

293 | 1973

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Bernd Wagner

**Einfluß des Momentenausgleichs
durch das Schiffsrudder bei der
Ermittlung des effektiven
Zusatzwiderstandes durch den Wind**

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Einfluß des Momentenausgleichs durch das Schiffs-
ruder bei der Ermittlung des effektiven Zusatz-
widerstandes durch den Wind.

Bernd Wagner

1. Einleitung

Die Frage des effektiven Zusatzwiderstandes durch den Wind wurde im IfS - Bericht Nr. 286 (März 1972) behandelt. Für eine Reihe unterschiedlicher Schiffstypen war die gesamte auf den Wind zurückzuführende zusätzliche Längskraft berechnet worden. Es konnte gezeigt werden, daß in vielen Fällen der Zusatzwiderstand durch die Abdrift des Schiffes, die als Folge der Luft - Seitenkraft auftritt, von gleicher Größenordnung ist wie die direkte Luft - Längskraft.

Vereinfachend war für die Untersuchungen im IfS - Bericht 286 angenommen worden, daß die gesamte Luft - Seitenkraft durch die Rumpferquerkraft infolge Abdrift ausgeglichen wird, ohne daß das Ruder gelegt wird.

In Wirklichkeit muß auch das Ruder gelegt und somit zur Querkraft-erzeugung mit herangezogen werden, da die Luftkraft und die hydrodynamische Gegenkraft des Rumpfes nicht in einer Ebene liegen, durch das Ruder also ein Momentenausgleich erfolgen muß.

Es scheint daher wünschenswert, anhand einiger Beispiele zu zeigen, welchen Einfluß die Aufteilung der hydrodynamischen Gegenkraft auf Ruder und Rumpf auf den windbedingten effektiven Zusatzwiderstand hat. Das Rechenverfahren nach IfS - Bericht Nr. 286 muß abgewandelt werden, die Rechnung wird aufwendiger.

Für die vorliegende Untersuchung wären Ergebnisse von Schrägschleppversuchen mit variiertem Drift- und Ruderwinkel erforderlich, die noch seltener zu erhalten sind als Schrägschleppversuchsergebnisse mit Widerstandsmessung. Es mußten daher vereinfachende Annahmen für die Ruderkräfte und die dadurch hervorgerufenen Momente gemacht werden. Der Aussagewert der Rechenergebnisse wird davon jedoch nicht beeinträchtigt.

2. Kräfte- und Momentengleichgewicht mit Seitenwindeinfluß

Bei stationärer Fahrt des Schiffes müssen Kräfte und Momente voll ausgeglichen sein. Zunächst soll das Gleichgewicht der seitlichen Kräfte und der Giermomente betrachtet werden. Hieraus ergeben sich unter der Annahme bestimmter Windkräfte und -Momente Driftwinkel und Ruderwinkel für Kraft- und Momentenausgleich. Die Längskrafterhöhung gegenüber der Fahrt ohne Seitenwindeinfluß ergibt sich dann mit Hilfe von Drift- und Ruderwinkel.

2.1. Gleichgewicht der Kräfte in y - Richtung (Seitenkraftausgleich) (Vergl. Abb. 1)

Die y - Achse verläuft senkrecht zur Schiffslängsrichtung durch $L/2$; positive Kräfte weisen nach Steuerbord.

Es gilt:

$$\underline{Y_H} - \underline{Y_A} = 0, \text{ d.h. } \underline{Y_H} = \underline{Y_A}$$

Hierin bedeuten

$$Y_H = f(\beta_H; \delta_R) = \text{hydrodyn. Seitenkraft};$$

$$Y_A = f(\beta_A) = \text{aerodyn. Seitenkraft};$$

Die hydrodynamische Seitenkraft $\underline{Y_H}$ enthält einen Rumpf- und einen Ruderanteil:

$$\underline{Y_H} = c_{YH}(\beta_H) \cdot \frac{\rho_H}{2} v_H^2 \cdot L \cdot T + c_{YHR}(\alpha_R) \cdot \frac{\rho_H}{2} v_R^2 \cdot A_R$$

$$\frac{\rho_H}{2} v_H^2; \frac{\rho_H}{2} v_R^2$$

Staudruck der Anströmgeschwindigkeit von Schiffsrumpf bzw. Ruder

$$\alpha_R$$

Ruderanströmwinkel, abhängig von Ruderwinkel δ_R und Driftwinkel (vergl. Abb.1)

$$A_R$$

Ruderfläche

$$L \cdot T$$

Rumpflateralfläche, angenähert

C_{YH}	Seitenkraftbeiwert des Schiffsrumpfes, abhängig vom Driftwinkel β_H
C_{YHR}	Beiwert der Ruderkraft in y - Richtung; etwa gleich dem Ruderquerkraftbeiwert

Die aerodynamische Seitenkraft Y_A berechnet sich wie folgt:

$$Y_A = C_{YA}(\beta_A) \cdot \frac{\rho_A}{2} v_A^2 \cdot A_{LA}$$

$\frac{\rho_A}{2} v_A^2$	Staudruck der Luftgeschwindigkeit
A_{LA}	Überwasserlateralfläche
C_{YA}	Seitenkraftbeiwert des Überwasserschiffes, abhängig vom 'aerodynamischen Driftwinkel'

Man erhält demnach

$$\frac{Y_H}{C_{YH} \cdot \frac{\rho_H}{2} v_H^2 \cdot L \cdot T} = \frac{Y_A}{C_{YA} \cdot \frac{\rho_A}{2} v_A^2 \cdot A_{LA}}$$

$$C_{YH} \cdot \frac{\rho_H}{2} v_H^2 \cdot L \cdot T + C_{YHR} \frac{\rho_H}{2} v_R^2 \cdot A_R = C_{YA} \cdot \frac{\rho_A}{2} v_A^2 \cdot A_{LA}$$

und hieraus den Ruderkraftbeiwert für ausgeglichene Seitenkraft :

$$C_{YHR} = \frac{\left(C_{YA} \cdot \frac{\rho_A}{2} v_A^2 \cdot A_{LA} - C_{YH} \frac{\rho_H}{2} v_R^2 \cdot L \cdot T \right)}{\frac{\rho_H}{2} v_R^2 \cdot A_R}$$

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

$$= \left(\frac{v_H}{v_R} \right)^2 \cdot \frac{L \cdot T}{A_R} \left(C_{YA} \cdot \frac{\rho_A}{\rho_H} \cdot \left[\frac{v_A}{v_H} \right]^2 \cdot \frac{A_{LA}}{L \cdot T} - C_{YH} \right) \quad (1)$$

2.2. Momentengleichgewicht um die Hochachse in $L/2$ (z - Achse)
(Momentenausgleich), vergl. Abb. 1

Positive Momente drehen im Uhrzeigersinn, man erhält

$$N_H - N_A - Y_{HR} \cdot \frac{L}{2} = 0$$

mit

N_H hydrodynamisches Giermoment,
abhängig vom Driftwinkel β_H ;
bezogen auf $L/2$

N_A aerodynamisches Giermoment, ab-
hängig vom aerodynamischen Drift-
winkel β_A ; bezüglich $L/2$

$Y_{HR} \approx C_R$ Ruderkraftkomponente in y - Rich-
tung, etwa gleich Ruderkraft

$$C_{NH} \cdot \frac{S_H}{2} V_H^2 L^2 T - C_{NA} \frac{S_A}{2} V_A^2 \cdot A_{LA} \cdot L = C_{YHR} \cdot \frac{S_H}{2} V_R^2 A_R \frac{L}{2}$$

C_{NH} Beiwert des hydrodynamischen
Giermomentes

C_{NA} Beiwert des aerodynamischen
Giermomentes

Der Ruderkraftbeiwert für ausgeglichene Giermomente wird somit

$$\begin{aligned} C_{YHR} &= C_{NH} \cdot \left(\frac{V_H}{V_R} \right)^2 \cdot \frac{2 \cdot L \cdot T}{A_R} - C_{NA} \frac{S_A}{S_H} \left(\frac{V_A}{V_R} \right)^2 \frac{A_{LA}}{A_R} \cdot 2 \\ &= 2 \left(\frac{V_H}{V_R} \right)^2 \cdot \frac{L \cdot T}{A_R} \left[C_{NH} - C_{NA} \frac{S_A}{S_H} \left(\frac{V_A}{V_H} \right)^2 \cdot \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

2.3. Seitenkraft- und Giermomentenausgleich

Es wurden jeweils für Seitenkraftausgleich und für Momentenausgleich Ruderkraftbeiwerte erhalten, aus denen sich die dazu notwendigen Ruderanströmwinkel α_R ergeben, die dann wiederum den erforderlichen Ruderwinkel δ_R festlegen:

$$\Sigma Y = 0 : C_{YHR(1)} = \left(\frac{v_H}{v_R}\right)^2 \frac{L \cdot T}{A_R} \left[C_{YA} \cdot \frac{S_A}{S_H} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \frac{A_{LA}}{L \cdot T} - C_{YH} \right] \quad (1)$$

$$\Sigma N = 0 : C_{YHR(2)} = 2 \left(\frac{v_H}{v_R}\right)^2 \frac{L \cdot T}{A_R} \left[C_{NH} - C_{NA} \frac{S_A}{S_H} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \right] \quad (2)$$

Für stationäre Geradeausfahrt müssen beide Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein, also

$$C_{YHR(1)} = C_{YHR(2)}$$

$$\left(\frac{v_H}{v_R}\right)^2 \frac{L \cdot T}{A_R} \left[C_{YA} \cdot \frac{S_A}{S_H} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \frac{A_{LA}}{L \cdot T} - C_{YH} \right] = 2 \left(\frac{v_H}{v_R}\right)^2 \frac{L \cdot T}{A_R} \left[C_{NH} - C_{NA} \frac{S_A}{S_H} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \right]$$

oder

$$2 \left[C_{NH} - C_{NA} \frac{S_A}{S_H} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \right] = C_{YA} \frac{S_A}{S_H} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \frac{A_{LA}}{L \cdot T} - C_{YH}$$

bzw.

$$2 C_{NH} + C_{YH} = \frac{S_A}{S_H} \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \cdot (C_{YA} + 2 C_{NA})$$

oder

$$2 C_{NH}(\beta_H) + C_{YH}(\beta_H) = \frac{S_A}{S_H} \cdot \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \left[2 C_{NA}(\beta_A) + C_{YA}(\beta_A) \right] \quad (3)$$

Diese Gleichgewichtslage kann durch Iteration gefunden werden, wobei eine abgewandelte Form dieser Gleichung zu empfehlen ist. Hierzu könnten die Druckpunktlagen der aerodynamischen und hydrodynamischen Kraft verwendet werden.

