Seitenkraft-Beiwerte

Obwohl die Abmessungsverhältnisse des bei den IfS-Windkanalversuchen untersuchten Seeschleppers sich von denen des zu berechnenden unterscheiden, wurden die Luftkraft-Beiwerte dieses kleineren Seeschleppers verwendet. Damit wird der Einfluß der Überwasserschiffsform (insbesondere des "Seitenverhältnisses" des Überwasserlateralplanes) geringer bewertet als das Verhältnis $A_{LA}/(L \cdot T)$, das bei dem betrachteten größeren Seeschlepper kleiner ist.

Dem IfS-Bericht (/3/) wurden folgende Luftkraft-Beiwerte entnommen:

β_A	$-c_{XA}$	c_{YA}	β_A	$-c_{XA}$	c_{YA}
0°	0,246	0,000 *)	45°	0,205	0,722
15°	0,244	0,195	60°	0,112	0,849
30°	0,243	0,462			

*) Gemessen wurde $c_{YA} = 0,045$ wegen Unsymmetrie des Rumpfes

4.5.2 Kennzahlen des Unterwasserrumpfes

Die HSVA (s. /8/) führte, wie erwähnt, Schrägschleppversuche mit dem Modell eines größeren Seeschleppers durch, dessen Hauptabmessungen unter 4.5.1 gegeben sind. Diese Versuche wurden den folgenden Berechnungen zugrunde gelegt.

Verhältniswerte des Rumpfes:

$$\begin{array}{ll} \text{Seitenverhältnis } \Lambda = 2 T/L = 0,1615 & L/B = 5,24 \\ \text{Völligkeitsgrad } \delta = 0,562 & c_{\nabla} = \nabla/L^3 = 9,2 \cdot 10^{-3}. \\ \text{Froudesche Zahl } F_n = 0,274 & \end{array}$$

Für die Querkraft- und die Seitenkraft-Gleitzahlen ergaben sich folgende Ausgleichskurven:

$$\epsilon_{CH} = 1,50 \cdot \beta_H - 2,70 \cdot \beta_H^2 \quad \text{und} \quad \epsilon_{YH} = -0,50 \cdot \beta_H + 2,70 \cdot \beta_H^2$$

Die Gleitzahlen laut Ausgleichsrechnung und die Seitenkraft-Beiwerte sind im folgenden tabellarisch wiedergegeben und in Abb. 17 dargestellt:

β_H^0	ϵ_{CH}	ϵ_{YH}	c_{YH}
3	0,0711	-0,0187	0,0156
6	0,1274	-0,0227	0,0326
9	0,1684	-0,0113	0,0546
12	0,1945	+0,0149	0,0848

4.5.3 Berechnung der effektiven Luft-Längskraft-Beiwerte

Mit $A_{LA}/(L \cdot T) = 503/(69,2 \cdot 5,59) = 1,30$ werden die effektiven Luft-Längskraft-Beiwerte in folgender Tabelle berechnet:

β_A^0	$\frac{v_W}{v_H}$	$-c_{XA}$	c_{YA}	c_{YH}	β_H^0	$-\varepsilon_{YH}$	$-c_{XA(eff)}$
15	3	0,244	0,195	0,0048	0,95	0,0095	0,2460
	2	0,244	0,195	0,0026	0,50	0,0055	0,2451
	1	0,244	0,195	0,0011	0,25	0,0030	0,2446
30	3	0,243	0,462	0,0105	2,02	0,0158	0,2503
	2	0,243	0,462	0,0056	1,10	0,0105	0,2479
	1	0,243	0,462	0,0022	0,45	0,0051	0,2454
45	3	0,205	0,722	0,0151	2,93	0,0190	0,2187
	2	0,205	0,722	0,0075	1,50	0,0130	0,2144
	1	0,205	0,722	0,0023	0,45	0,0051	0,2087
60	3	0,112	0,849	0,0151	2,93	0,0190	0,1281
	2	0,112	0,849	0,0070	1,40	0,0125	0,1226
	1	0,112	0,849	0,0013	0,30	0,0040	0,1154

Die Auftragung der Rechnungsergebnisse über β_A zeigt die erwarteten geringen Differenzen zwischen den direkten und den effektiven Luft-Längskraft-Beiwerten (Abb. 18).

Auch die Absolutwerte der Beizahlen sind denen der "Meteor" ähnlich.

4.5.4 Verhältnis des Luftzusatzwiderstandes zum hydrodynamischen Widerstand

Nach Angaben der HSVA beträgt der Beiwert des hydrodynamischen Widerstandes $c_T = 7,22 \cdot 10^{-3}$ bei $v_H = 18,5$ kn, was einer Froudeschen Zahl $F_n = 0,366$ entspricht.

Die benetzte Oberfläche wird mit $S = 1305$ m² angegeben.

Somit ergibt sich ein Verhältnis $A_{LA}/S = 503/1305 = 0,385$.

Für die Berechnungen - in Tabellenform - gilt

$$\varepsilon_A = \frac{1}{835} \cdot 0,385 \cdot \frac{1}{7,22 \cdot 10^{-3}} \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 = 0,0639 \cdot c_{XA} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 .$$

(entsprechende Beziehungen für $\varepsilon_{A(eff)}$).

β_A°	$\frac{v_W}{v_H}$	v_A (kn)	(m/s)	$-c_{XA}$	$-c_{XA(eff)}$	ϵ_A	$\epsilon_{A(eff)}$	δ_W
0	3	74	38,1	0,246	0,246	0,252	0,252	0°
	2	55,5	28,6	0,246	0,246	0,141	0,141	0°
	1	37	18,5	0,246	0,246	0,063	0,063	0°
15	3	73,2	37,7	0,244	0,246	0,245	0,247	20°
	2	54,6	28,1	0,244	0,2451	0,136	0,136	22,5°
	1	35,8	18,4	0,244	0,2446	0,058	0,058	30°
30	3	70,7	36,4	0,243	0,2503	0,226	0,234	39,5°
	2	51,8	26,7	0,243	0,2479	0,122	0,125	44,5°
	1	32,1	16,5	0,243	0,2454	0,047	0,047	60°
45	3	67,1	34,5	0,205	0,2187	0,172	0,183	59,6°
	2	47,7	24,6	0,205	0,2144	0,087	0,091	66°
	1	26,2	13,5	0,205	0,2087	0,026	0,027	90°
60	3	62,4	32,1	0,112	0,1281	0,082	0,093	84,8°
	2	42,6	21,9	0,112	0,1226	0,038	0,042	90°
	1	18,5	9,52	0,112	0,1154	0,007	0,007	120°

Die Ergebnisse der Berechnungen wurden in den Abb. 19 und 20 dargestellt. Sie zeigen bis zu $\beta_A = 30^\circ$ etwa gleichbleibende Verhältnisse Luftzusatzwiderstand zum hydrodynamischen Widerstand; bei größeren Winkeln β_A sind die Verhältniszahlen kleiner, der Rumpfdrifteinfluß wird jedoch größer. Wegen des höheren Rumpfwiderstandes des Seeschleppers ergeben sich höhere Werte ϵ_A als beim Forschungsschiff "Meteor"; für die "Meteor" wurde eine Fahrtgeschwindigkeit $v_H = 12$ kn, beim Seeschlepper $v_H = 18,5$ kn angenommen (Rumpfwiderstandsbeiwerte $c_T = 3,75 \cdot 10^{-3}$ bzw. $7,22 \cdot 10^{-3}$). Der Luftzusatzwiderstand des Seeschleppers erreicht bei $v_W = 55,5$ kn, was Windstärke 10 entspricht, etwa 25 Prozent des hydrodynamischen Widerstandes bei Wind von vorn und nimmt ab, wenn der Wind seitlicher einfällt.

5. Vergleich der Ergebnisse - Zusammenfassung

Es wurden bewußt sehr unterschiedliche Schiffstypen hinsichtlich

ihres effektiven Luftkraftbeiwertes und des Verhältnisses effektive Luft-Längskraft zum hydrodynamischen Widerstand untersucht.

Die direkten Luft-Längskraftbeiwerte wurden für die gewählten Schiffe in Abb. 21 a über β_A aufgetragen. Sie können mit den in Abb. 21 b aufgetragenen effektiven Luft-Längskraftbeiwerten verglichen werden. Um die Unterschiede durch die windbedingte Drift deutlich werden zu lassen, wurde $c_{XA(\text{eff})}$ für ein Verhältnis $v_W/v_H = 3$ aufgetragen.

Die Absolutbeträge der Beiwerte c_{XA} und $c_{XA(\text{eff})}$ unterscheiden sich bei den einzelnen Schiffstypen erheblich. Dies ist u.a. auf den Bezug der Beiwerte auf die Überwasserlateralfläche A_{LA} zurückzuführen:

Schiffe mit großer Überwasserlateralfläche A_{LA} (im Vergleich zum sogenannten Lufthauptspant) weisen relativ niedrige Beiwerte auf (s. Fährschiff). Bei größer werdendem Winkel β_A steigt infolge der wegfallenden gegenseitigen Windabdeckung bei Schiffen mit stark gegliederten Aufbauten der Beiwert wieder an (s. Frachter) und erreicht bei etwa $\beta_A = 30^\circ$ einen Maximalwert. "Meteor" und Seeschlepper weisen wegen des bei kleinen Fahrzeugen üblichen großen Verhältnisses Lufthauptspantfläche zu Überwasserlateralfläche die nahezu größten Beiwerte c_{XA} und $c_{XA(\text{eff})}$ auf.

Die in Abb. 21 b dargestellten Beiwerte $c_{XA(\text{eff})}$ weichen um so mehr von den Werten c_{XA} ab, je größer β_A wird. Auf die Abhängigkeit des Driftwinkleinflusses vom Verhältnis $A_{LA}/(L \cdot T)$ wurde bereits hingewiesen. Schiffe mit im Vergleich zum Unterwasser-schiff großen Überwasserlateralplan weisen die größten Unterschiede zwischen c_{XA} und $c_{XA(\text{eff})}$ auf.

Aufschlußreich ist auch eine vergleichende Betrachtung der in der Abb. 22 a und b dargestellten Verhältnisswerte $\epsilon_{A(\text{eff})}$ des effektiven Luftzusatzwiderstandes zum hydrodynamischen Widerstand für verschiedene Schiffstypen.

Diese Darstellung $\epsilon_{A(\text{eff})}$ über γ_W (Kurswinkel zum wahren Wind) erfolgte einmal für konstante Verhältnisse $v_W/v_H = 3$ und dann für konstante Windgeschwindigkeit $v_W = 36$ kn, was einem Verhältnis

$v_W/v_H = 3$ beim Forschungsschiff "Meteor" entspricht.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß das Verhältnis Luftzusatzwiderstand zum Rumpfwiderstand für diejenigen Schiffe am größten ist, die infolge niedriger Geschwindigkeit oder günstiger Rumpfform einen kleinen hydrodynamischen Widerstand besitzen.

In Abb. 22 a wurden an den Kurven die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten angegeben, schwankend zwischen 36 kn (Windstärke 8) und 60 kn (Windstärke 11).

Trotz umfangreicher Aufbauten sind daher die Kurven für das Fährschiff und den Seeschlepper im unteren Bereich des Diagramms zu finden.

In Abb. 22 b ist der Einfluß unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten eliminiert. Dennoch wirkt infolge des geschwindigkeitsabhängigen Fahrtwindes eine unterschiedliche Luftgeschwindigkeit v_A ein. Aus der Abb. ist deutlich die Tendenz zu erkennen, daß mit wachsender Fahrtgeschwindigkeit v_H das Verhältnis $\epsilon_{A(\text{eff})}$ kleiner wird (die 12 kn schnelle "Meteor" begrenzt das Diagramm nach oben, das 20 kn schnelle Fährschiff dagegen nach unten).

Zu erkennen ist auch, daß der Luftzusatzwiderstand in der Ballastfahrt einen bedeutend größeren Einfluß hat. Die maximale Widerstandserhöhung durch den Wind tritt beim Frachtschiff und beim Fährschiff bei einem Kurs zum wahren Wind von 45° auf, bei den anderen untersuchten Schiffstypen nimmt $\epsilon_{A(\text{eff})}$ bereits ab, sobald der Wind nicht mehr genau von vorn kommt (Tanker, Seeschlepper), oder sobald $\chi_W 20^\circ$ wird.

