

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

KORREKTUR VON PROBEFAHRTSMESSUNGEN FÜR  
SEEGANGS- UND WINDEINFLUSS

P. BLUME

BERICHT NR. 328

MAI 1975

---

Korrektur von Probefahrtsmessungen für  
Seegangs- und Windeinfluß

1. Problemstellung
2. Widerstandsänderungen
  - 2.1 Windkräfte
  - 2.2 Seegangskräfte
  - 2.3 Driftwiderstand
  - 2.4 Widerstand infolge Gieren und Ruderlegen
  - 2.5 Korrektur für abweichende Wassertemperatur
  - 2.6 Korrektur für abweichendes Displacement
3. Berechnung der korrigierten Werte für Geschwindigkeit, Leistung und Drehzahl
4. Beispielrechnung
5. Erforderliche Eingabedaten
6. Zusammenfassung

## 1. Problemstellung

Auf der Probefahrt eines neuen Schiffes soll neben der Funktionserprobung dem Reeder auch nachgewiesen werden, daß das Schiff hinsichtlich Geschwindigkeit und Leistungsbedarf den Vertragsbedingungen entspricht. Im allgemeinen jedoch werden die Wetterbedingungen sowie der Beladungszustand während der Probefahrt von denen, bei denen die geforderten Leistungen erbracht werden sollen, abweichen. Damit müssen die gemessenen Werte korrigiert werden für den Wind- und Seegangseinfluß sowie für die eventuell abweichende Verdrängung.

Der Seegang versetzt das Schiff in oszillierende Bewegungen, die der mittleren Fahrgeschwindigkeit überlagert sind. Als Folge dieser Bewegungen und der damit im Zusammenhang stehenden Ruderbewegungen treten hydrodynamische Kräfte mit von Null verschiedenen Mittelwerten auf. Im folgenden sollen davon die mittlere Widerstandserhöhung und mittlere Querkraft durch Tauchen und Stampfen sowie die mittlere Widerstandserhöhung durch oszillierendes Ruderlegen und durch die Gierbewegung berücksichtigt werden.

Die resultierende Windkraft läßt sich ebenfalls in eine Längskraft und eine Querkraft aufteilen. Letztere hat im Verein mit der mittleren Querkraft aus dem Seegang einen Driftwinkel zur Folge, wodurch sich ebenfalls der Widerstand erhöht. Darüber hinaus ist der Reibungswiderstand noch abhängig von der Wassertemperatur. Kann man für diese Widerstandsänderungen brauchbare Lösungen angeben, so läßt sich eine Korrektur der gemessenen Werte auf die Werte unter Vertragsbedingungen durchführen.

## 2. Widerstandsänderungen

### 2.1 Windkräfte

Während der Probefahrt wird die Geschwindigkeit  $v_s$  und der Relativwinkel  $\alpha_s$  des scheinbaren Windes gemessen, in der Regel hoch über Deck. Ausgehend von diesen Größen sind die Geschwindigkeit  $v_w$  und die Richtung  $\alpha_w$  des wahren Windes bei der Fahrgeschwindigkeit  $v$  des Schiffes durch folgende Gleichungen gegeben.



$$\alpha_w = \frac{1}{2} \left( \pi + \alpha_s + 2 \arctan \left( \frac{v - v_s}{v + v_s} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_s}{2} \right) \right)$$

$$v_w = v_s \frac{\sin \alpha_s}{\sin \alpha_w}$$

Obwohl zur Berechnung der Windkräfte der scheinbare Wind benötigt wird, muß dieser Schritt über den wahren Wind gemacht werden, weil das Windprofil näherungsweise berücksichtigt werden soll. Zunächst wird die Windgeschwindigkeit in der Normhöhe 10 m berechnet nach einer Potenzformel aus [1]

$$v_w / v_{w10} = \left( h / 10 \text{ m} \right)^{0.1}$$

Damit ergibt sich die Windstärke nach der Beaufort-Skala zu

$$B_n = \left( \frac{v_{w10}}{0.836} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Wegen der quadratischen Abhängigkeit der Windkräfte von der Anströmgeschwindigkeit wird das Quadrat der Windgeschwindigkeit über die mittlere Höhe des Schiffes

$$h_m = 0.5 \left( A_L / L + A_{\square} / B \right)$$

gemittelt.

$$\bar{v}_w = v_{w10} \cdot h(h_m)$$
$$h^2(h_m) = \frac{1}{h_m} \int_0^{h_m} \left( \frac{v_w}{v_{w10}} \right)^2 dh = \frac{5}{6} \left( \frac{h_m}{10 \text{ m}} \right)^{\frac{1}{5}}$$

Mit dieser gemittelten Geschwindigkeit läßt sich eine neue mittlere Anströmgeschwindigkeit  $V_A$  und -richtung  $\alpha_A$  angeben.

$$V_A^2 = V^2 + \bar{V}_W^2 - 2 V \bar{V}_W \cos \mu_W \quad ; \quad \mu_W = \pi - \alpha_W$$

$$\mu_A = \arccos \left( \frac{\bar{V}_W^2 - V_A^2 - V^2}{2 V_A V} \right)$$

$$\alpha_A = \pi - \mu_A$$

Damit kann man über die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte, wie sie z.B. aus [2] und [3] entnommen werden können, die Längs- und Querkraft berechnen.

$$C_x = C_D(\alpha_A) \cos \alpha_A - C_L(\alpha_A) \sin \alpha_A$$

$$C_y = C_D(\alpha_A) \sin \alpha_A + C_L(\alpha_A) \cos \alpha_A$$

$$F_x = C_x \frac{\rho_A}{2} V_A^2 \cdot A_L$$

$$F_y = C_y \frac{\rho_A}{2} V_A^2 \cdot A_L$$

Die direkte Widerstandsänderung ist dann die Längskraftkomponente korrigiert um den Fahrtwindwiderstand.

$$R_W = F_x - C_D(0^\circ) \frac{\rho_A}{2} V^2 A_L$$

Die Querkraft führt zusammen mit einer Querkraft, die vom Seegang herrührt, zu einem Driftwinkel und damit auch zu einem zusätzlichen Widerstand, wie er unter 2.3 abgehandelt wird.