Ist a_H Abstand der hydrodynamischen Kraft vom vorderen Lot, und
 a_A Abstand der aerodynamischen Kraft vom vorderen Lot,

so kann man für die Giermomentenbeiwerte schreiben:

$$c_{NH} = c_{YH} \left(\frac{1}{2} - \frac{a_H}{L} \right) \quad \text{und} \quad c_{NA} = c_{YA} \left(\frac{1}{2} - \frac{a_A}{L} \right) .$$

Damit erhält man für Seitenkraft- und Giermomentenausgleich (Gl. (3))

$$c_{YH}(\beta_H) \left(1 + 1 - \frac{2a_H}{L} \right) = \frac{s_A}{s_H} \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2 \cdot c_{YA}(\beta_A) \left(1 + 1 - \frac{2a_A}{L} \right) ;$$

für c_{YH} ergibt sich also

$$c_{YH}(\beta_H) = c_{YA}(\beta_A) \frac{s_A}{s_H} \left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2 \cdot \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \cdot \frac{\left(1 - \frac{a_A}{L} \right)}{\left(1 - \frac{a_H}{L} \right)} \quad (3a)$$

Zur Iteration kann zunächst a_H/L geschätzt werden. Nachdem c_{YH} und somit β_H verrechnet wurden, kann dann a_H/L korrigiert werden. Die Rechnung wird wiederholt, bis der angenommene Wert für a_H/L dem errechneten β_H entspricht.

2.4. Ermittlung des Driftwinkels β_H für Seitenkraft- und Giermomentenausgleich ohne Iteration

Wenn man Rumpfkraftbeiwert und Druckpunktlage als Funktion von β_H analytisch darstellt, so läßt sich der Driftwinkel für die stationäre Fahrt mit Seitenwind ohne Iteration finden. Wir erhalten eine Gleichung dritten Grades, die näherungsweise gelöst werden kann.

Mit den bereits im IfS - Bericht Nr.286 verwendeten Beziehungen

für $c_{CH} = c_1 \beta_H + c_2 \beta_H^2$ (Ausgleichsparabel) Querkraftbeiwert

und $c_{YH} \approx c_{CH} + c_{DH} \cdot \beta_H = (c_1 + c_{DH}) \beta_H + c_2 \beta_H^2$ Seitenkraftbeiwert

$$c_{YH} = c'_1 \beta_H + c_2 \beta_H^2 \quad (4)$$

erhält man unter Verwendung einer Ausgleichsgeraden für

$$\frac{a_H}{L} = a_1 + a_2 \beta_H \quad (\text{Druckpunktlage der hydrodynamischen Rumpfkraft})$$

für den Beiwert des Giermomentes der hydrodynamischen Rumpfkraft

$$\begin{aligned} c_{NH}(\beta_H) &= c_{YH}(\beta_H) \left(\frac{1}{2} - \frac{a_H}{L} \right) \\ &= (c'_1 \beta_H + c_2 \beta_H^2) \left(\left[\frac{1}{2} - a_1 \right] - a_2 \beta_H \right) \\ &= (c'_1 \beta_H + c_2 \beta_H^2) (a'_1 - a_2 \beta_H) \end{aligned}$$

$$c_{NH}(\beta_H) = a'_1 c'_1 \beta_H - a_2 c'_1 \beta_H^2 + a'_1 c_2 \beta_H^2 - a_2 c_2 \beta_H^3$$

$$\begin{aligned} c_{NH}(\beta_H) &= -a_2 c_2 \beta_H^3 + (a'_1 c_2 - a_2 c'_1) \beta_H^2 + a'_1 c'_1 \beta_H \\ &\quad \left(a'_1 = \frac{1}{2} - a_1, \text{ s.o.}! \right) \end{aligned}$$

Gleichung (3) schreibt sich jetzt wie folgt:

$$2 c_{NH}(\beta_H) + c_{YH}(\beta_H) = \frac{g_A}{g_H} \cdot \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2 \left[2 c_{NA}(\beta_A) + c_{YA}(\beta_A) \right]$$

$$F_1(\beta_H) = F_2$$

$$F_1(\beta_H) = 2 c_{NH}(\beta_H) + c_{YH}(\beta_H)$$

$$\begin{aligned} &= -2 a_2 c_2 \beta_H^3 + 2 (a'_1 c_2 - a_2 c'_1) \beta_H^2 \\ &\quad + 2 a'_1 c'_1 \beta_H + c'_1 \beta_H + c_2 \beta_H^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_1(\beta_H) &= -2 a_2 c_2 \beta_H^3 + (2 a'_1 c_2 - 2 a_2 c'_1 + c_2) \beta_H^2 \\ &\quad + (2 a'_1 c'_1 + c'_1) \beta_H \end{aligned}$$

Setzt man für

$$b_1 = 2 a_1' c_1' + c_1'$$

$$b_2 = 2 a_1' c_2 - 2 a_2 c_1' + c_2$$

$$b_3 = - 2 a_2 c_2$$

so wird

$$F_1(\beta_H) = b_3 \beta_H^3 + b_2 \beta_H^2 + b_1 \beta_H$$

(Rumpf - Funktion)

Diese Funktion läßt sich für einen bestimmten Rumpf graphisch darstellen.

Die rechte Seite von Gleichung (3)

$$F_2 = \frac{g_A}{g_H} \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2 \left[2 c_{NA}(\beta_A) + c_{YA}(\beta_A) \right] \quad (7)$$

ist von den Schiffsdaten, dem Verhältnis v_A/v_H und vom aerodynamischen Driftwinkel β_A abhängig.

Bei praktischen Berechnungen sind die Schiffsdaten sowie bestimmte Winkel β_A und Verhältnisse v_A/v_H vorgegeben, so daß F_2 zu einer Konstanten wird, die in der graphischen Darstellung $F_1(\beta_A)$ einer Parallelen zur β_H -Achse im Abstand F_2 entspricht.

Am Schnittpunkt von $F_1(\beta_H)$ mit F_2 kann der Driftwinkel β_H für die stationäre Fahrt mit Seitenwind abgelesen werden.

Abschätzung des Ruderanströmwinkels α_R

Da β_H bekannt ist, kann jetzt nach Gl. (1) der Ruderseitenkraftbeiwert bestimmt werden, wodurch auch der Anströmwinkel α_R des Ruders festgelegt wird (Gl. (1)):

$$c_{YHR} = \left(\frac{v_H}{v_R} \right)^2 \frac{L \cdot T}{A_R} \left[c_{YA} \frac{g_A}{g_H} \left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2 \frac{A_{LA}}{L \cdot T} - c_{YH} \right] \quad (1)$$

mit

$$c_{YH} = c_1' \beta_H + c_2 \beta_H^2 .$$

Man erhält dann

$$\alpha_R = f(c_{YHR} = c_{CR})$$

den Ruderanströmwinkel, aus dem Verlauf des Querkraftbeiwertes des Ruders über α_R .

2.5. Gleichgewicht der Kräfte in x - Richtung

Die x - Achse zeigt in Schiffslängsrichtung, die positiven Kräfte weisen nach vorn.

Es gilt:

$$- X_H - X_A - R_o + T(1-t) = 0$$

mit	R_o	Schleppwiderstand
	T	Propellerschub (t = Sogziffer)
	X_H	zusätzliche hydrodynamische Längskraft bei Seitenwind, abhängig vom Driftwinkel β_H und Ruderwinkel δ_R bzw. Ruderanströmwinkel α_R .
	X_A	Luftlängskraft, Komponente der Luftkraft in Schiffslängsrichtung, abhängig vom aerodynamischen Driftwinkel β_A .

Da R_o und $T(1-t)$ sich ohne Windeinfluß ausgleichen, wird der 'effektive' Windwiderstand

$$X_{A(eff)} = X_H + X_A$$

mit

$$X_H = c_{XH}(\beta_H) \cdot \frac{\rho_H}{2} v_H^2 L \cdot T + c_{XHR}(\alpha_R) \frac{\rho_H}{2} v_R^2 A_R$$

c_{XH}	Beiwert der zusätzlichen hydrodynamischen Längskraft des Rumpfes, abhängig vom Driftwinkel β_H
----------	--

C_{XHR} Ruderkraftkoeffizient in x - Richtung,
abhängig vom Anströmwinkel α_R .

und
$$\underline{X_A} = C_{XA}(\beta_A) \frac{g_A}{2} v_A^2 A_{LA}$$

C_{XA} Beiwert der Luftlängskraft

3. Zusätzliche Längskraft infolge Wind (effektiver Windwiderstand)

Wir erhielten für

$$\begin{aligned} \underline{X_{A(eff)}} &= \underline{X_H} + \underline{X_A} \\ \underline{X_{A(eff)}} &= C_{XH}(\beta_H) \frac{g_H}{2} v_H^2 L T + C_{XHR}(\alpha_R) \frac{g_H}{2} v_R^2 A_R \\ &\quad + C_{XA}(\beta_A) \frac{g_A}{2} v_A^2 A_{LA} , \end{aligned}$$

also

$$\underline{X_{A(eff)}} = \frac{g_A}{2} v_A^2 A_{LA} \left[C_{XA}(\beta_A) + C_{XH}(\beta_H) \frac{g_H}{g_A} \left(\frac{v_H}{v_A} \right)^2 \frac{L \cdot T}{A_{LA}} + C_{XHR}(\alpha_R) \frac{g_H}{g_A} \left(\frac{v_H}{v_A} \right)^2 \left(\frac{v_R}{v_H} \right)^2 \frac{A_R}{L \cdot T} \frac{L \cdot T}{A_{LA}} \right] \quad (8c)$$

Folglich wird der effektive Luftlängskraftbeiwert

$$C_{XA(eff)} = C_{XA} + C_{XHA} \quad (9)$$

mit

$$c_{XHA} = \frac{g_H}{g_A} \left(\frac{v_H}{v_A} \right)^2 \frac{L \cdot T}{A_{LA}} \left[c_{XH}(\beta_H) + c_{XHR}(\alpha_R) \left(\frac{v_R}{v_H} \right)^2 \frac{A_R}{L \cdot T} \right] \quad (9a)$$

dem Beiwert der hydrodynamischen zusätzlichen Längskraft bei Seitenwind, bezogen auf Luftdichte, Luftgeschwindigkeit und Überwasserlateralfläche

$$c_{XHA} = \frac{g_H}{g_A} \left(\frac{v_H}{v_A} \right)^2 \frac{L \cdot T}{A_{LA}} c_{XHges}(\beta_H, \alpha_R) \quad (9b)$$

also

$$c_{XHges} = c_{XH}(\beta_H) + c_{XHR}(\alpha_R) \left(\frac{v_R}{v_H} \right)^2 \frac{A_R}{L \cdot T} \quad (9c)$$

Beiwert der hydrodynamischen zusätzlichen Längskraft bei Seitenwind. (c_{XH} aus Schrägschleppversuchen, c_{XHR} aus Ruderuntersuchungen).