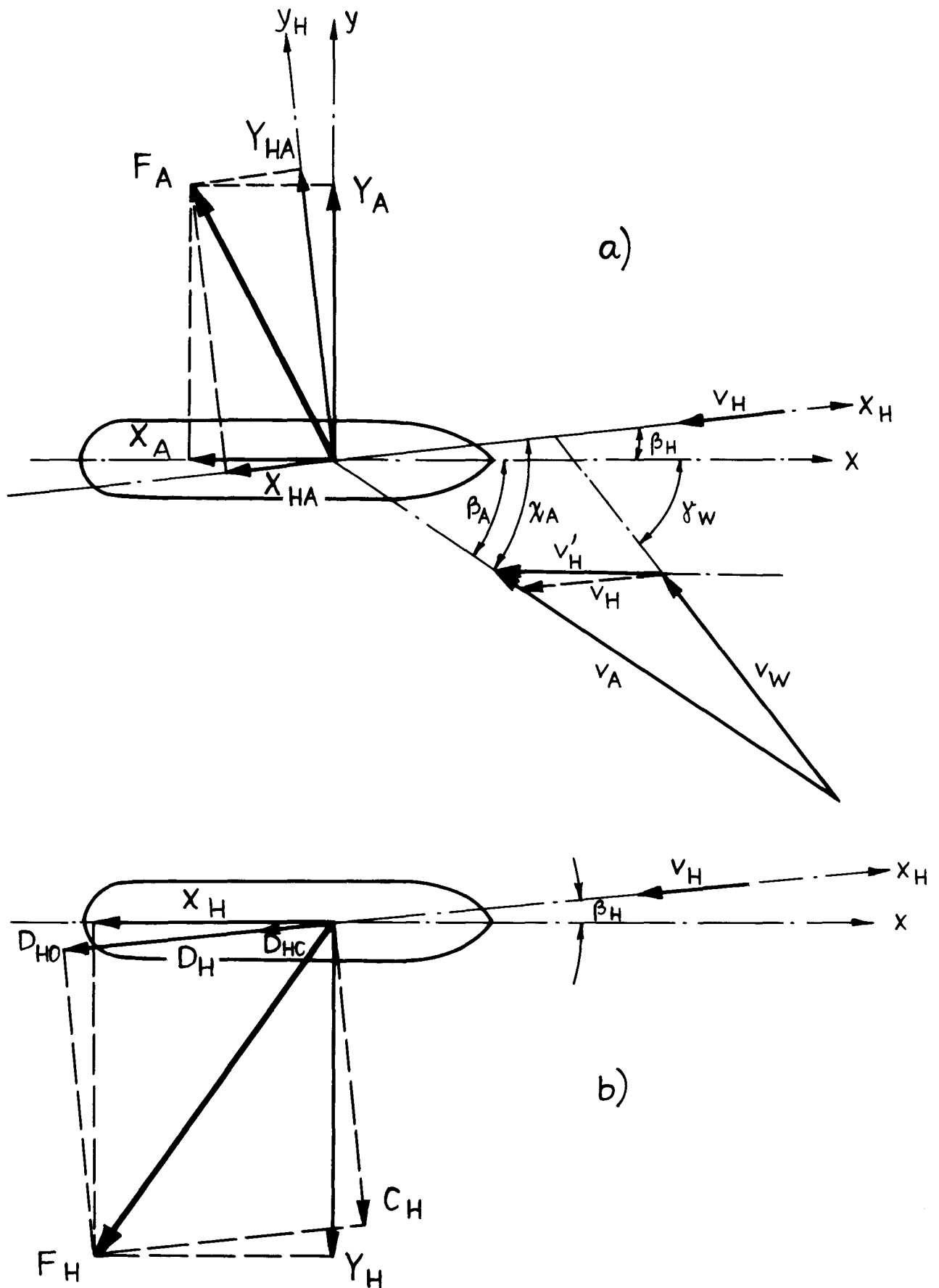
6. Schrifttum

- /1/ Wagner, B.:
"Windkräfte an Überwasserschiffen"
Jahrb. STG 61 (1967), S. 227
- /2/ Wagner, B.:
"Windkanalversuche mit dem Modell des Forschungsschiffes "Meteor"
Bericht des IfS Nr. 153 (Februar 1966)
- /3/ IfS-Berichte Nr. 187 bis 189
- /4/ Wagner, B.:
"Schrägschleppversuche für einen Seglerrumpf mit und ohne Balkenkiel und für den 'Mariner'"
IfS-Bericht Nr. 186
- /5/ Graff, W.:
"Versuche über den Einfluß der Vorschiffsform auf das Gieren und Steuern von Schiffen"
HSVA-Bericht Nr. 319 (1936)
- /6/ Bülow, H.:
"Hydrodynamische Untersuchungen zur Bestimmung von Stabilitätskriterien stationär bestimmter Körper"
IfS-Bericht Nr. 108
- /7/ FDS-Mitteilung Nr. 3/1967:
"Übersicht über Modellversuchsergebnisse von Einschrauben-Frachtschiffen mit großer Völligkeit"

7. Symbolübersicht

x, y - Richtung	Schiffslängsrichtung und senkrecht dazu
x_H, y_H -Richtung	Fahrtrichtung des Schiffes und senkrecht dazu
L, B, T	Länge, Breite und Tiefgang des Unterwasserrumpfes
$L \cdot T$	Unterwasserlateralfläche
A_{LA}	Überwasserlateralfläche des Schiffes
S	benetzte Oberfläche des Schiffes
∇	Verdrängung des Schiffes
$\Lambda = 2 T/L$	Seitenverhältnis des Unterwasserschiffes
v_W	Geschwindigkeit des wahren Windes
v_A	Geschwindigkeit des scheinbaren Windes
v_H	Fahrtgeschwindigkeit des Schiffes
β_A	Winkel zwischen Schiffslängsrichtung und scheinbarem Wind (aerodynamischer Driftwinkel)
δ_W	Winkel zwischen Schiffslängsrichtung und wahren Wind
χ_A	Winkel zwischen Fahrtrichtung und scheinbarem Wind
β_H	(hydrodynamischer) Driftwinkel des Schiffes
ρ_A, ρ_H	Dichte von Luft bzw. Wasser
c_{CA}, c_{DA}	Beiwerte der Luftquerkraft C_A bzw. des Luftwiderstandes D_A
c_{XA}, c_{YA}	Beiwerte der Luftlängskraft X_A bzw. der Luftseitenkraft Y_A
$c_{XA(eff)}$	effektiver Luft-Längskraftbeiwert in Schiffslängsrichtung
$c_{XHA(eff)}$	effektiver Luft-Längskraftbeiwert in Fahrtrichtung x_H
c_{CH}, c_{DH}	Beiwerte der hydrodynamischen Querkraft C_H bzw. des hydrodynamischen Widerstandes D_H

c_{XH}, c_{YH}	Beiwerte der hydrodynamischen Längskraft X_H bzw. Seitenkraft Y_H
$\epsilon_{CH}, \epsilon_{YH}$	Querkraft- bzw. Längskraft-Gleitzahl der Kräfte am Überwasserschiff
$\epsilon_A, \epsilon_{A(\text{eff})}$	Verhältnis des direkten bzw. effektiven Luft- zusatzwiderstandes zum hydrodynamischen Wider- stand R_T



Geschwindigkeiten und Kräfte
 a) am Überwasserschiff
 b) am Unterwasserschiff

Abb. 2

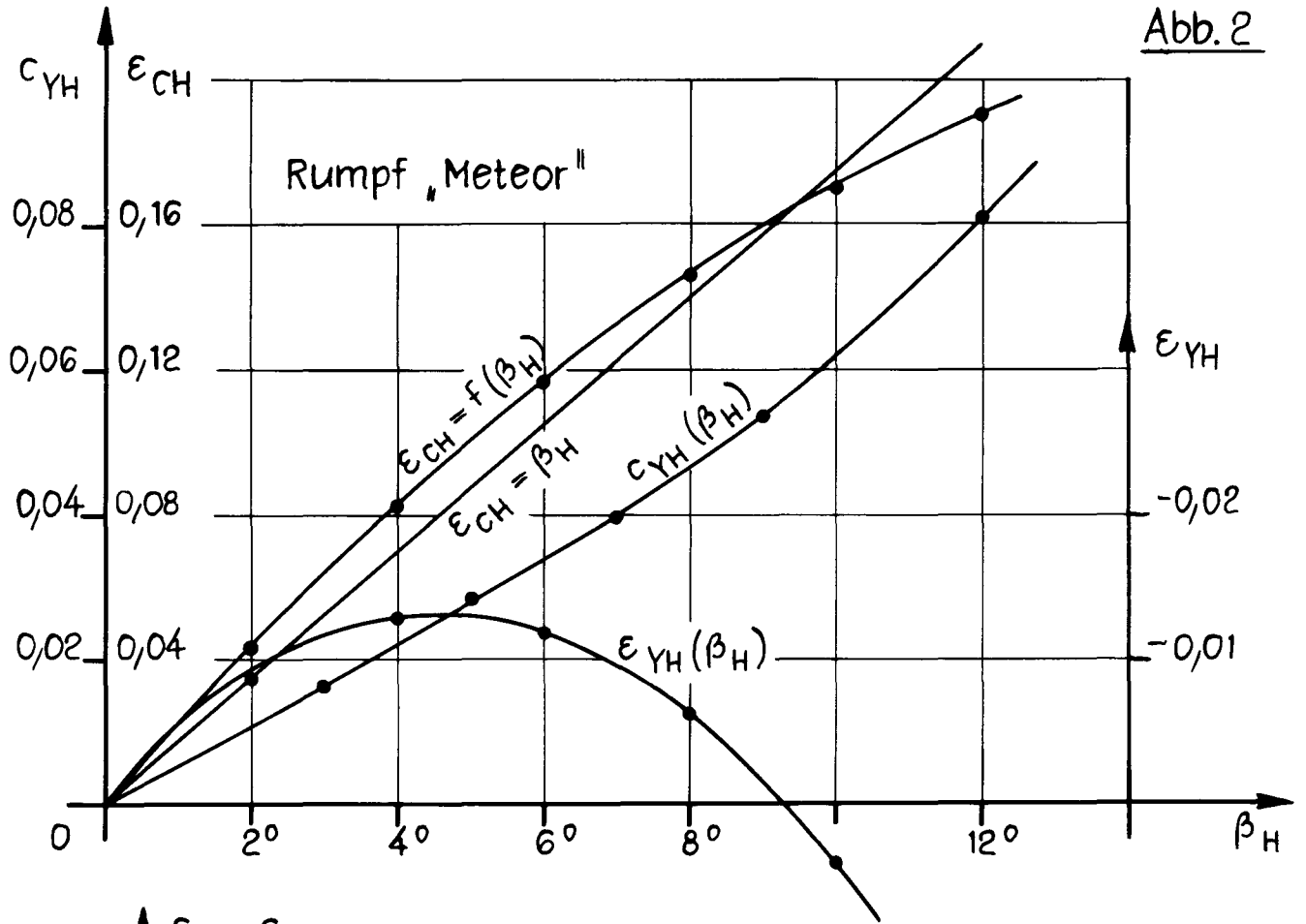
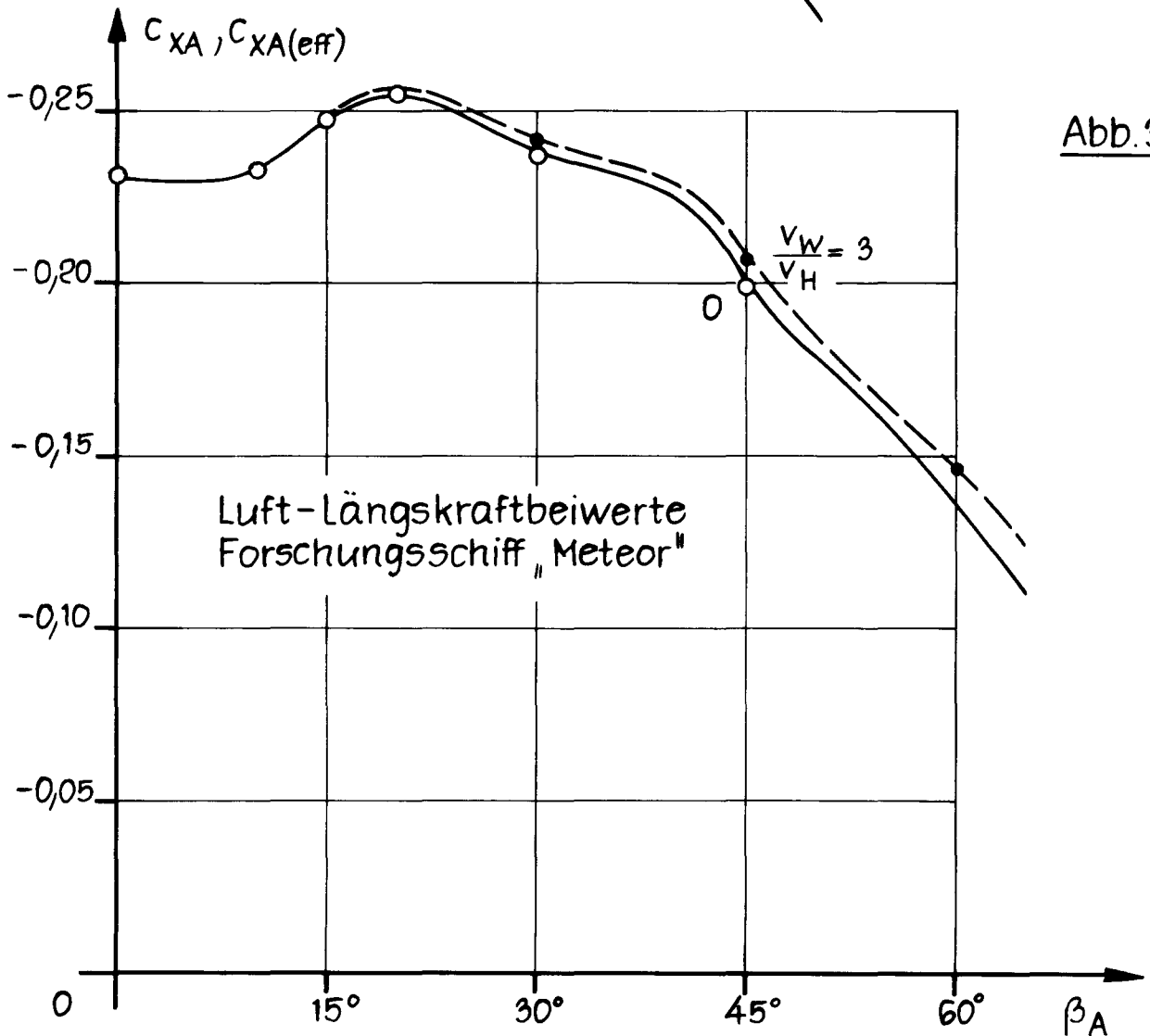
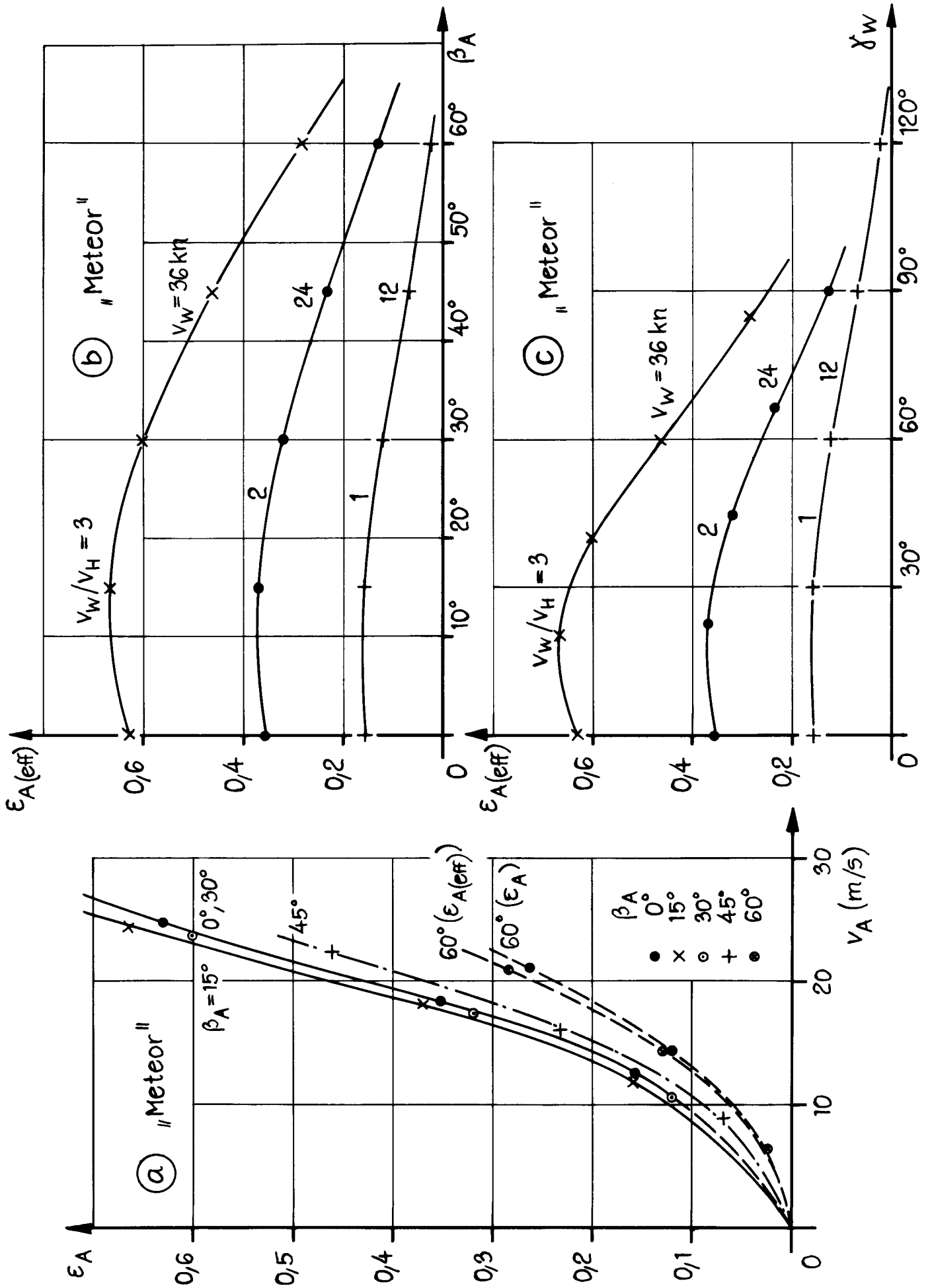