## 2.2 Seegangskräfte

Die Berechnung der mittleren Widerstandserhöhung im Seegang folgt dem in [4] beschriebenen Verfahren. In der Form einer Übertragungsfunktion werden zunächst die mittleren Widerstandsänderungen in regelmäßigen Wellen ausgehend von den Druckschwankungen auf der Außenhaut des Schiffes berechnet. Das Integral dieser Druckschwankungen hat eine in Richtung und Betrag schwankende Resultierende. Der mittlere Widerstand  $R_{Aw}$  in einer regelmäßigen Welle ist der

Mittelwert der der Fahrtrichtung entgegenwirkenden Komponente dieser Resultierenden.

Unterteilt man den Integrationsbereich in die im Mittel benetzte Oberfläche  $S_0$  und in die Schwankung der Benetzungsfläche  $S_1$  um die mittlere Wasserlinie, erhält man entsprechend zwei Widerstandsanteile  $R_{AW0}$  und  $R_{AW1}$ . Zu  $R_{AW0}$  liefert nur die im schiffsfesten System vertikale Druckkraftkomponente einen Beitrag, weil infolge der Stampfbewegung auch ihre Richtung im raumfesten System schwankt. Die resultierende vertikale Druckkraft läßt sich durch die mit ihr im Gleichgewicht stehende d'Alambert'sche Trägheitskraft im Massenmittelpunkt ausdrücken, die man aus der Bewegung des Massenmittelpunktes leicht bestimmen kann.

$$F_z(t) = m \ddot{z}_m(t) = -\omega_E^2 m z_{mA} \cos(\omega_E t + \varepsilon_{zm})$$

Mit der Stampfbewegung

$$\Theta(t) = \Theta_A \cos(\omega_E t + \varepsilon_\Theta)$$

erhält man als Mittelwert

$$R_{AW0} = \overline{F_z(t) \cdot \Theta(t)} = -\frac{1}{2} \omega_E^2 m z_{mA} \Theta_A \cos(\varepsilon_{zm} - \varepsilon_\Theta)$$

Der zweite wesentlich bedeutendere Anteil ist eine Korrektur dafür, daß für den ersten Anteil immer bis zur mittleren Wasserlinie integriert wird. Die Berücksichtigung der Druckkräfte in dem zeitweise benetzten Bereich führt ebenfalls zu einem Widerstandsanteil zweiter Ordnung, abhängig von der Relativbewegungsamplitude  $S_A(x)$  und dem Verlauf der Wasserlinienbreite  $B_{WL}(x)$ .

$$R_{AW1} = -\frac{1}{4} \rho g \int S_A^2(x) \frac{dB_{WL}(x)}{dx} dx$$

Zur Berechnung dieser beiden Anteile werden also nur die Bewegungen des Schiffes benötigt. Die Summe beider Anteile ergibt die mittlere Widerstandserhöhung in einer regelmäßigen Welle

$$R_{AW} = R_{AW0} + R_{AW1}$$

Man erhält die Form einer Übertragungsfunktion, indem man die Summe auf das Quadrat der Wellenamplitude bezieht.

$$Y_{RAW} = \frac{R_{AW}}{\zeta_A^2}$$

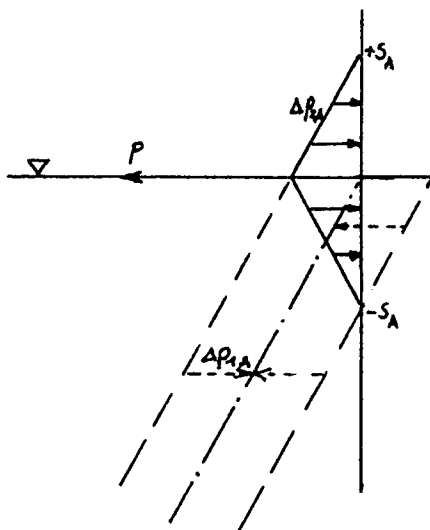
bzw. dimensionslos

$$S_{RAW} = \frac{R_{AW}}{\rho g B^2/L \zeta_A^2}$$

Dieses Rechenverfahren wurde durch Modellversuche überprüft [5]. Für Wellenlängen oberhalb  $\lambda/L \approx 0.8$ , d.h. wenn das Schiff wirklich Tauch- und Stampfbewegungen macht, gibt das Verfahren die gemessenen Werte gut wieder. Doch darunter liegen die aus den gemessenen Widerständen berechneten Übertragungsfunktionen der Widerstandserhöhung deutlich höher als die Rechenwerte, die für  $\lambda/L \rightarrow 0$  gegen 0 gehen. Eine Erklärung hierfür kann die nicht berücksichtigte Deformation der Welle durch das Schiff bei der Bestimmung der Relativbewegung liefern, die bei kürzeren Wellen immer stärker wird.