Zur praktischen Berechnung der zusätzlichen Längskraft bei Seitenwind empfiehlt sich wiederum die Einführung der Längskraft - Gleitzahlen der Kräfte am Unterwasserschiff (vergl. IfS - Bericht Nr. 286), wodurch ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen des genannten Berichtes möglich wird:

Längskraft - Gleitzahl der gesamten hydrodynamischen Kräfte

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{YH})_{ges} &= \frac{X_H}{Y_H} = \frac{X_H}{Y_A} \quad (\text{denn } Y_H = Y_A) \\ (\varepsilon_{YH})_{ges} &= \frac{c_{XHges} \frac{g_H}{2} v_H^2 \frac{L \cdot T}{A_{LA}}}{c_{YA} \frac{g_A}{2} v_A^2} = \frac{c_{XHges}}{c_{YA}} \frac{g_H}{g_A} \left(\frac{v_H}{v_A} \right)^2 \frac{L \cdot T}{A_{LA}} \end{aligned} \quad (10)$$

Hiermit läßt sich Gl. (9) auch schreiben:

$$(c_{XA})_{eff} = c_{XA} + (\varepsilon_{YH})_{ges} c_{YA}$$

(vergl. IfS - Bericht Nr. 286, 2.3.2.5.)

4. Beispielrechnungen

Die Beispielrechnungen wurden mit den Daten des bereits im IfS - Bericht Nr. 286 für die Rechnung ausgewählten Fährschiffes 'Kronprins Harald' (7000 BRT) ausgeführt, und zwar für verschiedene Rumpfformen. Berechnungen mit den Daten des Forschungsschiffes 'METEOR' schienen wenig zweckmäßig, da sich bei den Rechnungen ohne Giermomentenausgleich kein nennenswerter Driftwinkleinfluß auf die effektive Luft-Längskraft gezeigt hatte. Dagegen konnte beim Fährschiff ein deutlicher Einfluß des Driftwinkels bei unterschiedlichen Windstärken auf die effektive Luft - Längskraft nachgewiesen werden.

Schiffsdaten:(vergl. IfS - Bericht Nr. 286, 4.2.)

Länge über alles	$L_{UA} = 139,3 \text{ m}$
Länge Wasserlinie	$L = 126,4 \text{ m}$
Breite	$B = 18,1 \text{ m}$
Tiefgang	$T = 5,5 \text{ m}$
Lateralfäche	$L \cdot T = 126,4 \cdot 5,5 = 696 \text{ m}^2$
Überwasser- lateralfäche	$A_{LA} = 1860 \text{ m}^2$
Geschwindigkeit	$v_H = 20 \text{ kn}$

Die verwendeten Kennzahlen von Über- und Unterwasserschiff wurden im IfS - Bericht Nr. 286 ausführlich dargestellt. Hier folgen nur notwendige Ergänzungen, da sich bei den hier vorliegenden Berechnungen der Umfang der erforderlichen Kennzahlen und Daten erhöht hat.

4.1. Kennzahlen von Überwasserschiff, Unterwasserschiff und Ruder

4.1.1. Kennzahlen des Überwasserschiffes

Ein Modell des Fährschiffs 'Kronprins Harald' wurde im Windkanal des IfS untersucht. Den Versuchsergebnissen entnehmen wir für den vorgesehenen Bereich der aerodynamischen Driftwinkel β_A folgende Kennzahlen:

β_A	(bezüglich $L_{\bar{U}A}/2$)					entsprechende Ausgleichsgerade	
	C_{XA}	C_{YA}	$C_{NA}(\frac{L_{\bar{U}A}}{2})$	$\frac{a_A^*}{L_{\bar{U}A}}$	$\frac{a_A}{L_{\bar{U}A}}$	$(\frac{a_A}{L_{WL}})_{\text{ausgeg.}}$	C_{NA}
0°	-0,045	0	—	—	—	—	—
15°	-0,054	0,210	0,0550	0,238	0,210	0,195	0,064
30°	-0,047	0,516	0,1073	0,292	0,269	0,250	0,129
45°	-0,012	0,825	0,1553	0,312	0,291	0,300	0,165
60°	0,020	0,879	0,1362	0,345	0,327	0,353	0,129
(90°	-0,006	0,810	0,0272	0,466	0,460	0,460	0,032)
(120°	-0,021	0,871	-0,0702	0,581	0,587	0,564	-0,056)

Die aerodynamischen Giermomentenbeiwerte $C_{NA}(L_{\bar{U}A}/2) = \frac{N_A}{\frac{\rho_A}{2} v_A^2 A_{LA} L_{\bar{U}A}}$ sind auf $\frac{L_{\bar{U}A}}{2}$ bezogen. Sie wurden für die vorliegenden Berechnungen auf $\frac{L_{WL}}{2}$ bezogen und mit L_{WL} entsprechend dimensionslos gemacht.

Drucklage hinter VK Schiff:

$$\frac{a_A^*}{L_{\bar{U}A}} = - \frac{C_{NA}(\frac{L_{\bar{U}A}}{2})}{C_{YA}} + 0,50$$

Druckpunktlage hinter VL:

$$\frac{a_A}{L_{WL}} = \left(\frac{a_A^*}{L_{\bar{U}A}} \right) \frac{L_{\bar{U}A}}{L_{WL}} - \frac{L_{\bar{U}}}{L_{WL}}$$

$L_{\bar{U}}$ = Länge des vorderen Überhangs ($L_{\bar{U}}/L_{WL} = 0,052$)
 $L_{\bar{U}A}/L_{WL} = 1,10$

Für (a_A / L_{WL}) wurde eine Ausgleichsgerade ermittelt:
(vergl. Abb. 2a)

$$\left(\frac{a_A}{L_{WL}} \right)_{\text{ausggl.}} = 0,1492 + 0,00347 \beta_A$$

Damit wird der in der Rechnung verwendete Giermomentenbeiwert

$$c_{NA} \left(\frac{L_{WL}}{2} \right) = c_{YA} \left(0,50 - \frac{a_A}{L_{WL}} \right)$$

diese Werte sind in obenstehender Tabelle mit angegeben.

4.1.2. Kennzahlen des Rumpfes

Unter Vernachlässigung der abweichenden Formverhältnisse des Unterwasserschiffes wurden Schrägschleppversuchsergebnisse von Graff (Lit. /5/ im IfS - Bericht Nr. 286) mit dem Rumpf eines Fracht- und Fahrgastschiffes benutzt, und zwar wie im IfS - Bericht Nr. 286 für die 'Wulstform' und die 'Normalform' des Rumpfes mit

$$L/B = 8,12 ; \quad B/T = 3,00 ; \quad \Lambda = \frac{2 \cdot T}{L} = 0,082$$

bei einer Froudeschen Zahl $F_n = 0,230$.

1) 'Wulstform'

β_H	$c_{YH} \cdot 10^2$	$c_{CH} \cdot 10^2$	$c_{NH}^* \cdot 10^2$ bezügl. HL	$\frac{a_H}{L_{WL}}$
2°	0,851	0,80	0,775	0,090
4°	1,607	1,510	1,377	0,144
6°	2,601	2,42	2,069	0,203
8°	3,846	3,61	2,962	0,229

* c_{NH} ist auf das hintere Lot bezogen, so daß sich der Abstand des hydrodynamischen Druckpunktes vom VL errechnet

$$\frac{a_H}{L_{WL}} = 1 - \frac{c_{NH}^*}{c_{YH}}$$

Die Ausgleichsgerade hierfür lautet: (vergl. Darstellung in Abb. 2b)

$$\frac{a_H}{L_{WL}} = 0,048 + 0,0237 \beta_H^0 = 0,048 + 1,357 \beta_H$$

Ausgleichskurven für die Querkraftbeiwerte und Seitenkraftbeiwerte

$$c_{CH} = 0,1933 \beta_H + 0,43 \beta_H^2$$

$$c_{YH} = 0,2067 \beta_H + 0,43 \beta_H^2$$

Für die Längskraft-Gleitzahl des Rumpfes ergibt sich folgende Ausgleichskurve (vergl. IfS - Bericht Nr. 286):

$$\epsilon_{YH} = -1,88 \beta_H + 11,77 \beta_H^2$$

Hiermit wird der Längskraftzuwachs des Rumpfes (Beiwert):

$$c_{XH} = \epsilon_{YH} \cdot c_{YH}$$

2) 'Normalform' ($c_{DH_0} = 0,0134$)

β_H	$c_{YH} \cdot 10^2$	$c_{CH} \cdot 10^2$	$c_{NH}^* \cdot 10^2$ bezügl. HL	$\frac{a_H}{L}$
2°	0,567	0,520	0,567	0
4°	1,332	1,230	1,329	0,001
6°	2,576	2,400	2,427	0,058
8°	4,028	3,780	3,336	0,170

Die Druckpunktlage folgt hier mehr einer Kurve (vergl. Abb. 2b); bei kleinen Driftwinkeln ist die Meßgenauigkeit jedoch gering. Aus systematischen Gründen wurde auch hier eine Ausgleichsgerade gewählt (vergl. Abb. 2b):

$$\frac{\alpha_H}{L_{WL}} = - 0,079 + 1,586 \beta_H$$

Ausgleichskurven für

Querkraftbeiwerte $c_{CH} = 0,0934 \beta_H + 1,271 \beta_H^2$

Seitenkraftbeiwerte $c_{YH} = 0,1068 \beta_H + 1,271 \beta_H^2$

Längskraft-Gleitzahlen des Rumpfes (vergl. IfS - Bericht Nr. 286)

$$\epsilon_{YH} = - 0,94 \beta_H + 3,89 \beta_H^2$$

Beide Rumpfformen unterscheiden sich nur durch die Form des Bugs, dennoch weichen die Kraft- und Momentenbeiwerte erheblich voneinander ab. Besonders deutlich ist der Unterschied der Druckpunktlagen. Bei der 'Normalform' (ohne Wulst) liegen die Druckpunkte bei kleinen Driftwinkeln in der Nähe des vorderen Lotes, bei der 'Wulstform' ca. 10 % der Schiffslänge hinter den Druckpunkten der 'Normalform'.