Abb. 3



Berechnungsergebnisse "Meteor"

Abb. 4

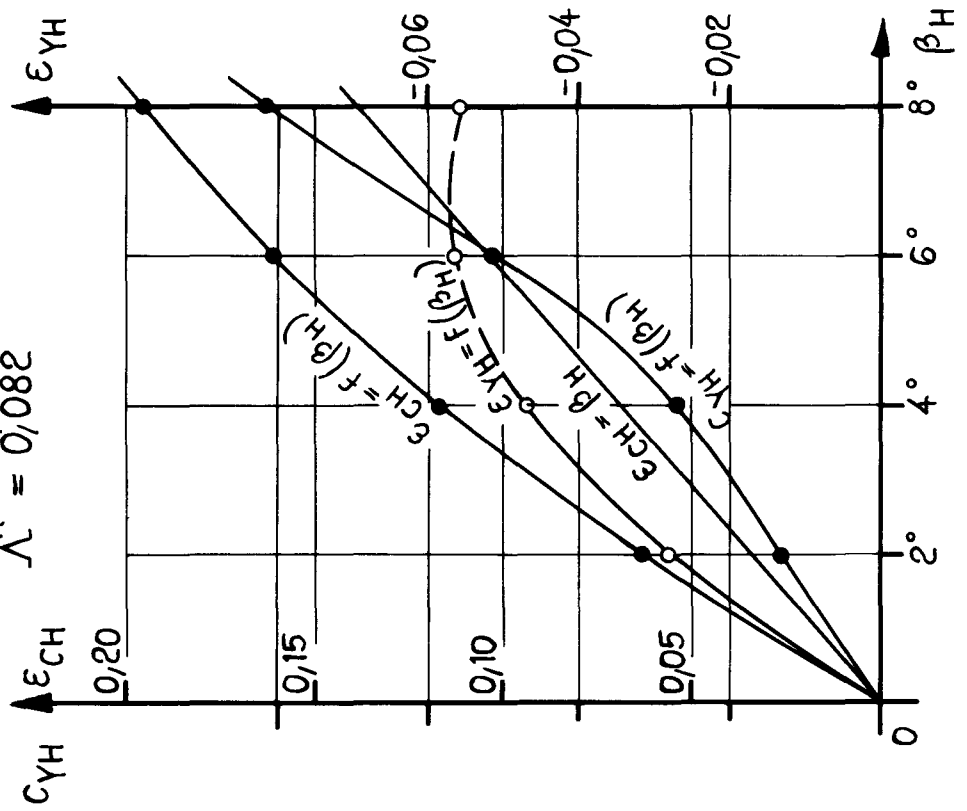


Rumpfkennzahlen Fracht- und Fahrgastschiff

(n. Graff) Normalform

$$F_n = 0,230$$

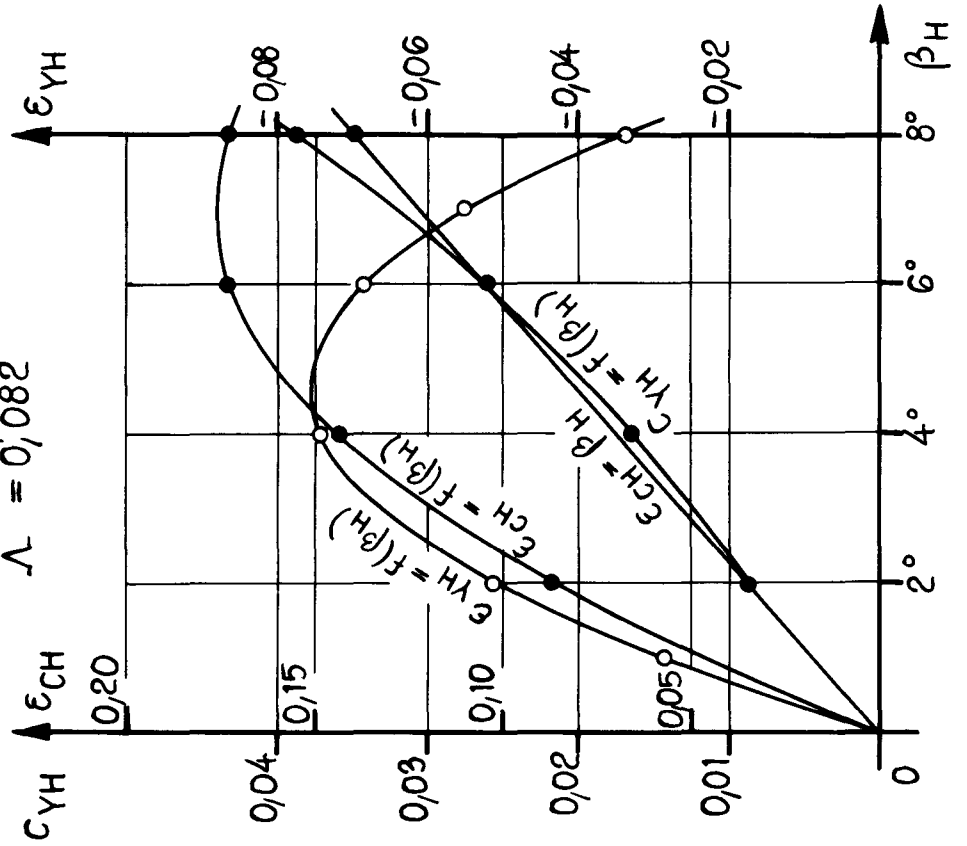
$$\Lambda = 0,082$$



(n. Graff), Wulstform

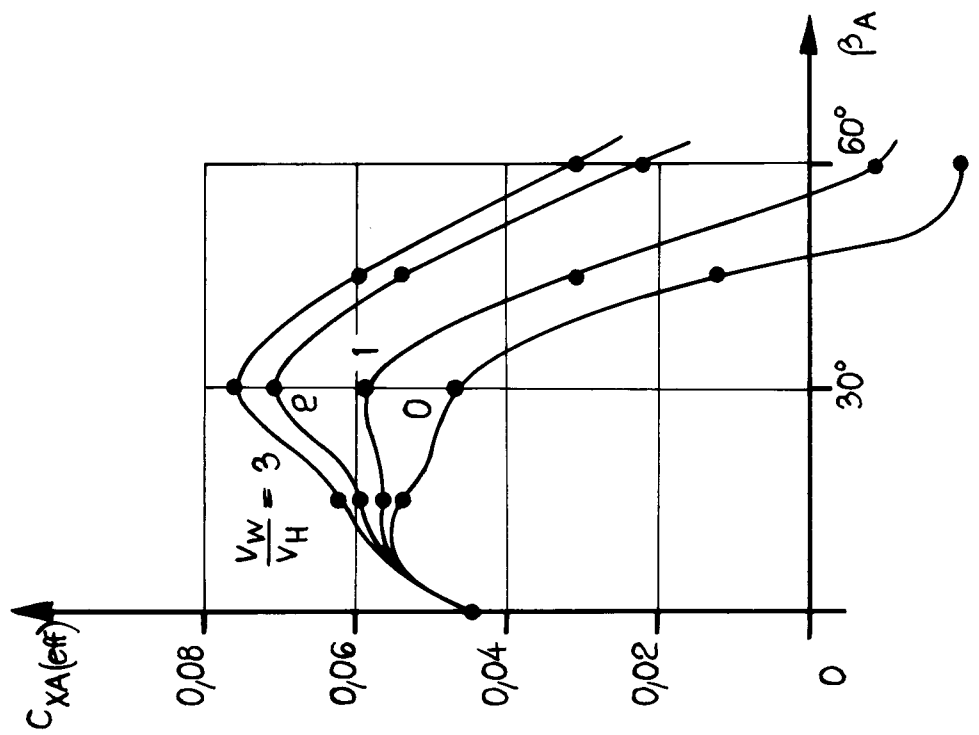
$$F_n = 0,230$$