Setzt man als Grenzfall voraus, daß die Welle am sich bei kurzen Wellen nicht mehr bewegenden Vorschiff, ersetzt durch eine ebene Wand mit der Breite  $B$ , reflektiert wird und am Achterschiff keine Welle mehr vorhanden ist, läßt sich folgende Überlegung durchführen:

Die Relativbewegungsamplitude vorne ist bei totaler Reflexion doppelt so groß wie die Wellenamplitude, am Achterschiff ist sie 0. Es wird bei Annahme hydrostatischer Druckverteilung wieder bis zur Ruhewasserlinie



integriert und dann als Korrektur über den Bereich zeitweiliger Benetzung. Der erste Anteil

$$\Delta R_1 = B \int_{-T}^0 \Delta p_1 dz$$

hat keinen von 0 verschiedenen Mittelwert, weil nur  $\Delta p_1$  und damit auch  $\Delta R_1$  harmonisch schwankt (gestrichelte Verläufe der Druckänderungen).

Als Korrektur muß im Bereich der zeitweiligen Benetzung  $\Delta p_2$

angebracht werden. Dieser Druck weist immer in den Körper hinein, auch im Bereich  $0 \leq z \leq -S_A$ , weil beim ersten Anteil immer bis zur Ruhewasserlinie integriert wird (durchgezogener Druckverlauf).

Für diesen Anteil gilt

$$\begin{aligned} \Delta R_2(t) &= B \int_0^{s(t)} \Delta p_2(t) dz \\ &= \rho g B \int_0^{s(t)} (S(t) - z) dz \\ &= \frac{1}{2} \rho g B S(t)^2 \end{aligned}$$

Dieser Anteil hat einen von 0 verschiedenen Mittelwert.

$$R_{Aw} = \overline{\Delta R_2(t)} = \frac{1}{4} \rho g B S_A^2$$

Mit  $S_A = 2 \zeta_A$  erhält man für diesen Grenzfall die Übertragungsfunktion der mittleren Widerstandserhöhung

$$S_{RAw} = \frac{R_{Aw}}{\rho g B^2/L \zeta_A^2} = \frac{L}{B}$$

Die aus Modellversuchen ermittelten Übertragungsfunktionen für kurze Wellen erreichen nicht diesen Wert, doch liegen sie in der Größenordnung von der Hälfte, die Annahme totaler Reflektion der auf das Schiff treffenden Welle ist sicher übertrieben.

Doch in Anlehnung an diese Überlegung ist hier gegenüber [4] eine Deformation der Welle durch das Schiff eingeführt worden. Damit nimmt, auch wenn das Schiff sich nicht bewegt, die Amplitude der Relativbewegungen, die den oben genannten zweiten Widerstandsanteil  $R_{Aw}$  bestimmt, über die Schiffslänge ab, und man erhält auch für kurze Wellen nennenswerte Übertragungsfunktionen der Widerstandserhöhung, wie sie auch in Versuchen bestimmt werden. Bei der Berechnung der Relativbewegung wird die Welle am Schiff mit folgender Gleichung eingesetzt

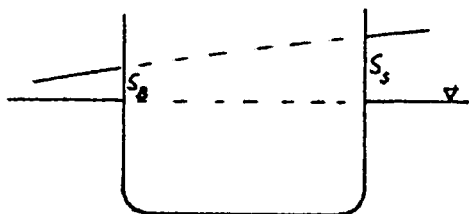
$$\zeta_s = \zeta \left( 1 + 0.7 \cos^2 \mu \frac{z}{L} e^{-\left(\frac{z}{L}\right)^2} \right) ; 30^\circ \leq \mu \leq 180^\circ$$

Die Wellenamplitude nimmt hiernach linear über die Schiffslänge ab, die e-Funktion bewirkt das Abklingen der Deformation mit wachsender Wellenlänge und die cos-Funktion das Abklingen mit von  $\mu = 180^\circ$  abweichender Begegnungsrichtung. Der Faktor 0.7 bedeutet eine weitere Abminderung gegenüber dem oben geschilderten Grenzfall. Da die Widerstandsänderung quadratisch von der Wellenamplitude ab-

hängt, bedeutet dieser Faktor eine Halbierung der Widerstandsänderung im Grenzfall.

Dieser Korrekturfaktor ist weitgehend Spekulation, doch bringt er die Rechenergebnisse für die Übertragungsfunktionen der mittleren Widerstandserhöhung mit den gemessenen Werten für von vorne kommende regelmäßige Wellen in annähernde Übereinstimmung. Für von hinten kommende Wellen wird auf eine entsprechende Korrektur verzichtet, weil dort die Verhältnisse noch unübersichtlicher sind wegen der Fallunterscheidung Schiff schneller als die Welle oder nicht und weil keine Versuchsergebnisse vorliegen, auf die man eine solche Korrektur stützen könnte.

Als Abschätzung der Querkraft des Seegangs wird die Querkomponente der Auftriebskraft bei Annahme ungestörter Druckverteilung in der Welle benutzt. Der Auftrieb wirkt dann senkrecht zu den Ebenen gleichen Drucks, die der Oberflächenkontur ähnlich sind. Für einen Querschnitt läßt sich näherungsweise schreiben:



$$dF_y/dx = \rho g \left( A_0 + \frac{1}{2} (S_B + S_S) B \right) \frac{S_S - S_B}{B} e^{-\alpha \frac{x}{2}}$$

$\alpha = 2\pi/\lambda$  Wellenzahl  
 $A_0$  Spantfläche bis Ruhe-WL  
 $S_B, S_S$  Relativbewegungen Backbord u. Steuerbord

$S_B$  und  $S_S$  sind Zeitfunktionen, damit hat wieder nur der Anteil Tauchungsänderung mal Neigung einen von 0 verschiedenen Mittelwert.

$$\overline{dF_y/dx} = \frac{1}{4} \rho g (S_{SA}^2 - S_{BA}^2) e^{-\alpha \frac{x}{2}}$$