In den folgenden Rechnungen wird gezeigt, wie sich dies auf die zum Ausgleich der Giermomente nötige Ruderlage auswirkt.

4.1.3. Geschwindigkeiten und Kräfte am Ruder

1) Querkraft- und Widerstandsbeiwert

Die Abschätzung erfolgte nach den Angaben in 'Principles of Naval Architecture', SNAME 1967, S. 503ff.

Querkraftbeiwert des Ruders:

$$c_{CR} = \frac{c_R}{\frac{\rho}{2} v_R^2 A_R} = \left(\frac{\partial c_{CR}}{\partial \alpha_R} \right)_{\alpha_R=0} \cdot \alpha_R + \frac{c_{D\infty}}{\Lambda_R} \alpha_R^2$$

Widerstandsbeiwert:

$$c_{DR} = c_{DR_0} + \frac{c_{CR}^2}{0,9 \pi \Lambda_R}$$

Es gilt für

$$\left(\frac{\partial c_{CR}}{\partial \alpha_R} \right)_{\alpha_R=0} = \frac{0,9 \cdot 2\pi \cdot \Lambda_R}{\sqrt{\Lambda_R^2 + 4} + 1,8} = \frac{1,8 \pi \Lambda_R}{\sqrt{\Lambda_R^2 + 4} + 1,8}$$

mit $\Lambda_R = h_R/l_R$ Seitenverhältnis des Ruders. (effektives Seitenverhältnis $\Lambda_{R(eff)}$ ca. $1,8 \Lambda_R$ bei engem Spalt zwischen Ruder und Rumpf).

Wird ein effektives Seitenverhältnis von $\Lambda_{R(eff)} = 3,0$ angenommen, so wird

$$\left(\frac{\partial c_{CR}}{\partial \alpha_R} \right)_{\alpha_R=0} = \frac{1,8 \pi \cdot 3}{\sqrt{3^2 + 4} + 1,8} = \frac{5,4 \pi}{3,6 + 1,8} = \pi$$

mit $c_{D\infty} = 1,0$ (scharfkantige Enden, Verjüngung ca. 0,5) wird

$$\frac{c_{D\infty}}{\Lambda_R} = \frac{1}{3} = 0,33$$

Damit erhalten wir für den Ruderquerkraftbeiwert

$$c_{CR} = 3,14 \alpha_R + 0,33 \alpha_R^2$$

für kleine α_R , die bei der vorliegenden Untersuchung allein interessieren, kann das quadratische Glied vernachlässigt werden, so daß

$$c_{CR} = 3,14 \alpha_R$$

gilt.

Mit $c_{DR_0} = 0,010$ wird der Widerstandsbeiwert

$$c_{DR} = 0,01 + \frac{c_{CR}^2}{0,9 \cdot 3,14 \cdot 3} = 0,01 + 0,118 c_{CR}^2$$

Der Beiwert der Ruderkraft in y - Richtung kann mit ausreichender Genauigkeit gleich dem Querkraftbeiwert gesetzt werden:

$$\begin{aligned} c_{YHR} &= c_{CR} \\ c_{YHR} &= 3,14 \alpha_R \end{aligned}$$

Der Beiwert der zusätzlichen Ruderkraft in x - Richtung bei Ruderlage ist

$$c_{XHR} = - (c_{DR} - c_{DR_0}) = -0,118 c_{CR}^2 = -0,118 c_{YHR}^2$$

Es reicht für diese Berechnungen aus, den Angriffspunkt der Ruderkraft im Abstand $l_{WL}/2$ hinter dem Momentenbezugspunkt anzunehmen (Kraftangriffspunkt im Schnittpunkt der Wasserlinie mit dem Hintersteven).

2) Effektiver Ruderanströmwinkel α_R bei Drift des Schiffes

Man kann hierzu auf die Ausführungen von Suhrbier im J.S.T.G. 1965, Seite 409 ff zurückgreifen.

Der Anströmwinkel α_R des Ruders bei einem Driftwinkel β_H weicht vom Ruderwinkel δ_R ab.

Es gilt

$$\alpha_R = \delta_R + \beta_R$$

wobei

$\beta_R = k \cdot \beta_H$ der dem Driftwinkel des Schiffes proportionale 'effektive Driftwinkel' am Ort des Ruders ist (vergl. Abb. 1)

Zur Ermittlung des effektiven Driftwinkels β_R sind zu beachten:
die Umlenkwirkung des Schiffsrumpfes, der Nachstrom, die vom Schubbelastungsgrad abhängige Geschwindigkeitserhöhung im Propellerstrahl.

Suhrbier gibt an:

$$k = k_o \frac{1}{\sqrt{1+c_T}}$$

k_o ca. 0,8 berücksichtigt die Umlenkwirkung des Rumpfes;
 c_T Schubbelastungsgrad

Nimmt man als Schubbelastungsgrad $c_T = 1,78$ an (Angaben von Henschke, Schiffbautechnisches Handbuch Bd. 1, S. 480), so wird

$$k = \frac{0,80}{\sqrt{1+1,78}} = 0,480 \approx 0,50 ;$$

damit wird

$$\beta_R \approx 0,5 \beta_H$$

also

$$\alpha_R = \delta_R + 0,5 \beta_H$$

und

$$\delta_R = \alpha_R - 0,5 \beta_H$$

3) Anströmgeschwindigkeit des Ruders

Ebenfalls nach Suhrbier gilt für die mittlere Ruderanströmgeschwindigkeit:

$$v_R \approx v_H (1-w) \sqrt{1+c_T}$$

w = Nachstromziffer

Es wird angenommen, daß sich die gesamte Ruderfläche im Propellerstrahl befindet;

mit $w = 0,25$ und $c_T = 1,78$ ergibt sich

$$v_R = v_H (1-0,25) \sqrt{1+1,78} = 1,25 v_H$$

so daß $\frac{v_H}{v_R} = 0,80$ und $\frac{v_R}{v_H} = 1,25$ wird.

4.2. Berechnung der zusätzlichen Längskraft bei Seitenwind

Wie im IfS - Bericht Nr. 286 werden verschiedene Winkel β_A und Verhältnisse v_W/v_H der wahren Windgeschwindigkeit v_W zur Fahrtgeschwindigkeit v_H vorgegeben.

Das Verhältnis Luftgeschwindigkeit v_A (scheinbare Windgeschwindigkeit) zur Fahrtgeschwindigkeit v_H wird wie im IfS - Bericht Nr. 286 unter Vernachlässigung von β_H errechnet nach

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

Voraussetzung der Berechnung ist zunächst die Kenntnis der 'Rumpf - Funktion' nach Gl. (6):

$$F_1(\beta_H) = b_3 \beta_H^3 + b_2 \beta_H^2 + b_1 \beta_H.$$

4.2.1. Berechnungen für die 'Wulstform' des Rumpfes

Es waren

$$c_{YH} = 0,2067 \beta_H + 0,43 \beta_H^2 = c_1' \beta_H + c_2 \beta_H^2$$

$$\frac{a_H}{L} = 0,048 + 1,357 \beta_H = a_1 + a_2 \beta_H$$

also

$$\begin{aligned} c_1' &= 0,2067 & ; & & c_2 &= 0,43 \\ a_1 &= 0,048 & ; & & a_1' &= 0,5 - a_1 = 0,452 \\ a_2 &= 1,357 \end{aligned}$$

Damit wird

$$b_1 = 2a_1'c_2 + c_1' = 2 \cdot 0,452 \cdot 0,2067 + 0,2067 = 0,393$$

$$\begin{aligned} b_2 &= 2a_1'c_2 - 2a_2c_1' + c_2 \\ &= 2 \cdot 0,452 \cdot 0,43 - 2 \cdot 1,357 \cdot 0,2067 + 0,43 = 0,258 \end{aligned}$$

$$b_3 = -2a_2c_2 = -2 \cdot 1,357 \cdot 0,43 = -1,167$$

also

$$F_1(\beta_H) = -1,167 \beta_H^3 + 0,258 \beta_H^2 + 0,393 \beta_H$$

Es ergibt sich für $F_1(\beta_H)$: (vergl. Abb. 3)

β_H°	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$F_1(\beta_H)$	0,00345	0,00693	0,01043	0,01398	0,02114	0,0283	0,0355	0,0427	0,0498

Mit $g_A / g_H = 1 / 835$

und $A_{LA} / (L \cdot T) = 1860 / 696 = 2,67$

wird nach Gl.(7)

$$F_2 = \frac{g_A}{g_H} \cdot \frac{A_{LA}}{L \cdot T} \cdot \left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2 \cdot (2 c_{NA} + c_{YA}) = \frac{2,67}{835} \left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2 (2 c_{NA} + c_{YA})$$

Die weiteren Berechnungen erfolgen in Tabellenform:

β_A	$\frac{v_W}{v_H}$	$\frac{v_A}{v_H}$	$\left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2$	c_{XA}	c_{YA}	c_{NA}	Gl.(7) F_2	Gleichgewicht β_H°	c_{YH}	e_{YH}	c_{XH}
15°	3	3,96	15,7	-0,054	0,210	0,064	0,0170	2,41	0,00946	-0,0582	-0,000551
	2	2,95	8,7	-0,054	0,210	0,064	0,0094	1,35	0,00511	-0,0378	-0,000193
	1	1,93	3,73	-0,054	0,210	0,064	0,0040	0,58	0,00214	-0,0178	-0,000038
30°	3	3,82	14,6	-0,047	0,516	0,129	0,0361	5,08	0,02173	-0,0740	-0,001607
	2	2,80	7,83	-0,047	0,516	0,129	0,0194	2,75	0,01092	-0,0630	-0,000688
	1	1,73	3,0	-0,047	0,516	0,129	0,0074	1,06	0,00398	-0,0308	-0,000123
45°	3	3,62	13,1	-0,012	0,825	0,165	0,0485	6,82	0,03077	-0,0563	-0,001732
	2	2,58	6,64	-0,012	0,825	0,165	0,0246	3,47	0,01411	-0,0704	-0,000995
	1	1,41	2,0	-0,012	0,825	0,165	0,0074	1,06	0,00398	-0,0308	-0,000123
60°	3	3,37	11,4	0,020	0,879	0,129	0,0414	5,82	0,02543	-0,0693	-0,001765
	2	2,30	5,29	0,020	0,879	0,129	0,0193	2,73	0,01084	-0,0628	-0,000681
	1	1,00	1,00	0,020	0,879	0,129	0,0036	0,52	0,00192	-0,0161	-0,000031

Der Driftwinkel β_H für Gleichgewicht der Seitenkräfte und Giermomente ergibt sich graphisch für $F_1(\beta_H) = F_2$ aus Abb. 3.

Der Seitenkraftbeiwert des Rumpfes c_{YH} ergibt sich nach 4.1.2. zu

$$c_{YH} = 0,2067 \beta_H + 0,43 \beta_H^2$$

Nach 4.1.2. wird die Längskraft - Gleitzahl des Rumpfes berechnet nach

$$\varepsilon_{YH} = -1,88 \beta_H + 11,77 \beta_H^2 = -0,0328 \beta_H^\circ + 0,00359 \beta_H^{\circ 2}$$

Den Längskraftzuwachs des Rumpfes erhält man in Beiwertform dann

$$C_{XH} = \varepsilon_{YH} \cdot C_{YH}$$

Es ist nun noch der Ruderseitenkraftbeiwert $C_{YHR} = C_{CH}$ (Gl. (1))

$$C_{YHR} = \left(\frac{v_H}{v_R}\right)^2 \frac{L \cdot T}{A_R} \left(C_{YA} \frac{g_A}{g_H} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 \frac{A_{LA}}{L \cdot T} - C_{YH} \right) \quad \left(\frac{v_H}{v_R}\right)^2 = 0,64 ;$$

$$C_{YHR} = 0,64 \cdot 40 \left(C_{YA} \frac{2,67}{835} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 - C_{YH} \right) \quad \frac{L \cdot T}{A_R} = \frac{696}{17,4} = 40 ;$$

$$C_{YHR} = 25,6 \left(0,0032 C_{YA} \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 - C_{YH} \right)$$

zu berechnen und der Ruderanströmwinkel α_R abzuschätzen (vergl. 4.1.3.1.)

$$\hat{\alpha}_R = \frac{C_{YHR}}{3,14} \quad \alpha_R^\circ = 18,25 C_{YHR}$$

Man erhält damit den Ruderwinkel für Momentenausgleich

$$\delta_R^\circ = \alpha_R^\circ - 0,5 \beta_H^\circ$$

Schließlich wird für die nachfolgenden Berechnungen noch der Beiwert der zusätzlichen Ruderkraft in x - Richtung benötigt:

$$C_{XHR} = -0,118 C_{YHR}^2$$

Es läßt sich dann der Beiwert der hydrodynamischen zusätzlichen Längskraft durch Rumpf und Ruder $C_{XH_{ges}}$ (Gl. (9c)) ermitteln:

$$C_{XH_{ges}} = C_{XH}(\beta_H) + C_{XHR}(\alpha_R) \left(\frac{v_R}{v_H}\right)^2 \frac{A_R}{L \cdot T}$$

$$c_{XH_{ges}} = c_{XH}(\beta_H) + \frac{c_{XHR}(\alpha_R)}{0,64 \cdot 40} = c_{XH}(\beta_H) + 0,039 c_{XHR}(\alpha_R)$$

Schließlich wird noch die Längskraft - Gleitzahl der gesamten hydrodynamischen Kräfte nach Gl. (10) berechnet

$$\begin{aligned} (\epsilon_{YH})_{ges} &= \frac{c_{XH_{ges}}}{c_{YA}} \cdot \frac{S_H}{S_A} \left(\frac{v_H}{v_A} \right)^2 \cdot \frac{L \cdot T}{A_{LA}} \\ &= \frac{c_{XH_{ges}}}{c_{YA}} \left(\frac{v_H}{v_A} \right)^2 \frac{835}{2,67} = \frac{c_{XH_{ges}}}{c_{YA}} \left(\frac{v_H}{v_A} \right)^2 313 \end{aligned}$$

Diese Längskraft - Gleitzahl kann mit derjenigen ohne Momentenausgleich verglichen werden, was auch für die hieraus zu berechnenden effektiven Luft - Längskraftbeiwerte gilt

$$\begin{aligned} c_{XA(eff)} &= -c_{XA} + c_{XH_{ges}} \frac{S_H}{S_A} \left(\frac{v_H}{v_A} \right)^2 \frac{L \cdot T}{A_{LA}} \quad \text{Gl. (9)} \\ &= c_{XA} + (\epsilon_{YH})_{ges} \cdot c_{YA} \end{aligned}$$

Die Rechnung erfolgte wiederum in einer Tabelle:

β_A°	$\left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2$	c_{YHR}	α_R°	Ruder- winkel δ_R°	$-c_{XHR}$	$c_{XH_{ges}}$	$(\epsilon_{YH})_{ges}$	$c_{XA_{eff}}$	z. Vergl. $c_{XA_{eff}}$ o. Ruderlag
15	15,7	0,0282	0,52	-0,69	0,000094	-0,000555	-0,0527	-0,0651	-0,0668
	8,7	0,0190	0,35	-0,33	0,000043	-0,000195	-0,0334	-0,0610	-0,0619
	3,73	0,0095	0,17	-0,12	0,000010	-0,000038	-0,0152	-0,0572	-0,0578
30	14,6	0,0607	1,11	-1,43	0,000435	-0,001624	-0,0628	-0,0794	-0,0835
	7,83	0,0507	0,93	-0,45	0,000303	-0,000700	-0,0542	-0,0750	-0,0826
	3,0	0,0248	0,45	-0,08	0,000073	-0,000126	-0,0255	-0,0602	-0,0640
45	13,1	0,0980	1,79	-1,62	0,001135	-0,001776	-0,0515	-0,0545	-0,0508
	6,64	0,0876	1,60	-0,14	0,000905	-0,001030	-0,0590	-0,0607	-0,0746
	2,0	0,0333	0,61	-0,08	0,000131	-0,000128	-0,0244	-0,0321	-0,0400
60	11,4	0,1695	3,09	0,18	0,003390	-0,001897	-0,0592	-0,0320	-0,0275
	5,29	0,1034	1,88	0,51	0,001265	-0,000730	-0,0492	-0,0233	-0,0437
	1,0	0,0228	0,42	0,16	0,000061	-0,000033	-0,0118	0,0096	0,0033

Zum Vergleich wurden in der Tabelle die im Bericht Nr. 286 ermittelten effektiven Luft - Längskraftbeiwerte ohne Momentenausgleich durch das Ruder eingetragen.

4.2.2. Berechnungen für die 'Normalform' des Ruders

Die Vergleichsrechnung folgt ohne Kommentar, da sie analog zu 4.2.1. durchgeführt wurde.

'Rumpf - Funktion'

$$c_{YH} = 0,1068 \beta_H + 1,271 \beta_H^2 = c_1' \beta_H + c_2 \beta_H^2$$

$$\frac{a_H}{L} = -0,079 + 1,586 \beta_H = a_1 + a_2 \beta_H$$

mit

$$c_1' = 0,1068 \quad ; \quad c_2 = 1,271$$

$$a_1 = -0,079 \quad ; \quad a_2 = 1,586 \quad ; \quad a_1' = 0,5 - a_1 = 0,579$$

wird

$$b_1 = 2a_1'c_1' + c_1' = c_1'(2a_1' + 1) = 0,1068(2 \cdot 0,579 + 1) = 0,2305$$

$$b_2 = 2a_1'c_2 + 2a_2c_1' + c_2 = 2 \cdot 0,579 \cdot 1,271 - 2 \cdot 1,586 \cdot 0,1068 + 1,271 = 2,404$$

$$b_3 = -2a_2c_2 = -2 \cdot 1,586 \cdot 1,271 = -4,03$$

$$F_1(\beta_H) = -4,03 \beta_H^3 + 2,404 \beta_H^2 + 0,2305 \beta_H$$

Funktionswerte (vergl. Darstellung in Abb. 3)

β_H°	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$F_1(\beta_H)$	0,0022	0,0047	0,0076	0,0108	0,0181	0,0265	0,0357	0,0459	0,0555

Die Rumpfabmessungen haben sich gegenüber 4.2.1. nicht geändert, so daß

$$F_2 = \frac{2,67}{835} \left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2 (2 c_{NA} + c_{YA})$$

bleibt. (von 4.2.1. übernommen)

Die graphische Ermittlung des Driftwinkels β_H für den Gleichgewichtszustand erfolgte wiederum in Abb.3

$$c_{YH} = 0,1068 \beta_H + 1,271 \beta_H^2$$

$$\epsilon_{YH} = -0,94 \beta_H + 3,89 \beta_H^2$$

$$c_{XH} = \epsilon_{YH} \cdot c_{YH}$$

Die Rechenergebnisse enthält folgende Tabelle:

β_A	$\frac{v_W}{v_H}$	$\frac{v_A}{v_H}$	$\left(\frac{v_A}{v_H} \right)^2$	c_{XA}	c_{YA}	c_{NA}	F_2	Gleichgewicht β_H°	c_{YH}	ϵ_{YH}	c_{XH}
15°	3	3,96	15,7	-0,054	0,210	0,064	0,0170	2,85	0,00849	-0,0371	-0,000315
	2	2,95	8,7				0,0094	1,80	0,00462	-0,0257	-0,000119
	1	1,93	3,73				0,0040	0,88	0,00194	-0,0135	-0,000026
30°	3	3,82	14,6	-0,047	0,516	0,129	0,0361	5,03	0,01922	-0,0525	-0,001008
	2	2,80	7,83				0,0194	3,17	0,00982	-0,0401	-0,000395
	1	1,73	3,0				0,0074	1,48	0,00362	-0,0217	-0,000079
45°	3	3,62	13,1	-0,012	0,825	0,165	0,0485	6,26	0,02690	-0,0562	-0,001512
	2	2,58	6,64				0,0246	3,77	0,01255	-0,0450	-0,000565
	1	1,41	2,0				0,0074	1,48	0,00362	-0,0217	-0,000079
60°	3	3,37	11,4	0,020	0,879	0,129	0,0414	5,55	0,02232	-0,0545	-0,001217
	2	2,30	5,29				0,0193	3,15	0,00973	-0,0399	-0,000388
	1	1,00	1,0				0,0036	0,82	0,00179	-0,0127	-0,000023

Die Berechnungsformeln für den Rudereinfluß (Ruderseitenkraftbeiwert, Anströmwinkel, Beiwert der zusätzlichen Ruderkraft in x - Richtung) werden von 4.2.1. übernommen.