$$\Lambda = 0,082$$



Effektive Luft-Längskraftbeiwerte

Fäherschiff,
Rumpf „Normalform“



Fäherschiff,
Rumpf „Wulstform“

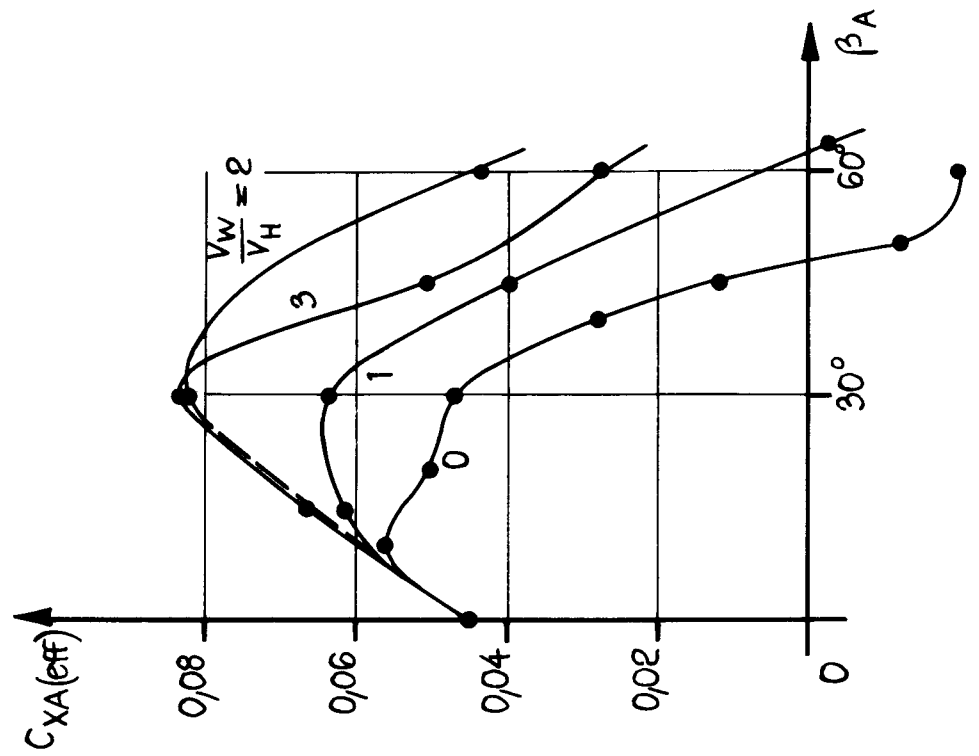


Abb. 7

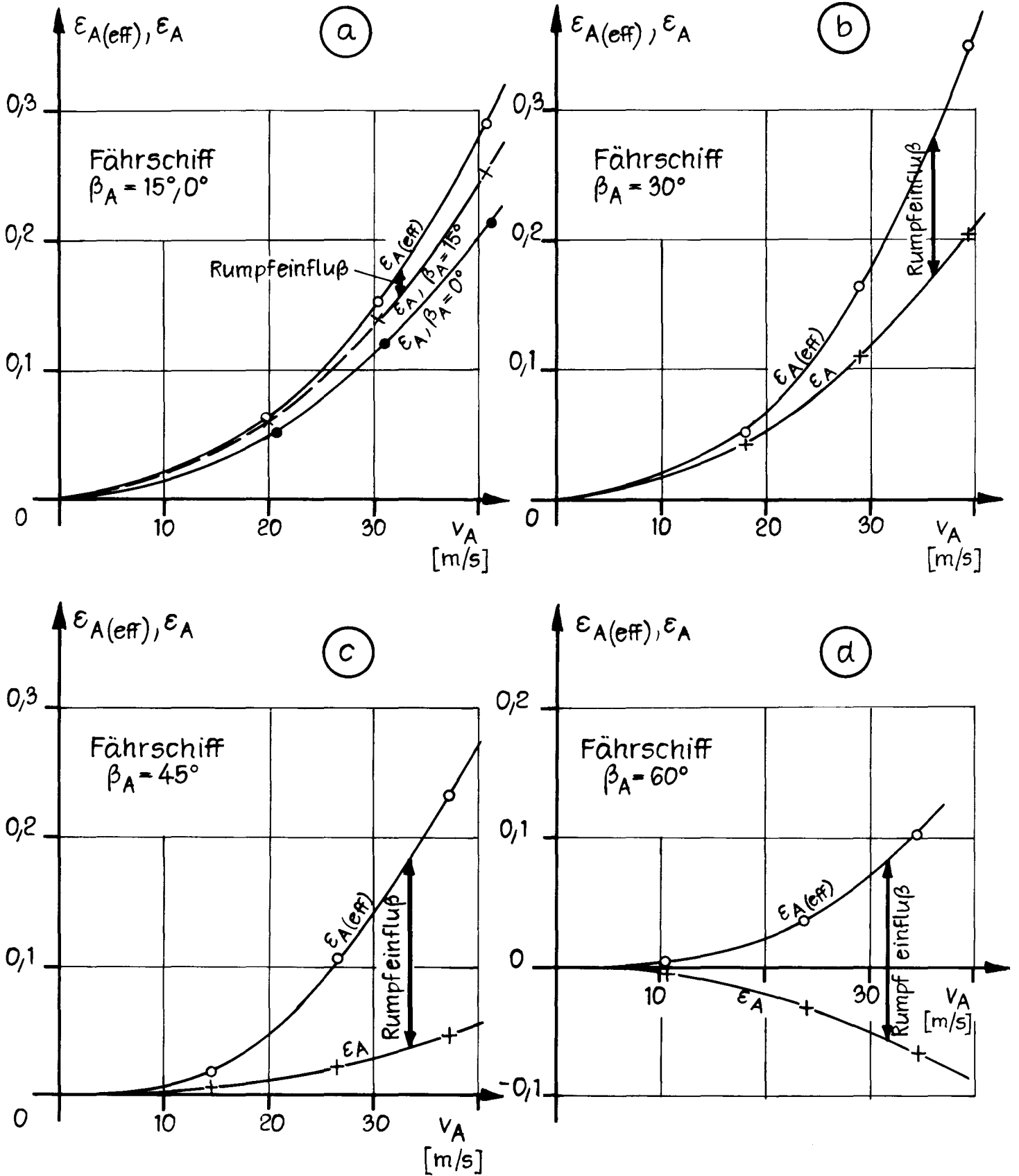
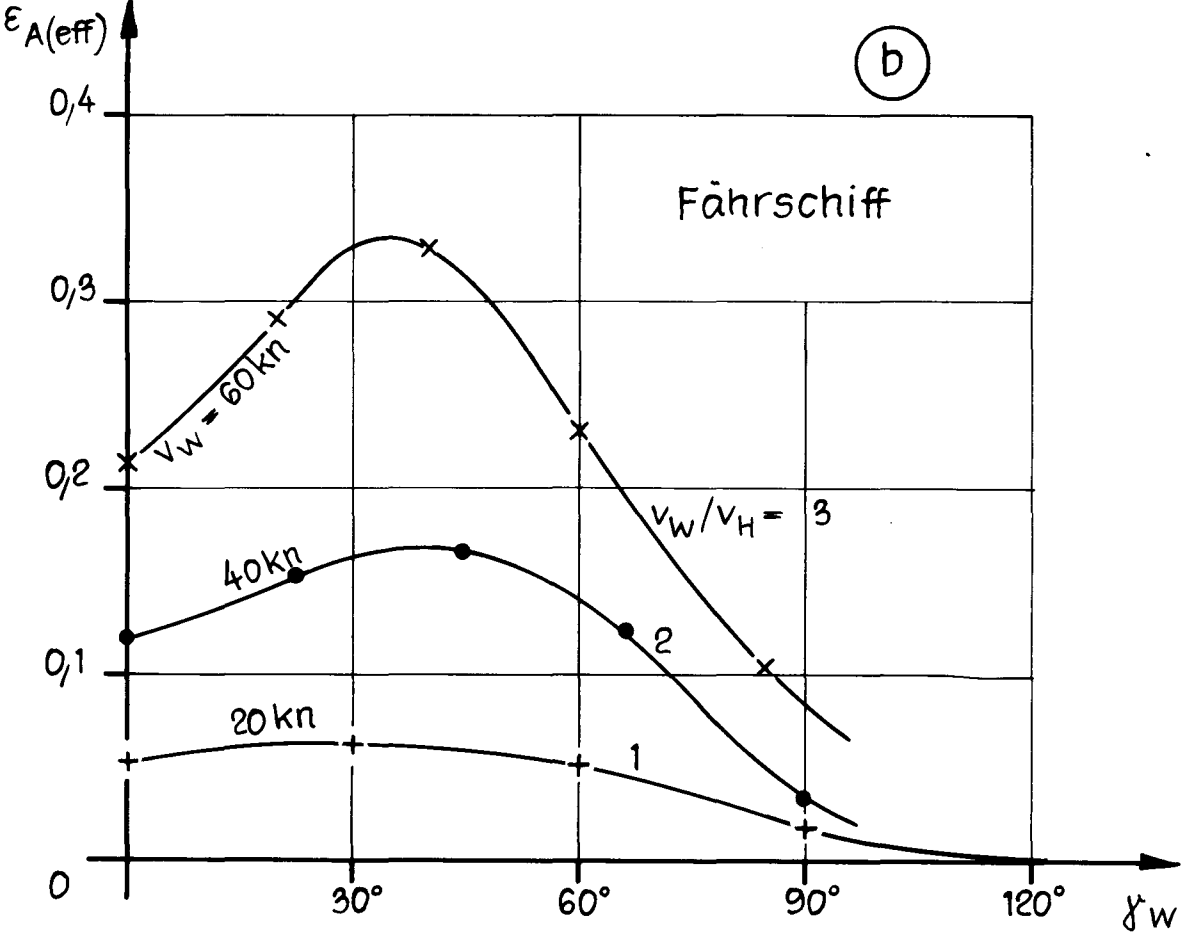
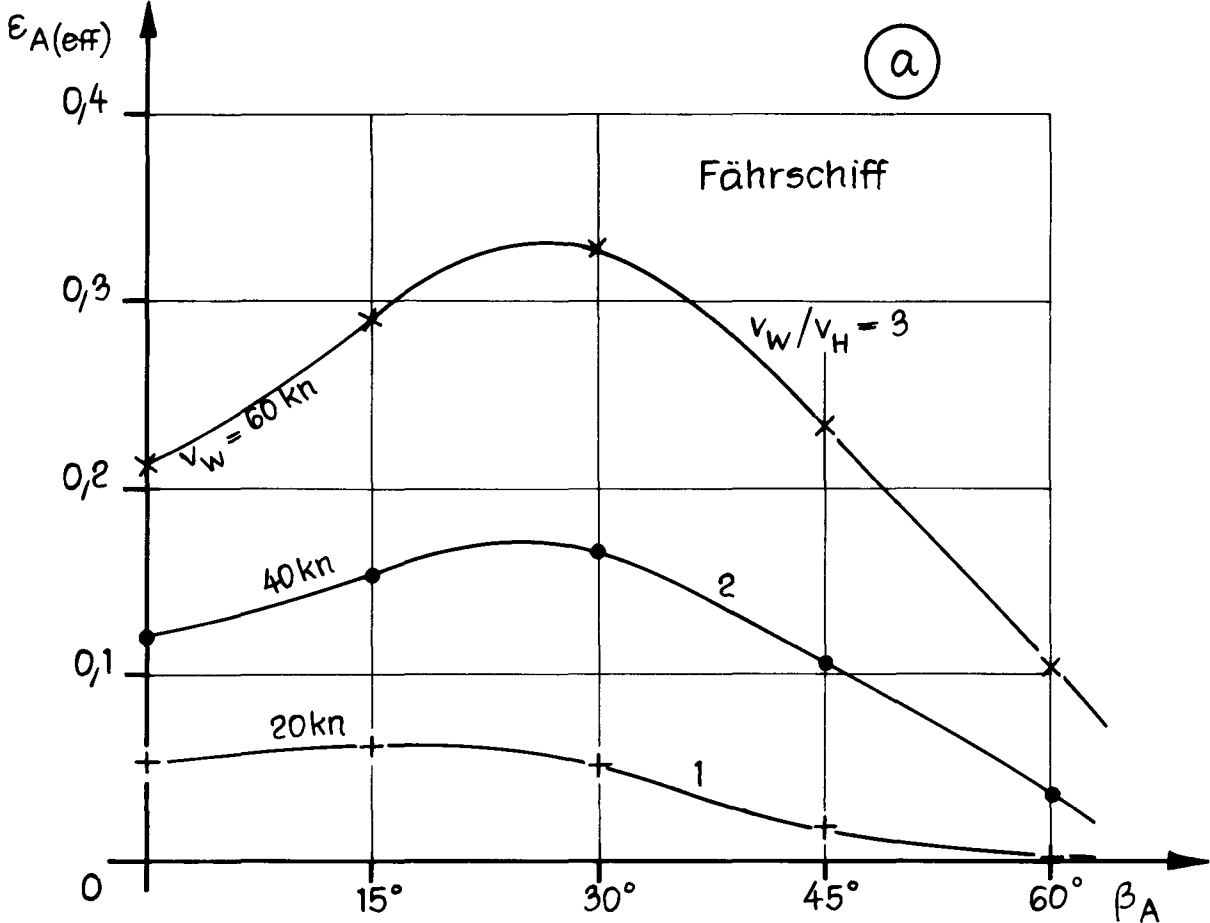
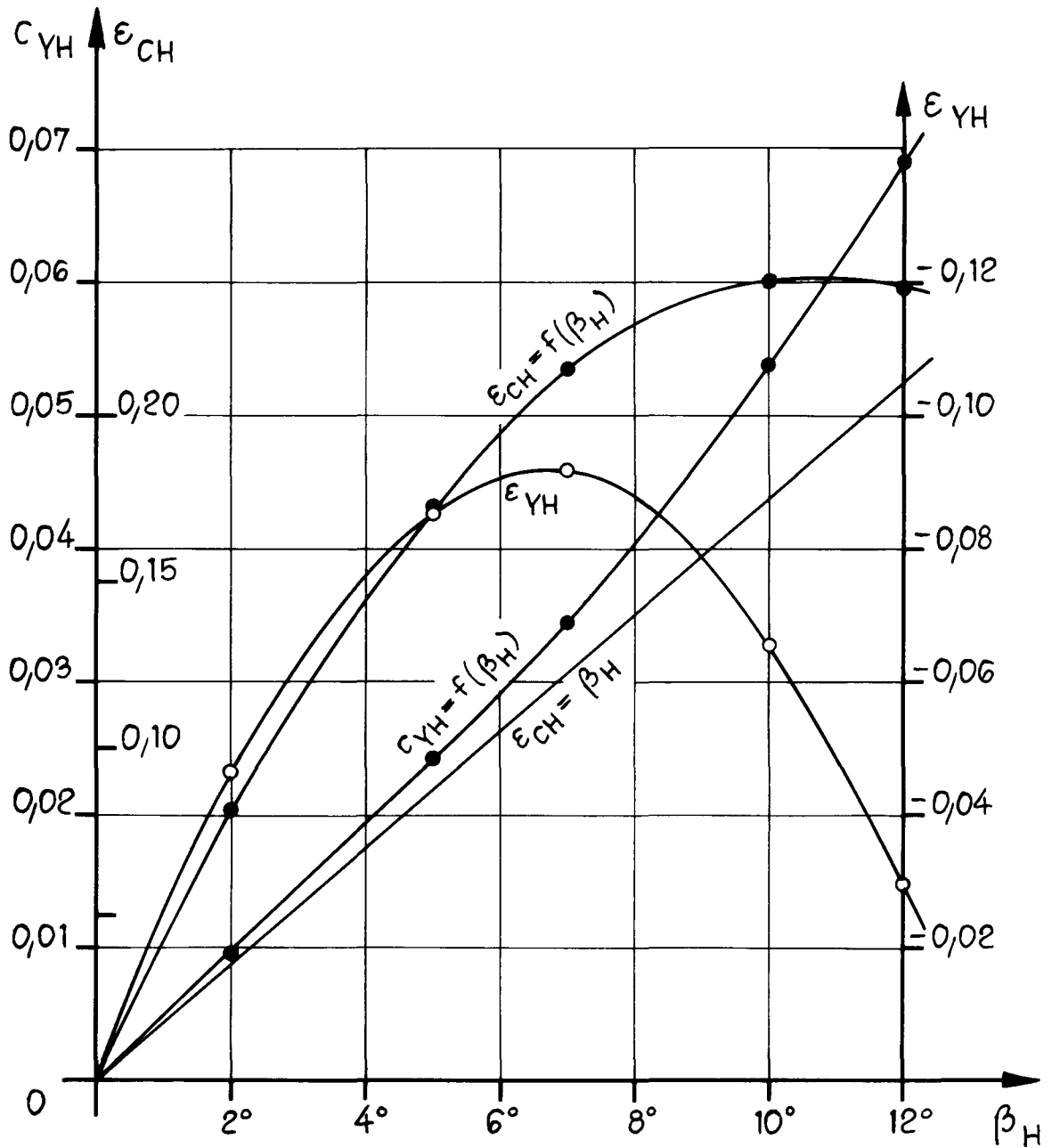