Nach Integration über die Schiffslänge erhält man die Querkraft aus der regelmäßigen Welle, in Form einer Übertragungsfunktion geschrieben

$$Y_{F_y} = \frac{\overline{F_y}}{S_z^2}$$

Die mittlere Widerstandsänderung  $R_s$  und Querkraft  $F_{sy}$  in einem unregelmäßigen Seegang mit der mittleren Begegnungsrichtung  $\tilde{\mu}$  gewinnt man durch Integration des Produktes aus Seegangsspektrum und Übertragungsfunktion über den ganzen Frequenzbereich und alle Laufrichtungen.

$$R_s = 2 \int_0^{\infty} \int_{\tilde{\mu}-\frac{\pi}{2}}^{\tilde{\mu}+\frac{\pi}{2}} S_s(\omega, \mu) Y_{R_{sw}}(\omega, \mu) d\mu d\omega$$

$$F_{sy} = 2 \int_0^{\infty} \int_{\tilde{\mu}-\frac{\pi}{2}}^{\tilde{\mu}+\frac{\pi}{2}} S_s(\omega, \mu) Y_{F_y}(\omega, \mu) d\mu d\omega$$

Für das Seegangsspektrum  $S_s(\omega, \mu)$  wird ein zweiparametriges Einheitsspektrum multipliziert mit einer Richtungsverteilung  $f(\Delta\mu)$  benutzt.

$$S_s(\omega, \mu) = S(\omega) \cdot f(\mu - \tilde{\mu}) \quad -0.44 \left(\frac{2\pi}{T_1 \omega}\right)^4$$

$$S(\omega) = 0.11 \left(\frac{2\pi}{T_1}\right)^4 S_{w\frac{1}{3}}^2 \cdot \frac{1}{\omega^5} e$$

$$f(\mu - \tilde{\mu}) = \frac{8}{3\pi} \cos^4(\mu - \tilde{\mu})$$

Dabei ist die kennzeichnende Wellenhöhe  $S_{w\frac{1}{3}}$  mit der beobachteten Wellhöhe  $\tilde{S}_w$  und die geschätzte Periode  $\tilde{T}$  mit  $T_1$  gleichgesetzt worden.

$$S_{w\frac{1}{3}} \approx \tilde{S}_w$$

$$\tilde{T} \approx T_{-1} = 2\pi \frac{m_{-1}}{m_0}$$

$$T_1 = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \approx 0.3 \tilde{T}$$

Der mittlere Begegnungswinkel wird, falls keine andere Angabe vorliegt, durch die Richtung des wahren Windes bestimmt.

$$\tilde{\mu} = \mu_w = \pi - \alpha_w$$

Natürlich kann aber auch durch Vorgabe von  $\tilde{\mu}$  davon im Sonderfall abgewichen werden.

### 2.3 Driftwiderstand

Das Unterwasserschiff ist ein Tragflügel mit extrem kleinem Seitenverhältnis. Für dessen Auftrieb gilt bei kleinen Anstellwinkeln

$$L = \frac{\pi}{2} \beta \rho_{\frac{1}{2}} v^2 T^2$$

Wegen des als klein vorausgesetzten Driftwinkels kann diese Auftriebskraft der erzeugten Rumpfquerkraft gleichgesetzt werden. Diese wiederum muß gleich der Summe der Querkräfte aus Wind und Seegang sein, damit läßt sich der Driftwinkel  $\widehat{\beta}$  berechnen.

$$\widehat{\beta} = \frac{4 (F_{sy} + F_{wy})}{\pi \rho v^2 T^2}$$

Aus der Querkrafterzeugung durch das Unterwasserschiff resultiert ein induzierter Widerstand. Die Resultierende aus dem Auftrieb und dem induzierten Widerstand des Unterwasserschiffes kann bezogen auf die Schiffslängsachse sowohl eine positive wie negative Komponente haben [6]. Den Zusammenhang zwischen der Querkraft  $Y_H$  und der Widerstandsänderung des driftenden Schiffes  $R_\beta$  beschreibt Wagner in Anlehnung an die übliche Gleitzahl durch den Quotienten

$$\varepsilon_Y = \frac{R_\beta}{Y_H}$$

Für diesen Quotienten gibt Wagner in [6] aus der Auswertung von Schrägschleppversuchen z.B. für den Mariner an

$$\varepsilon_Y = 1.58 \widehat{\beta} - 6.85 \widehat{\beta}^2$$

Bei  $\widehat{\beta} \approx 0.23 \cong 13^\circ$  wechselt  $\varepsilon_Y$  das Vorzeichen, d.h. bei größeren Driftwinkeln kann die resultierende Längskraft zu einem zusätzlichen Schub werden. Allerdings darf diese Beziehung kaum über diesen Winkel hinaus benutzt werden, weil die Schrägschleppwinkel bei den ausgewerteten Versuchen auch nicht größer waren. Doch für die hier nur in Frage kommenden kleinen Driftwinkel ist mit der Querkrafterzeugung immer ein zusätzlicher Widerstand verbunden. Damit ist der Driftwiderstand gegeben durch

$$R_\beta = \varepsilon_Y (F_{sy} + F_{wy})$$

## 2.4 Widerstand infolge von Gieren und Ruderlegen

Im Seegang kann unter Umständen kein gerader Kurs mehr gesteuert werden, das Schiff giert um den gewünschten mittleren Kurs. Entsprechend dieser Gierbewegung muß das Ruder oszillierend bewegt werden. Mit beiden Erscheinungen ist wiederum ein zusätzlicher Widerstand verbunden.