Das gilt auch für die Gleichungen für C_{XHges} , $(E_{YH})_{ges}$ und $(C_{XA})_{eff}$.
Die Rechnung erfolgte wiederum in Tabellenform:

β_A	$\left(\frac{V_A}{V_H}\right)^2$	C_{YHR}	α_R°	Ruder- winkel δ_R°	$-C_{XHR}$	C_{XHges}	$(E_{YH})_{eff}$	$(C_{XA})_{eff}$	z. Vergleich $(C_{XA})_{eff}$ ohne Ruderlage
15°	15,7	0,0530	0,97	-0,46	0,000332	-0,000328	-0,0311	-0,0605	-0,0623
	8,7	0,0315	0,58	-0,32	0,000117	-0,000124	-0,0212	-0,0585	-0,0595
	3,73	0,0146	0,27	-0,17	0,000025	-0,000027	-0,0108	-0,0563	-0,0565
30°	14,6	0,1250	2,28	-0,24	0,001845	-0,001080	-0,0449	-0,0702	-0,0760
	7,83	0,0788	1,44	-0,15	0,000734	-0,000424	-0,0328	-0,0639	-0,0708
	3,0	0,0341	0,62	-0,12	0,000148	-0,000085	-0,0172	-0,0559	-0,0585
45°	13,1	0,1970	3,60	0,47	0,004580	-0,001691	-0,0490	-0,0524	-0,0598
	6,64	0,1275	2,33	0,44	0,001920	-0,000640	-0,0366	-0,0422	-0,0540
	2,0	0,0425	0,78	0,04	0,000213	-0,000087	-0,0165	-0,0256	-0,0310
60°	11,4	0,2490	4,55	1,77	0,007320	-0,001503	-0,0470	-0,0213	-0,0310
	5,29	0,1316	2,40	0,82	0,002040	-0,000468	-0,0315	-0,0077	-0,0222
	1,0	0,0261	0,48	0,07	0,000081	-0,000026	-0,0093	0,0118	0,0086

Zum Vergleich wurden wieder die effektiven Luftkraftbeiwerte ohne Momentenausgleich durch das Ruder angegeben.

5. Diskussion der Ergebnisse (vergl. Abb.4 und 5)

Ruderanströmwinkel α_R

Die zum Ausgleich der Giermomente erforderlichen Ruderseitenkräfte sind gering, so daß nur kleine Ruderanströmwinkel α_R erforderlich sind. Je achterlicher der scheinbare Wind einfällt, umso größer muß α_R sein. Ähnlich ist eine Zunahme von α_R mit größerer Windgeschwindigkeit zu verzeichnen. Im untersuchten Bereich ist der Ruderanströmwinkel stets kleiner als 4,6°.

Ruderwinkel δ_R

Bedingt durch den Driftwinkel am Ort des Ruders δ_R , der durch die Umlenkwirkung des Rumpfes und den Einfluß des Propellerstrahls kleiner ist als der Driftwinkel β_H , wird das Ruder bereits in Nullstellung unter einem Winkel angeströmt, der häufig größer ist als der zum Giermomentenausgleich erforderliche. Dies macht dann negative, nach Luv weisende Ruderwinkel δ_R notwendig. Lediglich für $\beta_A = 45^\circ$ und 60° konnten positive Ruderwinkel (nach Lee) ermittelt werden. Die Ruderwinkel liegen i.a. unter 1° , der Maximalwert von $+1,77^\circ$ ergab sich bei der 'Normalform' des Rumpfes (ohne Wulst) mit $\beta_A = 60^\circ$ und $v_w/v_H = 3,0$.

Da die hydrodynamischen Druckpunkte bei der Rumpfform mit Wulst weiter achterlich liegen, sich auch kleinere Ruderanströmwinkel α_R erforderlich, das Ruder liegt weiter nach Luv als bei der 'Normalform'.

Driftwinkel β_H

Die Driftwinkel sind bis zu 27% kleiner als ohne Momentenausgleich.

Längskraft - Gleitzahlen $(\epsilon_{YH})_{ges}$

Wegen des größeren Seitenverhältnisses des Ruders ist der vom Ruder aufzubringende Seitenkraftanteil mit einem geringeren Längskraftzuwachs verbunden als bei Erzeugung dieser Seitenkraft durch den Rumpf. Dies verbessert die 'hydrodynamische Güte' des Systems 'Rumpf + Ruder' gegenüber dem Rumpf allein.

Die Längskraft - Gleitzahlen liegen deutlich unter denen, die im Bericht Nr. 286 ohne Momentenausgleich ermittelt wurden.

Effektiver Luft - Längskraftbeiwert $(C_{XA})_{eff}$

$(C_{XA})_{eff}$ ist auch hier größer als C_{XA} , das der direkten Längskomponente der Luftkraft entspricht. da jedoch die Längskraft - Gleitzahlen bei Rechnung mit Momentenausgleich geringer als ohne Momentenausgleich sind, ergeben sich auch kleinere effektive Luft - Längskraftbeiwerte $(C_{XA})_{eff}$. Die Aussage vom Bericht Nr. 286, daß durch die seitenwindbe-

dingte Drift eine zusätzliche Längskraft hervorgerufen wird, die größer als die direkte Luftkraftkomponente in Längsrichtung sein kann, bleibt aber erhalten.

Die Verhältnisse $\frac{(c_{XA})_{eff}}{c_{XA}}$ gibt folgende Tabelle an:

β_A	$\frac{v_W}{v_H}$	„Wulstform“		„Normalform“	
		ohne Ruderlage $(c_{XA})_{eff} / c_{XA}$	mit Ruderlage $(c_{XA})_{eff} / c_{XA}$	ohne Ruderlage $(c_{XA})_{eff} / c_{XA}$	mit Ruderlage $(c_{XA})_{eff} / c_{XA}$
15°	3	1,24	1,20	1,16	1,12
	2	1,15	1,13	1,10	1,08
30°	3	1,78	1,69	1,62	1,49
	2	1,76	1,60	1,51	1,36
45°	3	4,23	4,53	4,98	4,37
	2	6,21	5,06	4,50	3,52
60°	3	- 1,37	- 1,60	- 1,55	- 1,06
	2	- 2,19	- 1,17	- 1,11	- 0,38