Abb.8

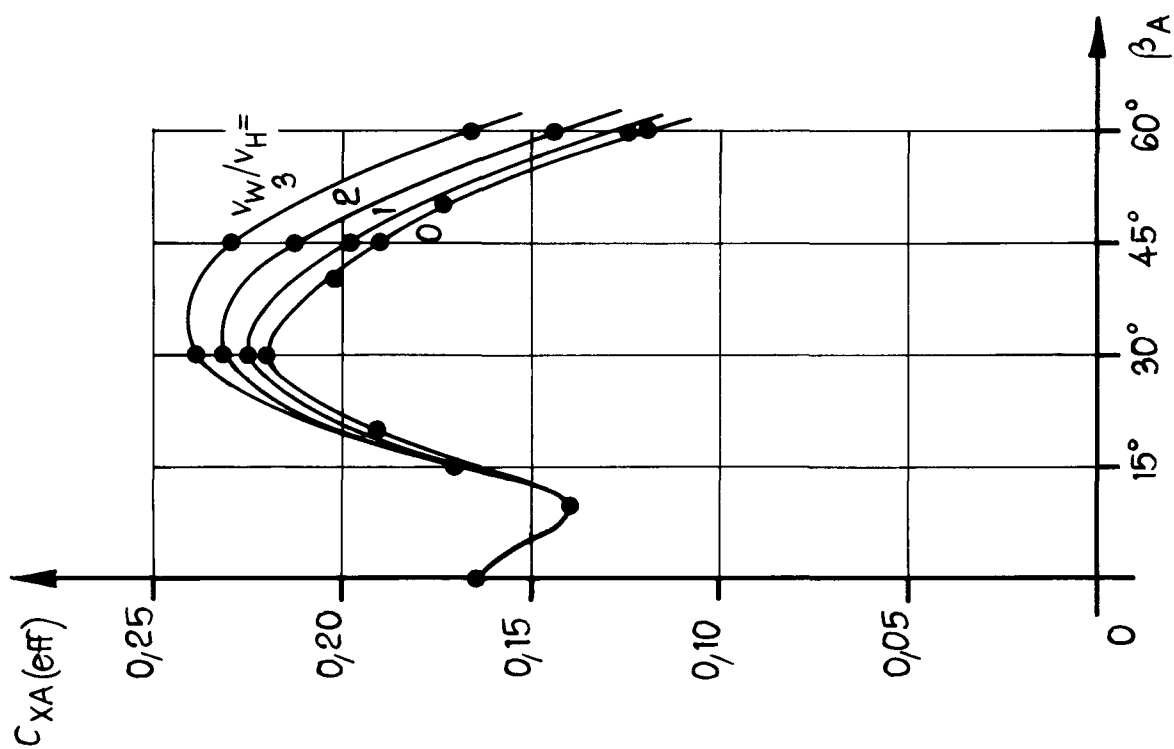
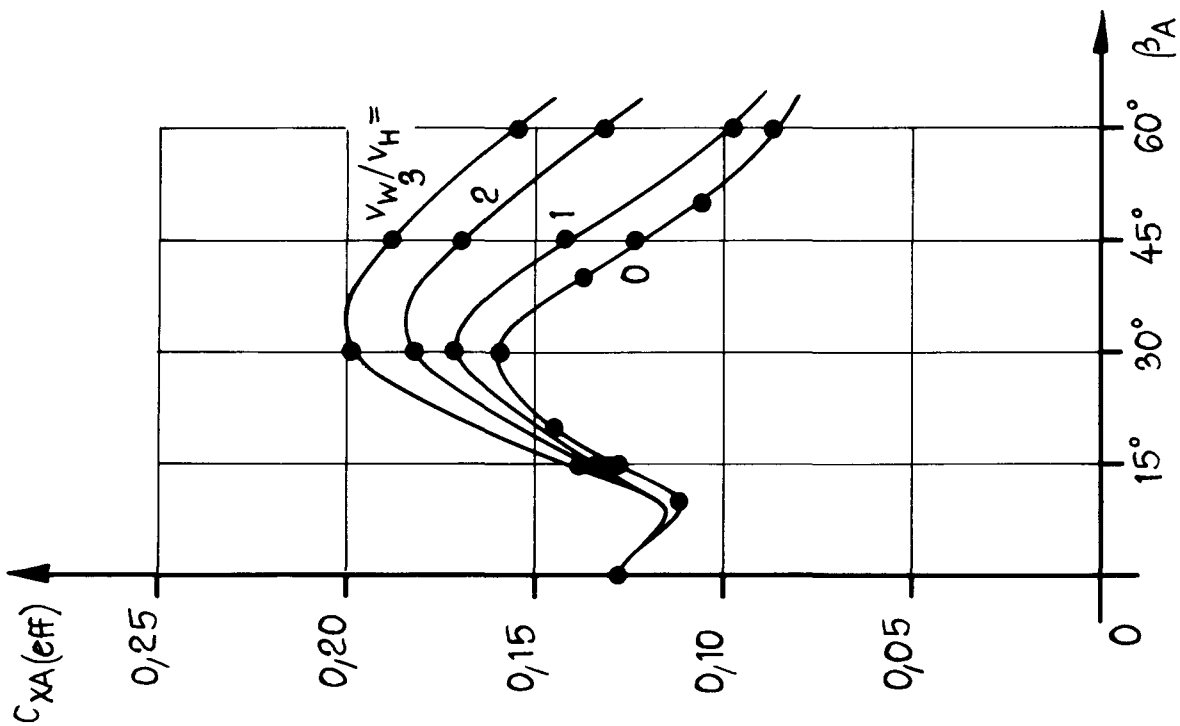




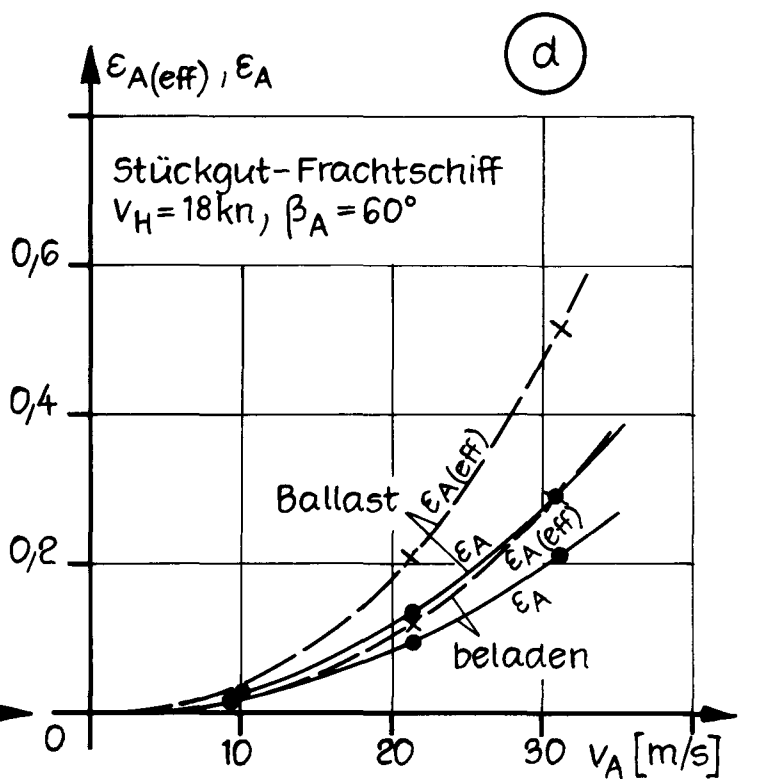
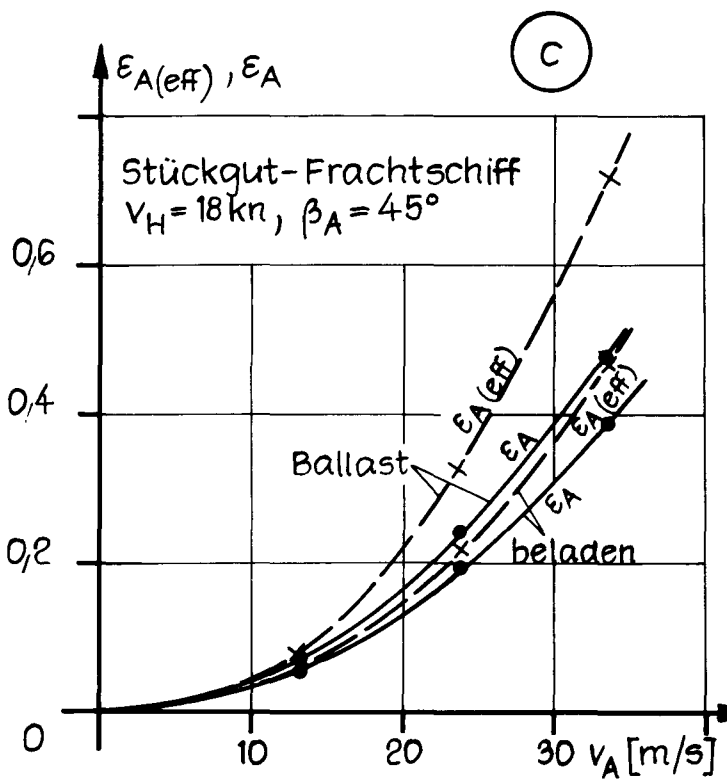
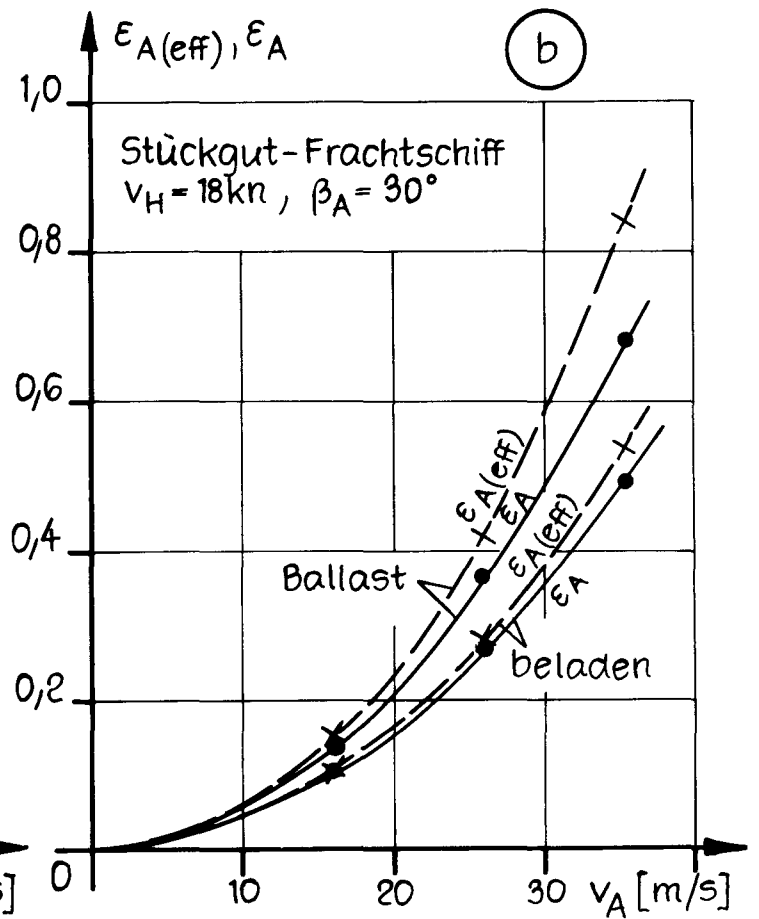
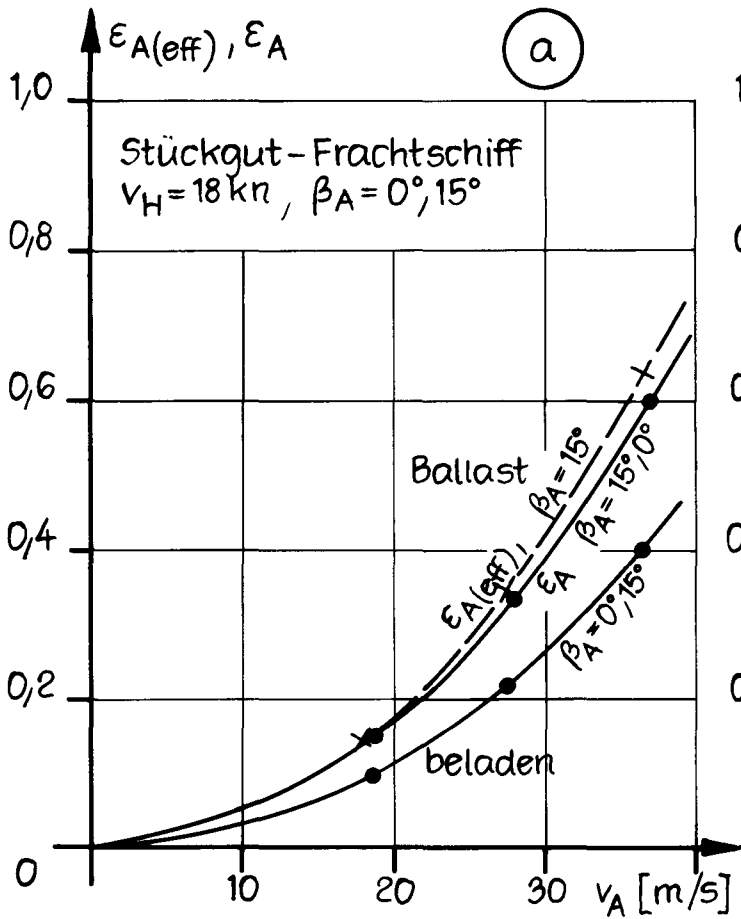
Rumpfkennzahlen
Frachtschiff „Mariner“