Norrbin gibt für diese Fälle folgende Gleichungen an [7]:

Für den Zusatzwiderstand bei Gierbewegungen mit der Amplitude  $\widehat{\varphi}_A$  findet man dort

$$R_{\psi} = \frac{m L}{2} (1 + \chi''_{vr}) \frac{\overline{OP}}{L} \omega^2 \widehat{\varphi}_A^2$$

mit  $\chi''_{vr}$  Koeffizient der hydrodynamischen Masse der Längskraft infolge Zentrifugalbeschleunigung

$\frac{\overline{OP}}{L}$  Lage des Drehpunktes des Schiffes bezüglich Hauptspant

$\omega = \frac{2\pi}{\tau}$  Kreisfrequenz der Gierbewegung mit der Periode  $\tau$

Zur Bestimmung des Koeffizienten  $\chi''_{vr}$  gibt es wenig Messungen, Norrbin gibt für ihn den Bereich 0.2 - 0.5 an, er wird hier gewählt zu

$$\chi''_{vr} = 0.4$$

Die Lage des Drehpunktes für Drehbewegungen kleiner Amplituden liegt nahe am Vorschiff, je völliger das Schiff ist, je weiter vorn liegt er. Als Näherung wird dafür gewählt

$$\frac{\overline{OP}}{L} = 0.275 + 0.25 c_B$$

Eingesetzt erhält man

$$R_{\psi} = 1.4 g V L (0.275 + 0.25 c_B) \frac{2\pi^2}{\tau^2} \widehat{\varphi}_A^2$$

Die Gleichung für den Widerstand eines oszillierend gelegten Ruders lautet

$$R_{\delta} = \frac{\bar{\lambda}}{4} \left[ 1 + \frac{6}{\bar{\lambda}} + \frac{9}{\bar{\lambda}^2} \right] \frac{A_r}{L T} \frac{L/B}{6} F_n^2 \delta_A^2 \Delta$$

$$R_{\delta} = \frac{\rho}{24} \left[ \bar{\lambda} + 6 + \frac{9}{\bar{\lambda}} \right] A_r c_B V^2 \delta_A^2$$

mit  $\delta_A$  Amplitude des Ruderwinkels  
 $A_r$  Ruderfläche  
 $\bar{\lambda}$  effektives Seitenverhältnis

## 2.5 Korrektur für abweichende Wassertemperatur

Bei von der festgelegten Temperatur  $\bar{v}$  abweichenden Wassertemperatur  $v$  ändert sich die kinematische Zähigkeit und damit die Reynolds-Zahl. In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Reynolds-Zahlen werden die Reibungswiderstandsbeiwerte nach der ITTC 1957 - Reibungslinie und aus ihrer Differenz die Widerstandänderung gegenüber dem Vertragszustand berechnet.

$$R_v = (C_{Fv} - C_{F\bar{v}}) \frac{\rho}{2} v^2 S$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2}$$

---

## 2.6 Korrektur für abweichendes Displacement

Die Admiraltätsformel gibt unter der Voraussetzung, daß die Admiraltätskonstante  $C$  für das Schiff bei kleinen Tiefgangsabweichungen als von der Verdrängung unabhängig angesehen werden kann, den Zusammenhang zwischen Widerstand und Displacement an

$$R = \frac{\Delta^{2/3} v^2}{C}$$

d.h.  $R \sim \Delta^{2/3}$

Der Widerstand bei der gefahrenen Geschwindigkeit und dem vorhandenen Displacement  $\Delta$  ist nicht bekannt, kann aber über das Propellerfreifahrtendiagramm abgeschätzt werden. Dazu wird der Schubbeiwert  $k'_{T\Delta}$  des um die zusätzlichen Widerstände aus 2.1 bis 2.5 entlasteten Schiffes benötigt. Für den Widerstand bei dem Displacement  $\Delta$  unter idealen Bedingungen erhält man damit

$$R_{\Delta} = k'_{T\Delta} \rho n^2 D^4 (1 - t)$$

---

Für das Bezugsdeplacement  $\Delta_0$  gilt dann

$$R_{\Delta_0} = R_{\Delta} \cdot \left(\frac{\Delta_0}{\Delta}\right)^{2/3}$$

Da für diese Korrektur der Beiwert  $k_{T\Delta}'$  benötigt wird, wird diese Korrektur bei der Umrechnung auf den neuen Betriebspunkt in Abschnitt 3 durch Modifikation des Schubbeiwertes  $k_T'$  berücksichtigt.

### 3. Berechnung der korrigierten Werte für Geschwindigkeit, Leistung und Drehzahl

Die Summe der Widerstände aus Abschnitt 2.1 bis 2.5 gibt die gesamte Widerstandsänderung gegenüber dem Widerstand bei idealen Umweltbedingungen und bei dem vorhandenen Displacement sowie der gemessenen Geschwindigkeit an.

$$\Delta R_T = R_w + R_s + R_B + R_\psi + R_\delta + R_j$$

Die Umrechnung erfolgt nun über das Propellerfreifahrt-diagramm. Nachstromziffer  $w$  und Sogziffer  $t$  müssen bekannt sein oder abgeschätzt werden, sie sollen für diese Rechnung außerdem als konstant angesehen werden. Damit läßt sich über die gemessenen Werte die Fortschrittsziffer  $J_1$  für den Ausgangszustand angeben.

$$J_1 = \frac{V_1 (1-w)}{n_1 D}$$

Aus dem Freifahrt-diagramm erhält man dann  $k_{T_1}$  und  $K_{Q_1}$ . Bringt man nun die Widerstandsänderung in die Form des Schubbeiwertes und zieht diesen von  $k_{T_1}$  ab, erhält man einen Punkt  $k'_{T_\Delta}$  der  $k_{T_s}$ -Kurve des Schiffes unter Vertragsbedingungen bei unveränderter Drehzahl, Geschwindigkeit und Verdrängung.

$$\Delta k_T = \frac{\Delta R_T}{\rho (1-t) n_1^2 D^4}$$

$$k'_{T_\Delta} = k_{T_1} - \Delta k_T$$

Zur Berücksichtigung des eventuell abweichenden Displacements muß dieser Schubbeiwert proportional zu  $\left(\frac{\Delta_0}{\Delta}\right)^{2/3}$  geändert werden.

$$k'_{T_{\Delta_0}} = k'_{T_\Delta} \cdot \left(\frac{\Delta_0}{\Delta}\right)^{2/3}$$

Dieser Punkt ist aber kein Punkt, der auf der  $k_T$ -Linie des Propellers liegt. Es muß ein neuer Gleichgewichtspunkt gesucht werden, nämlich der Schnittpunkt der Kennlinien von Propeller und Schiff.