Definitionsskizze

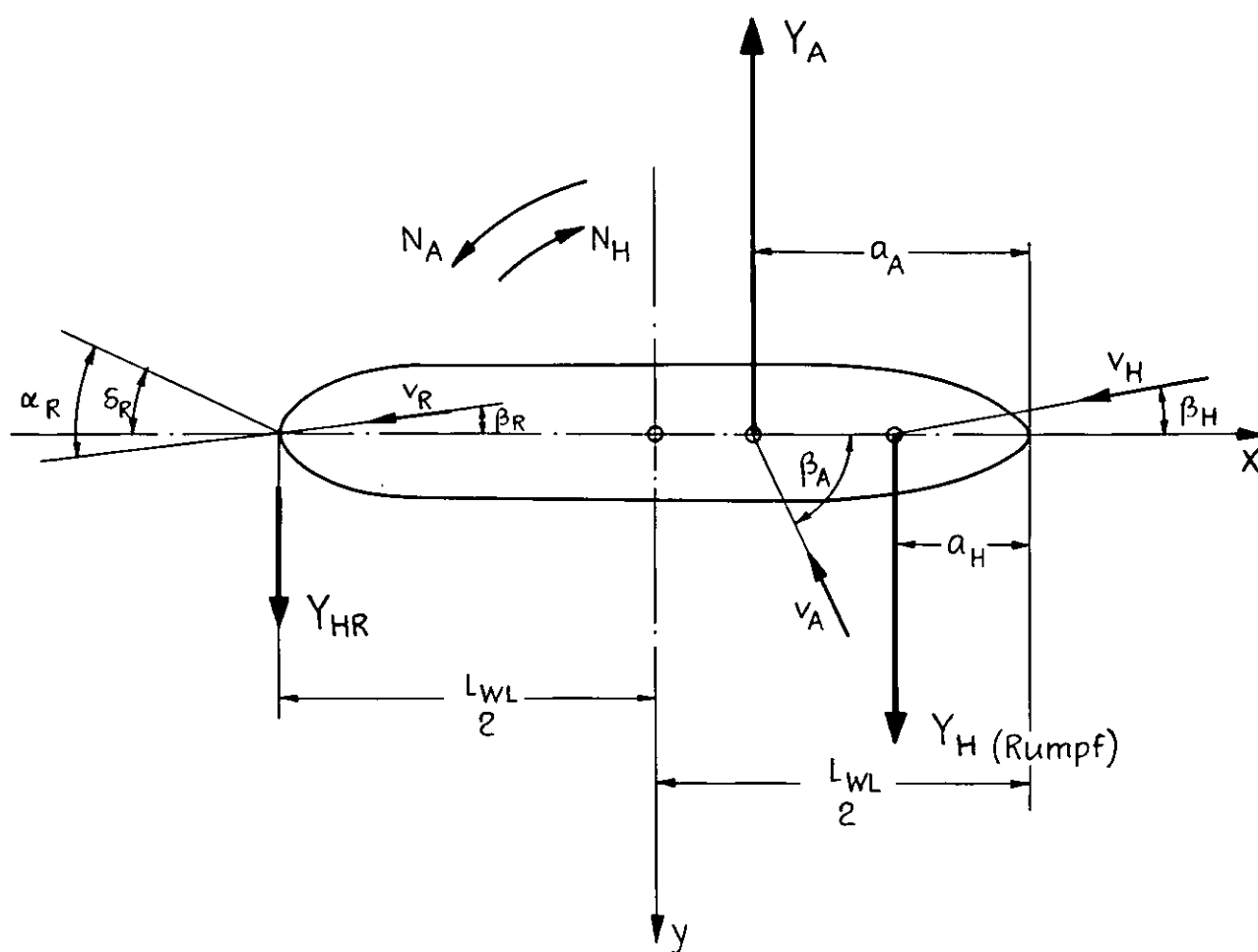


Abb. 2a

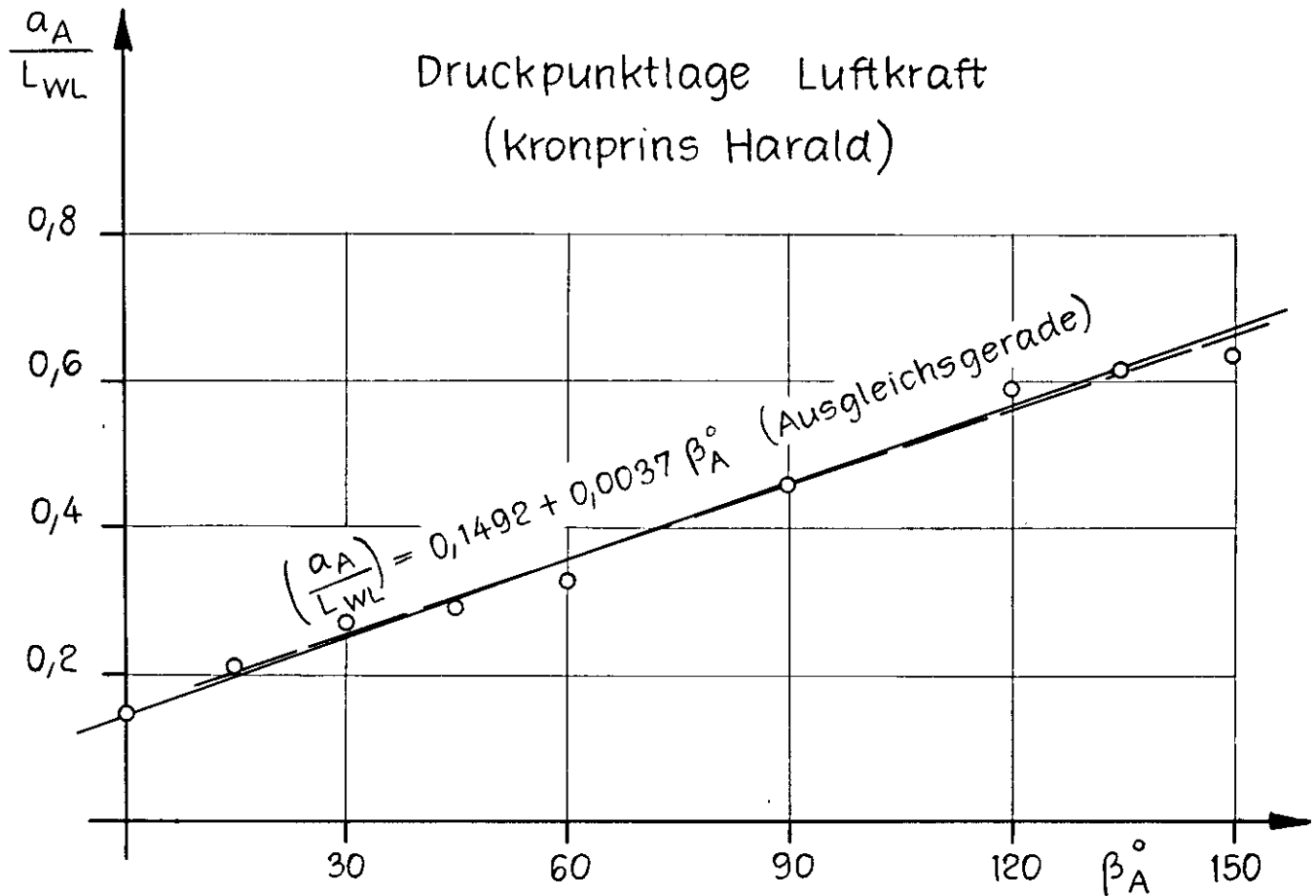


Abb. 2b

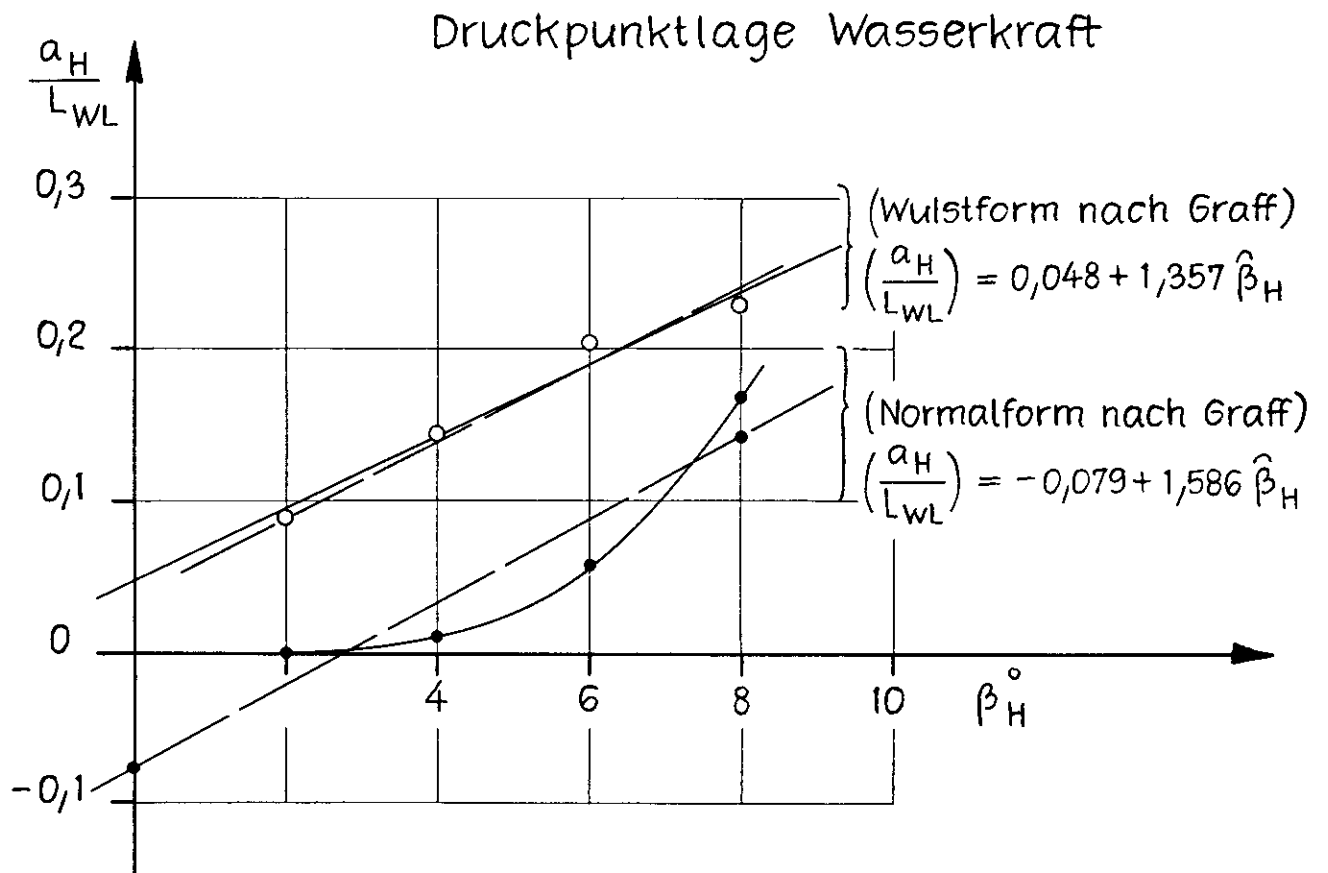