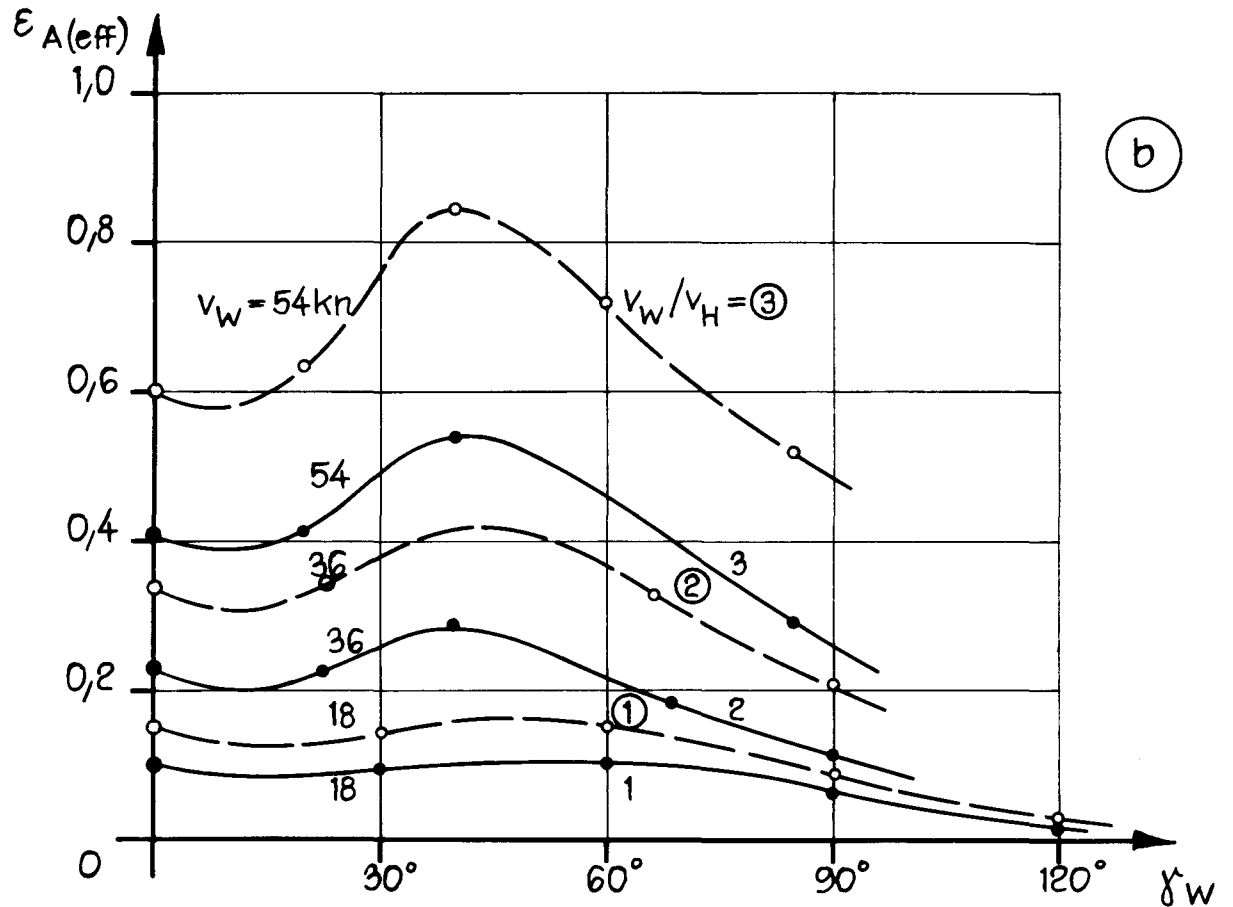
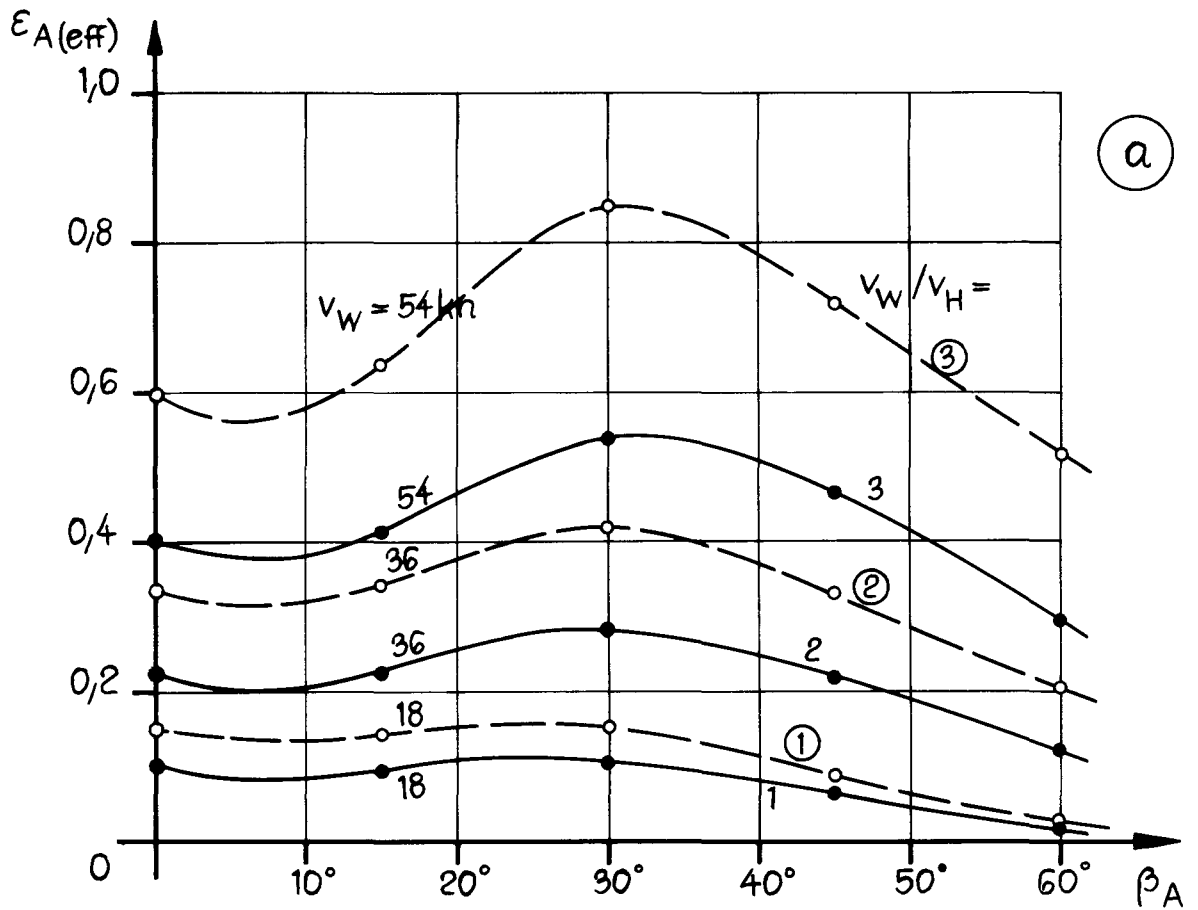
$$F_n = 0,203$$

$$\Lambda = 0,102$$



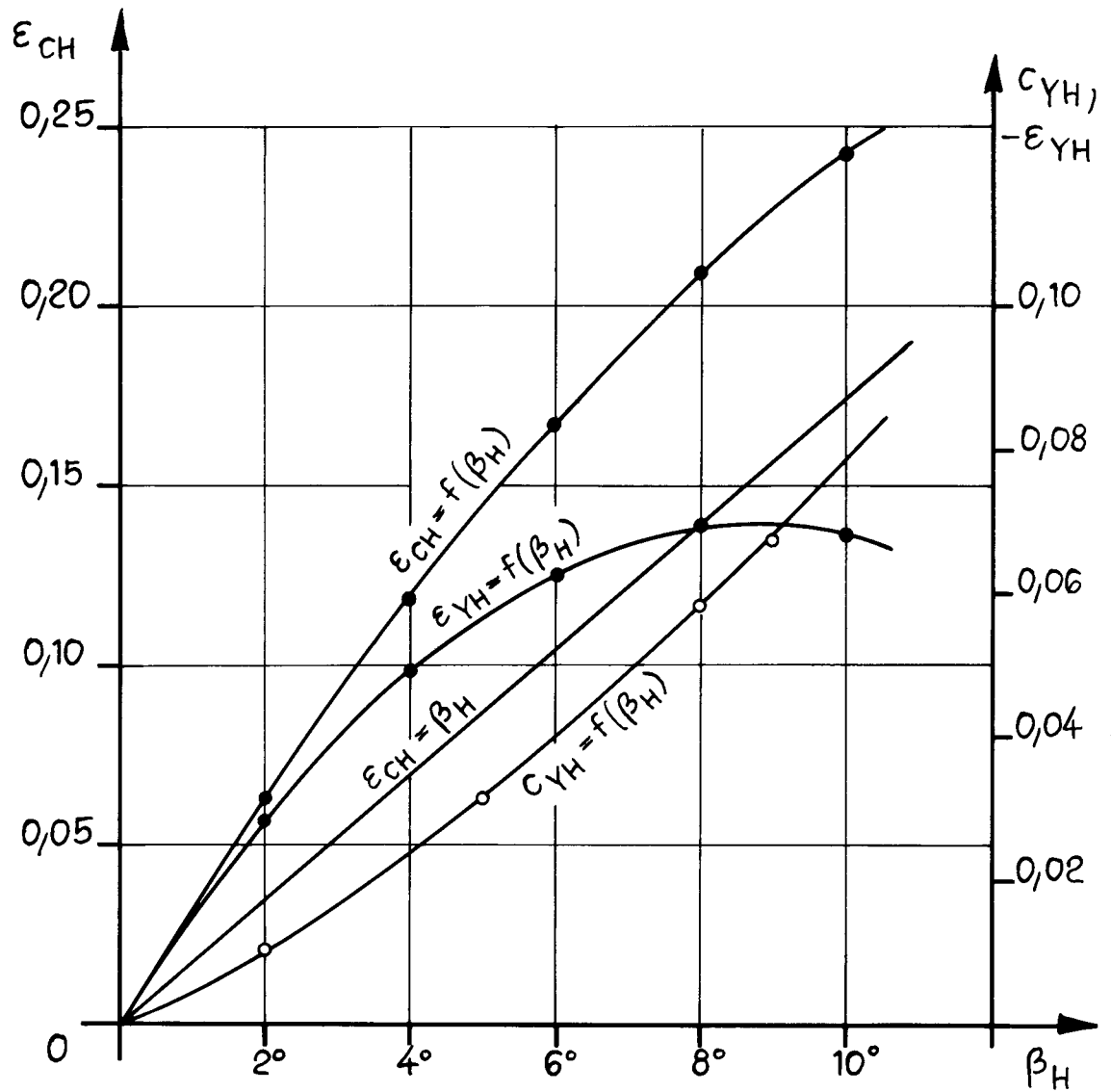
a) beladen
 Stückgutfrachtschiff, $v_H = 18 \text{ kn}$
 b) in Ballast