Für die Kennlinie des Schiffes läßt sich schreiben

$$K_{T_s} = \frac{R}{(1-t) \rho n^2 D^4} = \frac{R}{v^2} \frac{V_A^2}{(1-w)^2 (1-t) \rho n^2 D^4}$$

$$= \frac{R}{v^2} \frac{1}{(1-w)^2 (1-t) \rho D^2} J^2$$

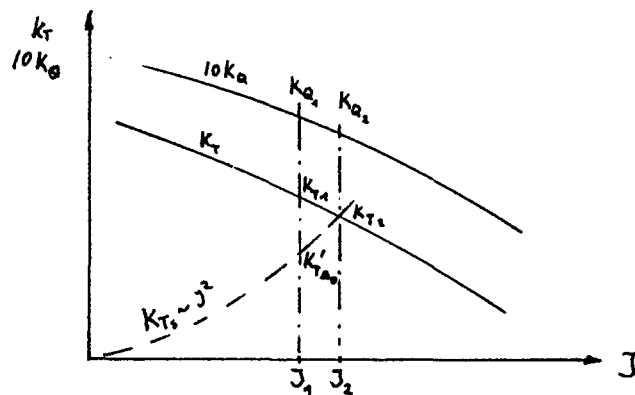
In dem betrachteten Geschwindigkeitsbereich sollen die Änderung der Widerstandsbeiwerte vernachlässigbar sein, damit ist  $R/v^2$  konstant. Ebenso ist bei konstanten  $w$  und  $t$  der zweite Faktor eine Konstante. Also gilt

$$K_{T_s} \sim J^2$$

und für das Schiff unter Vertragsbedingungen

$$K_{T_s} = \frac{K_{T_{D0}}}{J_1^2} J^2$$

Der neue Betriebspunkt mit  $K_{T_2}$  und  $J_2$  ergibt sich als Schnittpunkt dieser Kurve mit der  $K_T$ -Kurve des Propellers.



Zur Bestimmung der gesuchten Werte für Leistung, Drehzahl und Geschwindigkeit sind noch weitere Beziehungen notwendig, die das Zusammenwirken mit der Maschine sicherstellen. Der einfachste Fall ist, daß die Drehzahl  $n_2$  gleich der Maximaldrehzahl ist.

$$n_2 = n_{max}$$

Dann ist zu überprüfen, ob das Moment

$$Q_2 = K_{a_2} \rho n_{max}^2 D^5$$

nicht größer ist als das vom Antrieb zur Verfügung gestellte Moment bei dieser Drehzahl und gleichem Füllungsgrad bzw. gleicher Stellung des Fahrventils wie während der Messung.

Der Füllungsgrad  $f$  wird bestimmt aus der Kennlinie  $Q_{max} = f(n)$  des Antriebs und der gemessenen Leistung  $P_1$ , wobei die Kennlinie natürlich auf denselben Punkt wie die Messung bezogen sein muß.

$$f = \frac{P_1}{2\pi n_1 Q_{max}(n_1)}$$

Weitere zu berücksichtigende Wirkungsgrade wie den der Wellenleitung oder der Gütegrad der Anordnung  $\eta_R$  werden durch das Verhältniss

$$q = \frac{2\pi K_{Q_1} s n_1^3 D^5}{P_1}$$

bestimmt. Es muß also erfüllt sein

$$K_{Q_1} s n_{max}^3 D^5 \leq Q_{max}(n_{max}) \cdot f \cdot q$$

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, muß die Drehzahl aus der folgenden Gleichung bestimmt werden.

$$K_{Q_1} s n_2^3 D^5 = Q_{max}(n_2) \cdot f \cdot q$$

Nach Errechnung der Drehzahl lassen sich Geschwindigkeit und Leistung sofort angeben.

$$V_2 = \frac{J_2 n_2 D}{(1 - w)}$$

$$P_2 = 2\pi K_{Q_2} s n_2^3 D^5 \cdot \frac{1}{q}$$

#### 4. Beispielrechnung

Für die Beispielrechnung fiel die Wahl auf eine Serie von Großtankern der 250 000 tdw-Klasse. Dafür spricht, daß hier von einer größeren Zahl von Schiffen, die hinsichtlich dieser Untersuchung praktisch gleichartig sind, Daten von Probefahrten vorliegen, die unter Bedingungen gewonnen wurden, die von idealem Wetter bis zu recht schlechtem Wetter reichten. Andererseits sind diese Schiffe wegen ihrer Größe nicht so gut geeignet, weil die Seegänge relativ zur Schiffsgröße doch klein bleiben.