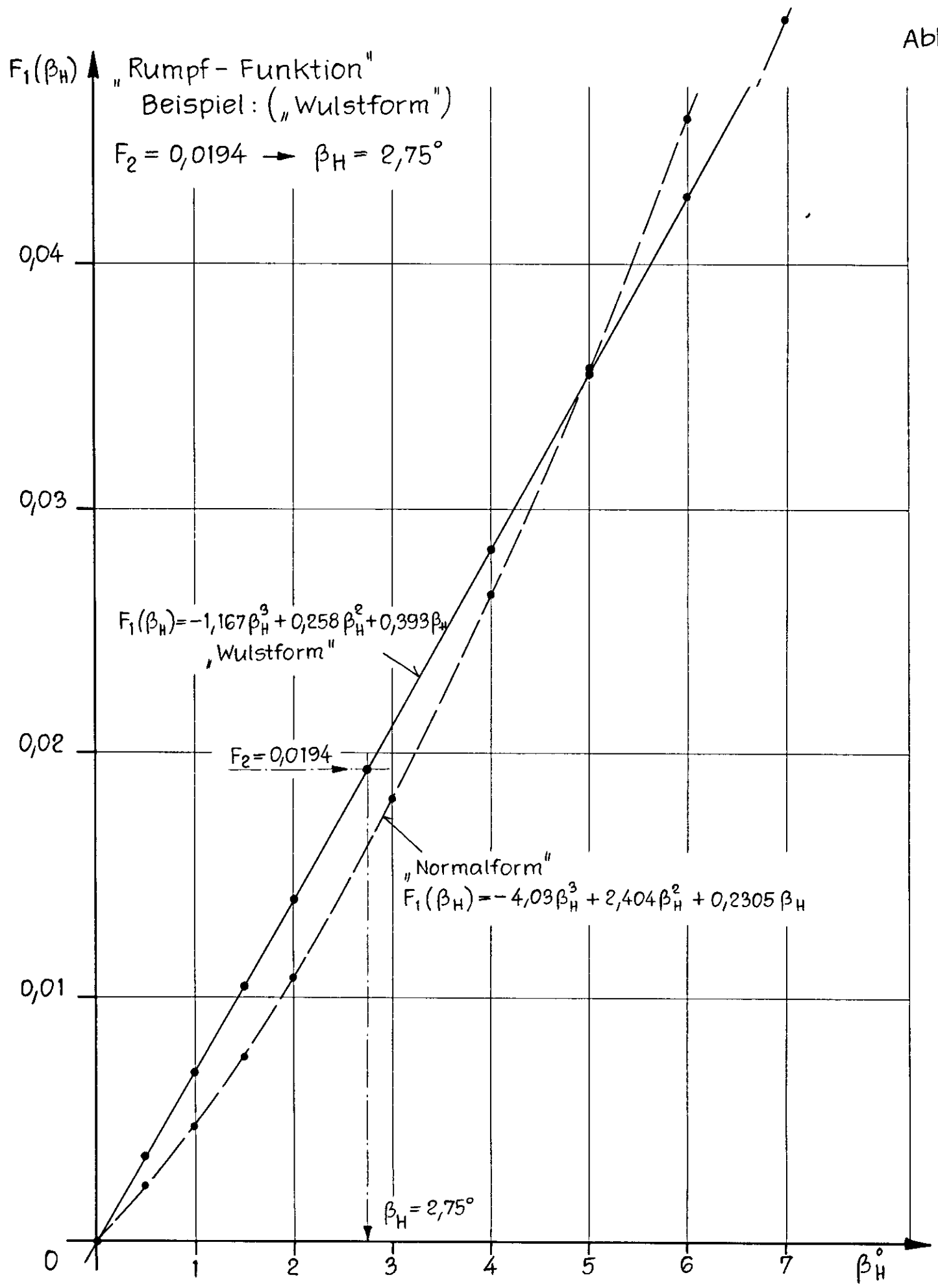
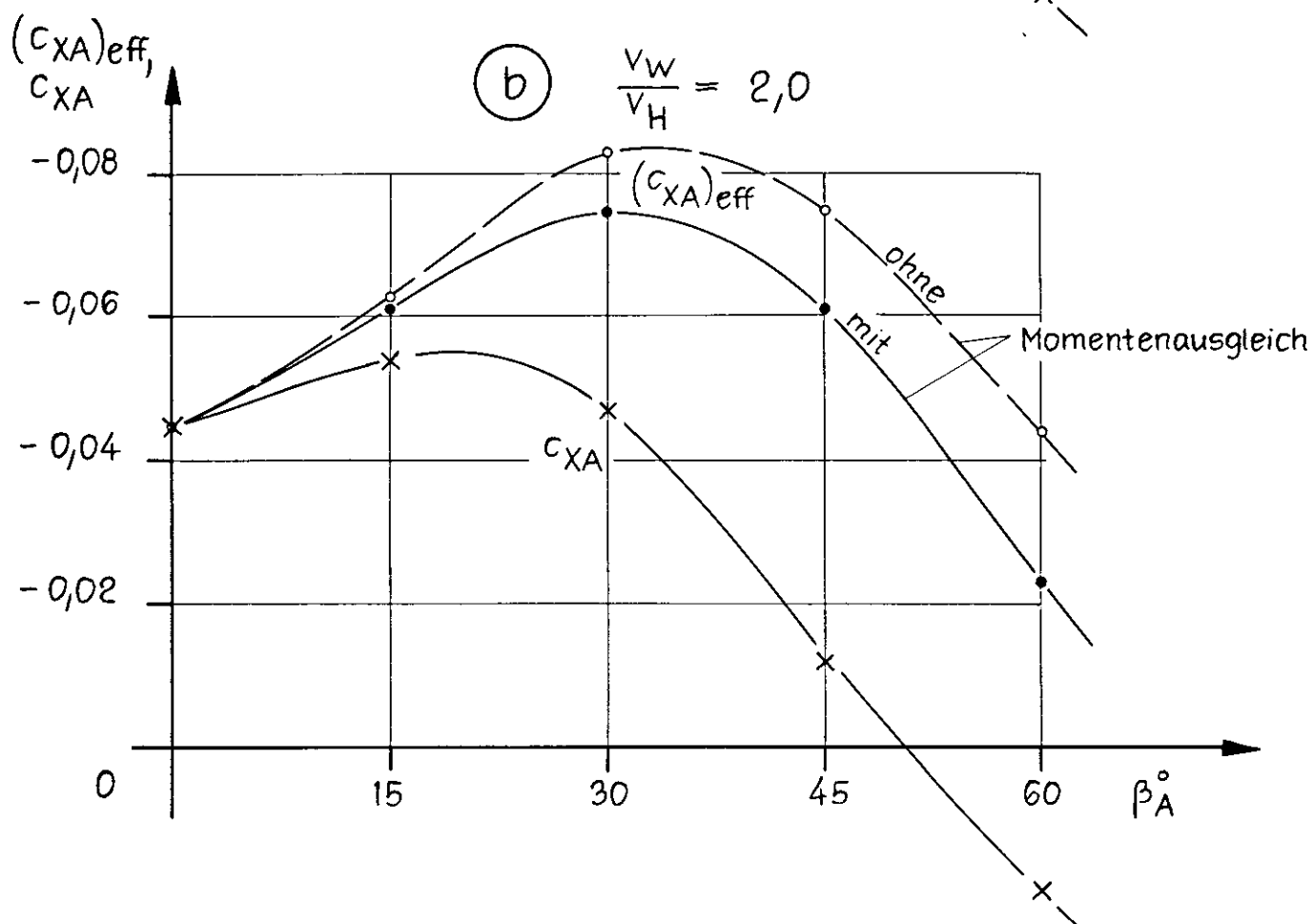
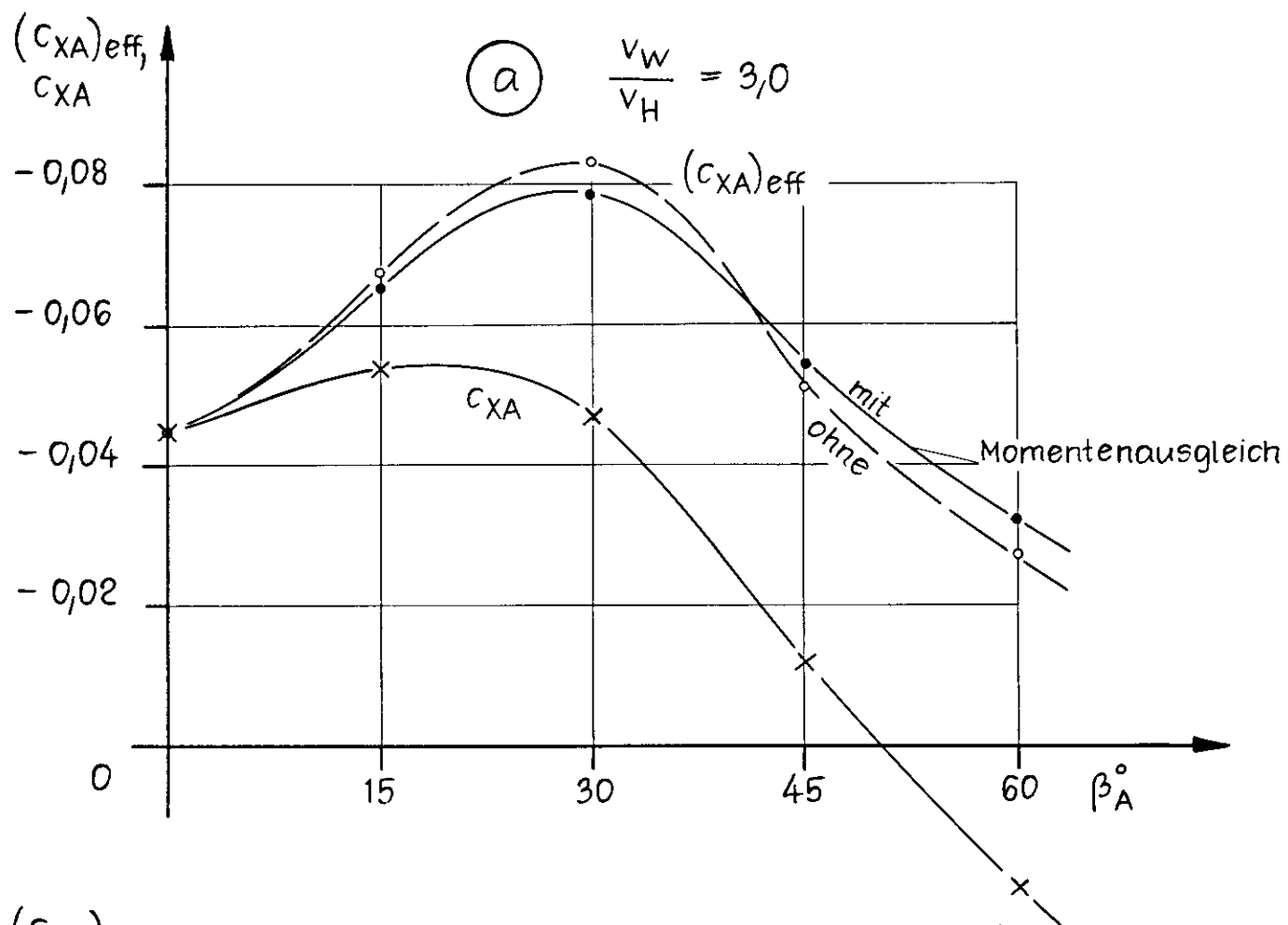


Abb.3



Ergebnisse für die „Wulstform“



Ergebnisse für die „Normalform“