Stückgut - Frachtschiff $v_H = 18 \text{ kn}$

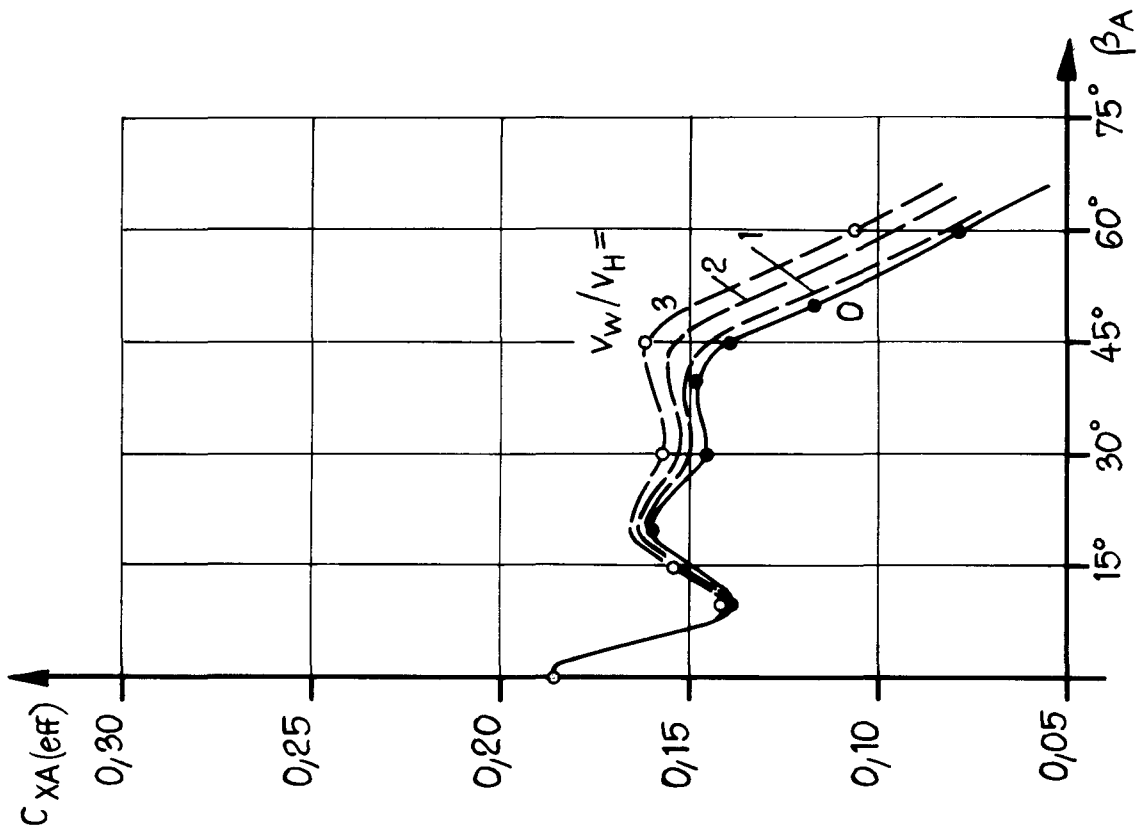
—●— beladen - - -○- Ballast



Rumpfkennzahlen Tanker

$$F_n = 0,160$$

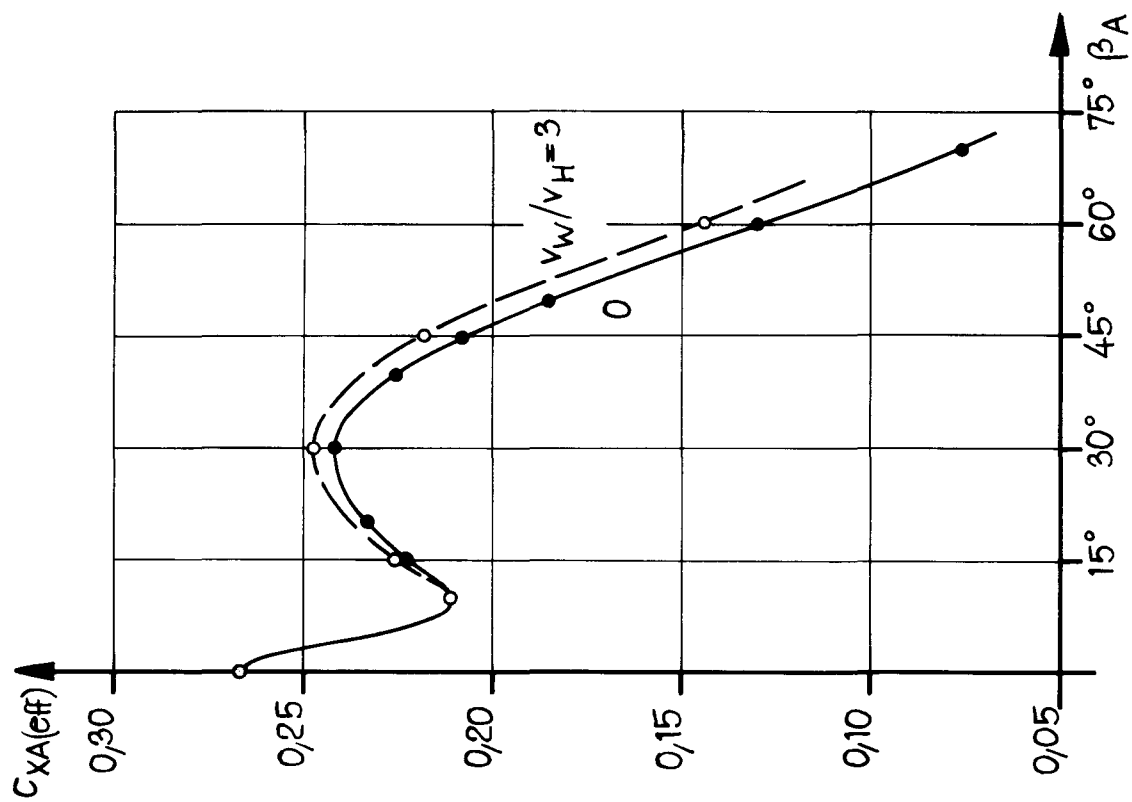
$$\Lambda = 0,1057$$

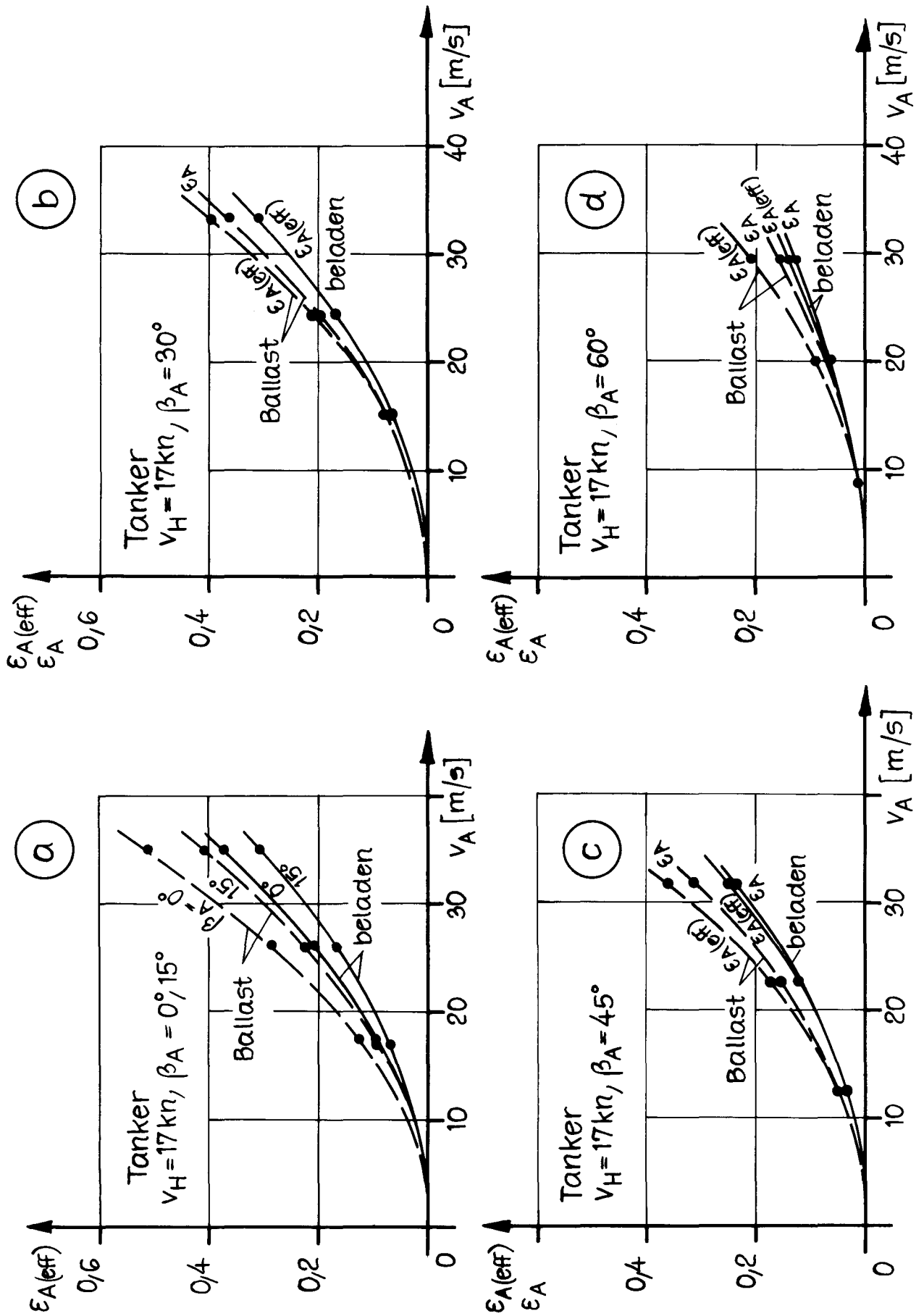


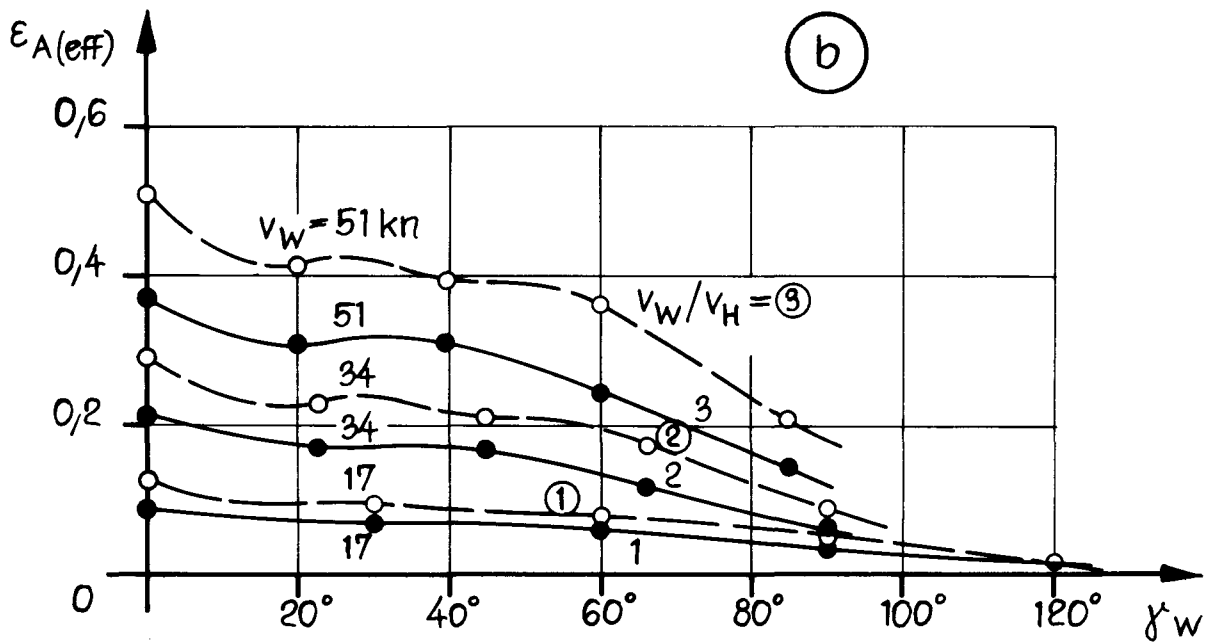
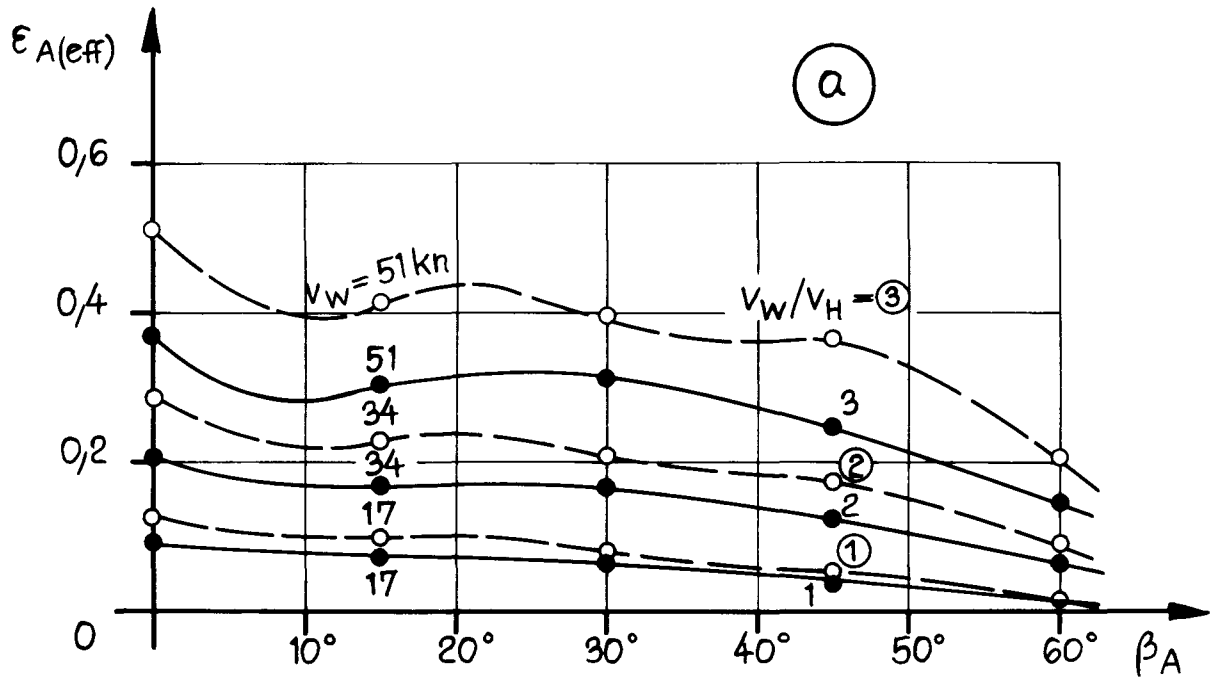
Tanker, $v_H = 17 \text{ kn}$