Die Abbildungen 1 bis 6 geben die zugrundegelegten Eigenschaften des Schiffes wieder. In Abbildung 1 wird das benutzte Propellerfreifahrtendiagramm gezeigt, Abbildung 2 enthält die auf die Überwasserlateralfäche bezogenen Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte des Überwasserschiffes in Ballast und auf vollem Tiefgang, wie sie aus [3] entnommen worden sind.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen für beide Ladefälle die berechneten Übertragungsfunktionen der Tauch- und Stampfbewegungen als Funktion der Wellenlänge. Der Parameter an den Kurven ist der Begegnungswinkel  $\mu$ , dabei bedeutet  $\mu = 0^\circ$  Wellen von hinten kommend. Zur Berechnung wurden Mittelwerte der für die beiden Ladefälle tatsächlich gefahrenen Tiefgänge eingesetzt. Im folgenden wird der große Tiefgang Freibord-Tiefgang und der kleine Ballast-Tiefgang genannt.

Die Übertragungsfunktionen der Bewegungen werden benötigt zur Berechnung der Übertragungsfunktionen der mittleren Widerstandserhöhung, die in Abbildung 5 und 6 ebenfalls als Funktion der Wellenlänge aufgetragen worden sind. Hier treten deutliche Unterschiede zwischen den beiden Ladefällen auf, in Ballast sind die Spitzen der Übertragungsfunktionen wesentlich niedriger als auf Freibord-Tiefgang. Dies ist eine Folge der kleineren Bewegungen, wie auch aus dem Vergleich von Abbildung 3 und 4 zu entnehmen ist.

Doch für die erzielten Ergebnisse spielt dieser Unterschied keine große Rolle, weil so lange Wellen um  $\lambda/L = 1$  in den angetroffenen Seegängen kaum vorkommen außer bei einem Schiff, das auf eine Dünung traf. Viel entscheidender ist wegen der Größe dieser Schiffe der untere Wellenlängenbereich. Dort bewegen sich die Schiffe nicht oder kaum, so daß die Übertragungsfunktion  $\mathcal{R}_{RW}$  nur durch die Form der Wasserlinie und die Deformation der Welle durch das Schiff bestimmt wird. Unter Berücksichtigung der vorn gezeigten Gleichung für diese Deformation erhält man die gestrichelten Kurven für die Übertragungsfunktion der Widerstandserhöhung.

Diese Übertragungsfunktionen wurden für beide Ladefälle bei je drei Geschwindigkeiten berechnet, dazwischen wurden die Werte für die jeweils aktuelle Geschwindigkeit linear interpoliert. Dargestellt sind sowohl bei den Bewegungen wie auch bei der Widerstandserhöhung nur die Kurven für die höchste der drei Geschwindigkeiten, doch ist im berechneten Bereich bis 12 kn der Geschwindigkeitseinfluß nur gering.

Die Meßergebnisse von 10 Schiffen wurden nach dem geschilderten Verfahren korrigiert. Das Schiff 1 wurde als Bezugsschiff gewählt, weil die Probefahrt unter idealen Bedingungen stattfand. Hinsichtlich des Displacements wurden die Ergebnisse aller anderen Schiffe auf das Displacement dieses Schiffes korrigiert.

Die Umweltbedingungen, wie sie aus den Protokollen zu entnehmen sind, und die nach diesen Angaben gewählten Werte für die kennzeichnende Wellenhöhe  $\tilde{\xi}_w$  und Periode  $\tilde{T}$  sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Gerade diese Größen, die den Seegangswiderstand entscheidend bestimmen, sind aus den Angaben für den einzelnen Probelauf nur ungenau zu rekonstruieren. Bei einer späteren Anwendung müssen diese Werte für jeden Lauf direkt bestimmt werden durch Auszählen und Stoppen mehrerer Perioden und mehrfaches Schätzen der Wellenhöhe.

Die Tabelle 2 enthält neben dem Tiefgang mittschiffs  $T_m$ , dem Trimm  $\Delta T$  und dem Displacement  $\Delta$  bei der Probefahrt die Mittelwerte für Leistung, Drehzahl und Geschwindigkeit über alle Probeläufe bei voller Leistung für alle Schiffe. Dabei besteht die erste Gruppe aus den gemittelten Meßwerten, die zweite aus den Mittelwerten der korrigierten Betriebspunkte.

Die folgenden Abbildungen 7 bis 10 sollen einen Eindruck von den Auswirkungen dieses Korrekturverfahrens vermitteln. In den Abbildungen 7 und 9 sind für die beiden Ladefälle die gemessenen Ausgangswerte und in 8 und 10 die korrigierten Werte Leistung über Geschwindigkeit als 'Sternenhimmel' eingetragen. Als Bezugskurve ist in allen Diagrammen die unter idealen Bedingungen gemessene Kurve von Schiff 1 eingezeichnet. Die Streuung dieser Punkte aller ausgewerteten Einzelfahrten verringert sich nur auf dem Ballast-Tiefgang, doch liegen die Werte für den Freibord-Tiefgang schon vor der Korrektur relativ dichter zusammen. Aber in beiden Fällen rücken die Punkte zu höheren Geschwindigkeiten als Folge der Entlastung.

Sieht man einmal von Schiff 3 und Schiff 6 ab, so erscheint die Übereinstimmung zufriedenstellend unter Berücksichtigung der Tatsache, daß der Seegangszustand nur grob geschätzt werden konnte. Auf Freibord-Tiefgang liegt der Mittelwert der korrigierten Geschwindigkeit für alle Schiffe außer Nr. 3 etwas höher als der von Schiff 1. Dies läßt sich mit dem relativ großen Trimm von Schiff 1 begründen, es erfolgte nur eine Korrektur für abweichende Verdrängung, aber nicht für den Trimm. Schiff 3 zeigt gegenüber den übrigen Schiffen bei praktisch gleicher Leistung eine relativ hohe gemessene Drehzahl. Innerhalb des Korrekturverfahrens ist die Berücksichtigung einer Maximaldrehzahl vorgesehen, die hier mit 82 U/min eingegeben ist. Diese Grenze wird in allen Fällen maßgebend, so daß sich für die korrigierten Werte diese Drehzahl mit relativ geringer Leistung ergibt. Ohne diese Drehzahlbegrenzung erreicht das Schiff auch über 16 kn.