a) beladen

b) in Ballast

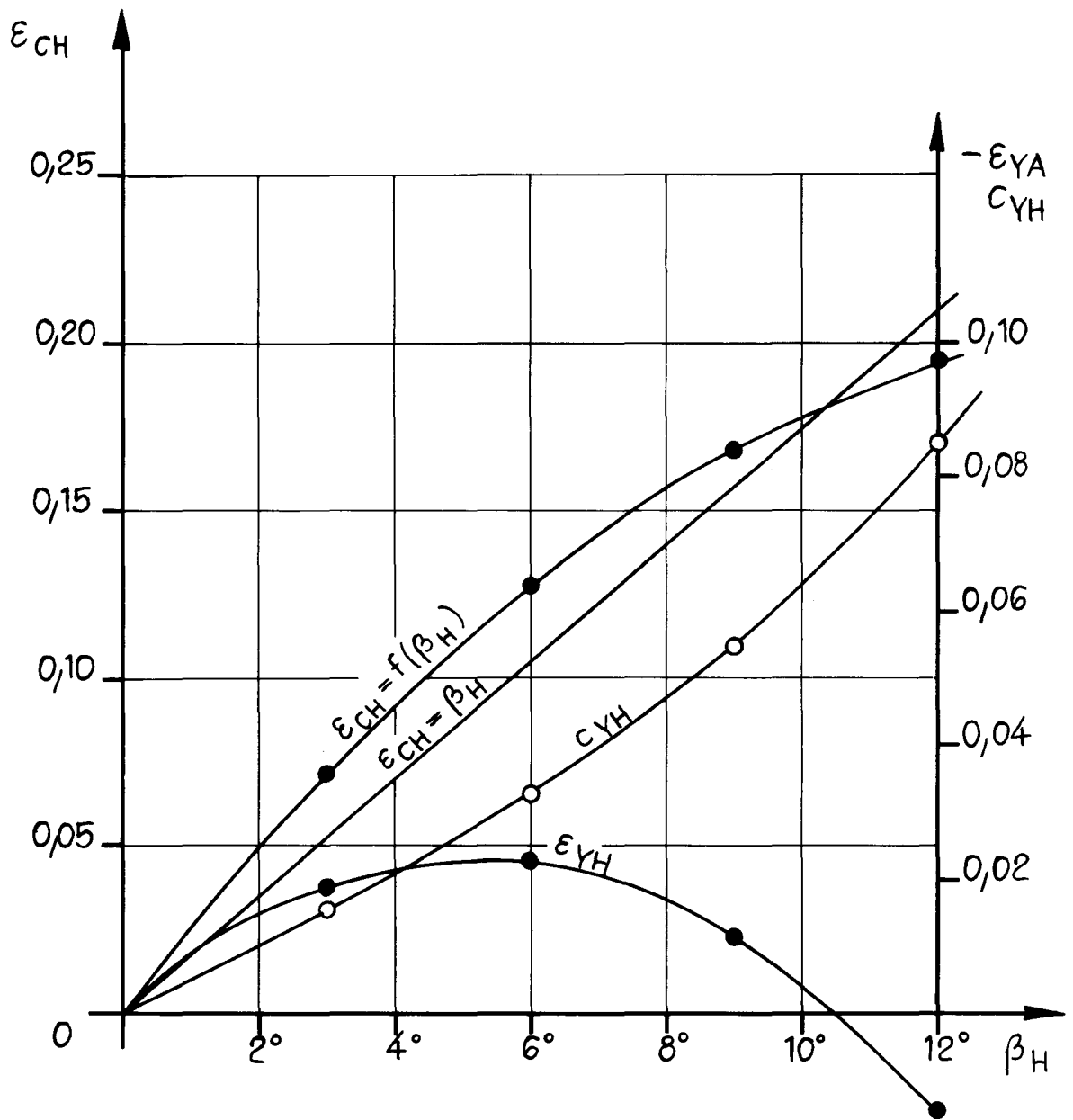




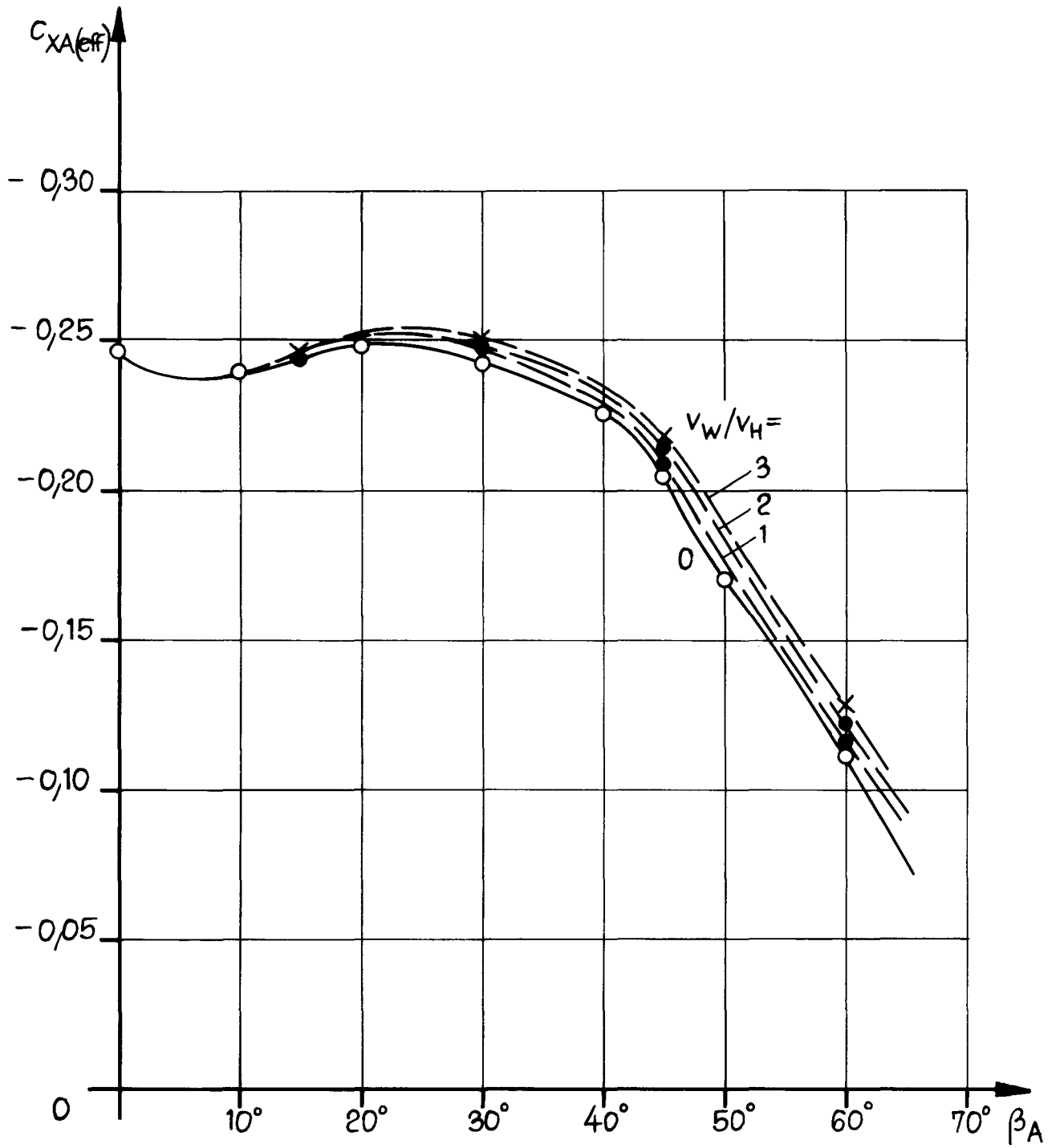


Tanker, $V_H = 17 \text{ kn}$

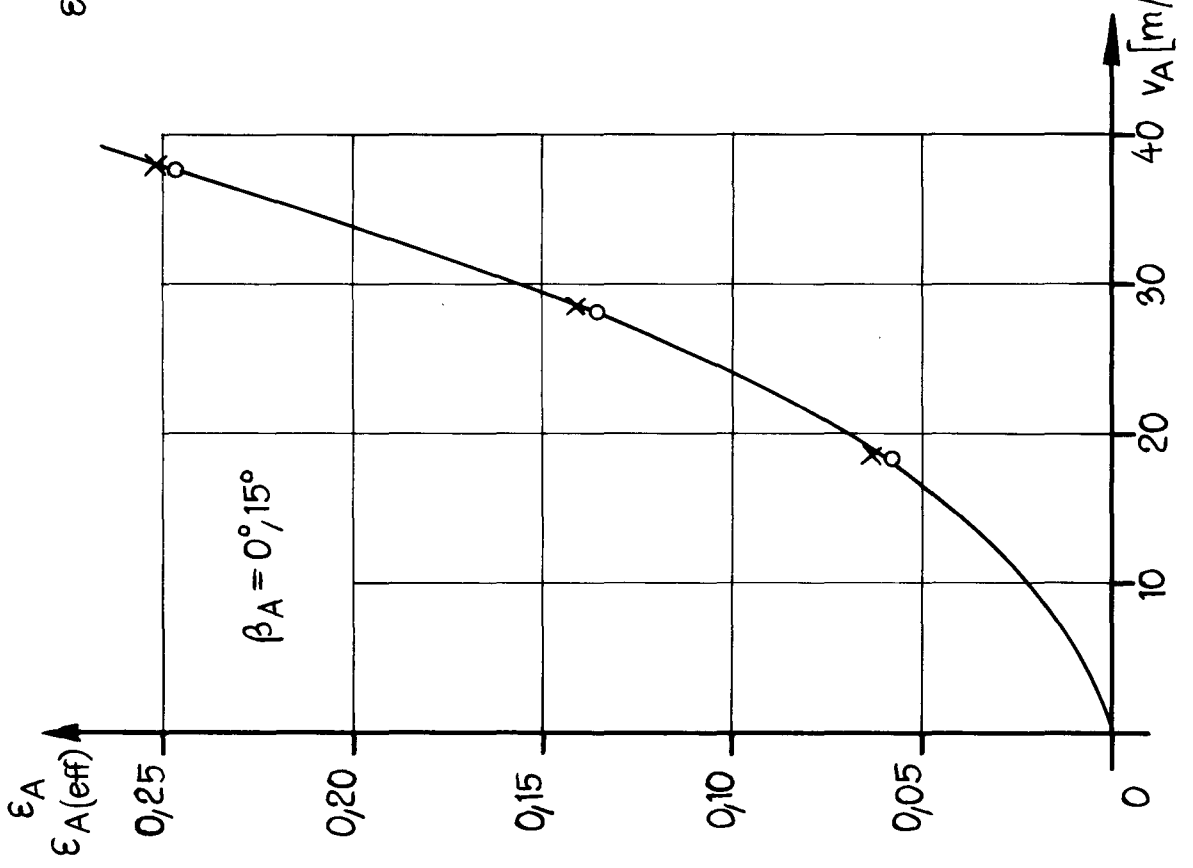
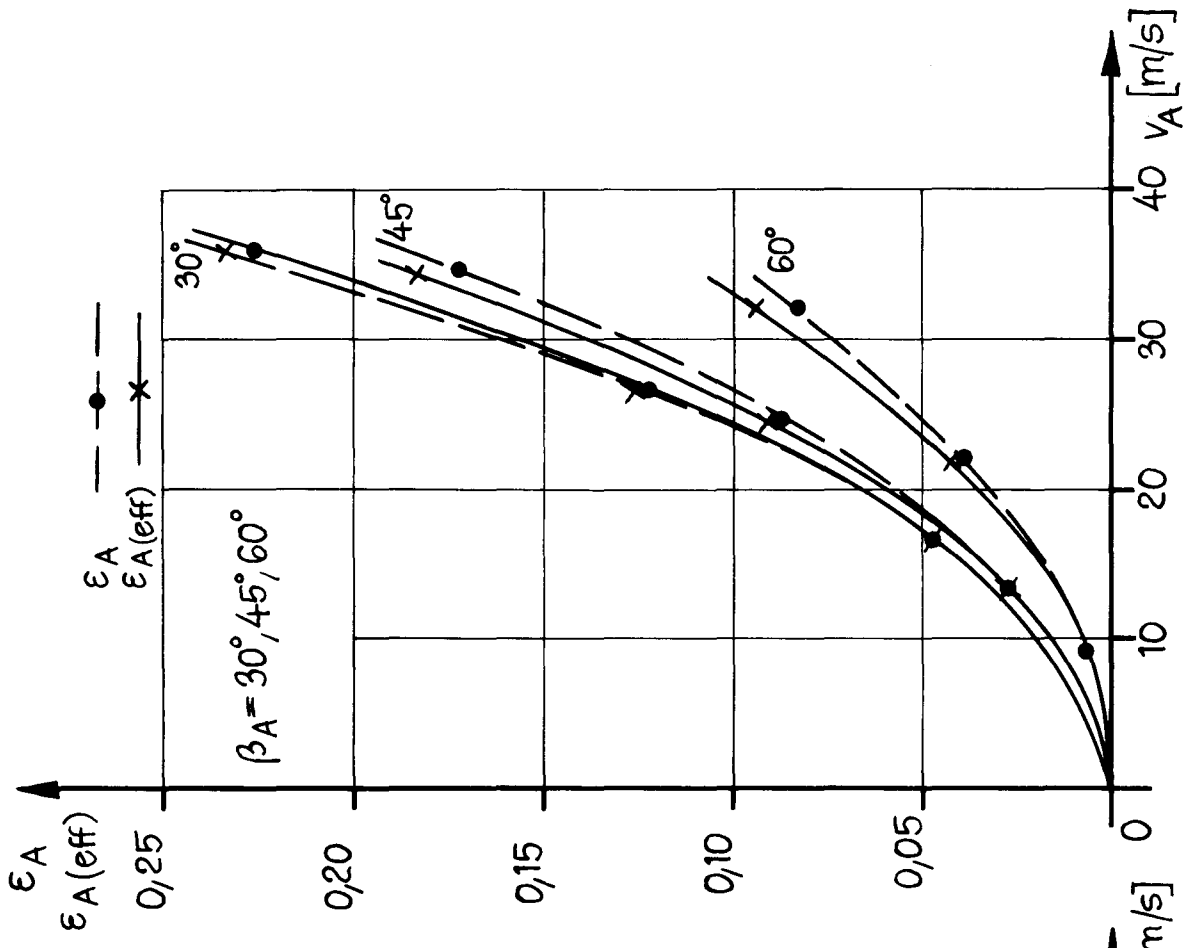
---○--- Ballast ---●--- beladen



Rumpfkennzahlen
Seeschlepper, $v_H = 18,5 \text{ kn}$



Seeschlepper , $v_H = 18,5$ kn



Seeschlepper, $v_H = 18,5$ kn