Im Ballastfall ordnen sich die Geschwindigkeiten ebenfalls entsprechend dem Trimm an mit Ausnahme von Schiff 6. Schiff 3 fällt dabei auch wieder durch eine kleine Geschwindigkeit auf. Dieses Ergebnis läßt sich vielleicht auf den sehr großen Trimm und auch auf die relativ geringe Verdrängung während der Probefahrt zurückführen. Damit wird die Korrektur auf die über 20 % größere Bezugsverdrängung von Schiff 1 auch unzuverlässiger.

Ein schwieriger Fall ist das Schiff 6, für das als einziges Schiff neben Schiff 1 Meßwerte für einen größeren Leistungsbereich vorliegen. Dem Protokoll ist zu entnehmen, daß hoher Schwell aus einer von der Windrichtung abweichenden Richtung lief. Darauf ist die Schätzung der Parameter des Seegangsspektrums abgestimmt. Die Meßwerte und die Ergebnisse der Korrektur sind in den Abbildungen 11 und 12 dargestellt. Sowohl bei den Meßpunkten wie auch bei den korrigierten Werten sind die bei gleicher Stellung des Fahrventils gewonnenen Ergebnisse untereinander verbunden. Die Meßwerte zeigen deutliche Unterschiede für die beiden gefahrenen Kurse, auf Nordkurs, für den der Schwell schräg von vorne mit  $\tilde{\mu} \approx 120^\circ$  kam, ist die erreichte Geschwindigkeit wesentlich geringer. Diese Differenz konnte durch die Korrektur für den Freibord-Tiefgang beseitigt werden, doch auf Ballast-Tiefgang bleibt sie bestehen, allerdings nur belegt durch einen Punkt. Hier scheint außerdem auch für den Südkurs die berechnete Entlastung zu gering, denn das Schiff müßte eigentlich eine etwas höhere Geschwindigkeit erreichen als Schiff 1, weil es nicht vertrimmt ist. Hier spielt sicher die nicht berücksichtigte, während der Probefahrt zunehmende Windsee eine große Rolle, denn während der Fahrten nahm der Wind von  $\beta_n = 3$  bis auf  $\beta_n = 7 - 8$  zu. An den Versuchen mit voll geöffnetem Fahrventil ist dies gut zu erkennen, die schlechteren Ergebnisse wurden auch zu immer späterer Tageszeit gewonnen. Diesem Umstand könnte man Rechnung tragen durch Überlagerung zweier Seegangsspektren mit verschiedenen mittleren

Laufrichtungen. Das ist hier aber nicht geschehen, mangels genauerer Angaben wurde der Seegangszustand für alle Läufe gleich angesetzt. So kann die Korrektur natürlich auch die Differenzen nicht beseitigen, weil die Änderung der Umwelt zwischen den einzelnen Läufen nur bei der Berechnung der Windkräfte eingegangen ist, denn dort wird die bei jedem Lauf gemessene aktuelle Windgeschwindigkeit benutzt.

## 5. Erforderliche Eingabedaten

Hauptabmessungen des Schiffes  $L, B, T$   
Verdrängung und -schwerpunktslage  $V, x_s$   
Bezugsverdrängung  $V_0$   
Benetzte Oberfläche  $S$   
Überwasserhauptspant- und -lateralfläche  $A_M, A_L$   
Ruderfläche und ihr effektives Seiten verhältnis  $A_r, \bar{A}$   
Propelleranzahl und Durchmesser  $D$   
Sogziffer  $t$  und Nachstromziffer  $w$   
Propellerfreifahrttdiagramm  $K_T$  und  $K_Q = f(J)$   
Antriebscharakteristik durch die Kurve Moment über  
Drehzahl  $Q_{max} = f(n)$  mit Maximaldrehzahl  
Widerstands- und Auftriebsbeiwerte des Überwasserschiffes  
als Funktion des Anströmwinkels  $c_D$  und  $c_L = f(\alpha)$   
Übertragungsfunktionen für Tauchen und Stampfen  $Y_{rs}$  und  $Y_{\theta \times 5}$ ,  
bei Umrechnung mehrerer Fahrten für mindestens zwei  
Geschwindigkeiten, die den benötigten Bereich abdecken

## 6. Zusammenfassung

Nach der vorgeschlagenen Methode lassen sich Meßwerte, die auf einer Probefahrt unter vorgefundenen Umweltbedingungen gewonnen wurden, auf die entsprechenden Werte unter Vertragsbedingungen umrechnen. Es werden mehrere Widerstandsänderungen, in der Regel -erhöhungen, für die vorgefundenen Umweltbedingungen berechnet und nach Entlastung des Schiffes über das Propellerfreifahrttdiagramm die korrigierten Betriebswerte gefunden.

Zur Berechnung der Widerstandserhöhung im Seegang müssen die Übertragungsfunktionen des Schiffes für Tauchen und Stampfen bekannt sein. In ihrer Berechnung liegt der größte Aufwand des Verfahrens.

Die Beispielrechnung zeigt zufriedenstellende Ergebnisse unter Berücksichtigung der Tatsache, daß der Seegangszustand aus den vorhandenen Angaben nur unsicher rekonstruiert werden kann. Bei späterer routinemäßigen Anwendung des Verfahrens muß gerade hier eine Verbesserung ansetzen, indem der angetroffene Seegangszustand durch Schätzen und Messen von mittlerer Höhe und Periode genauer beschrieben wird.

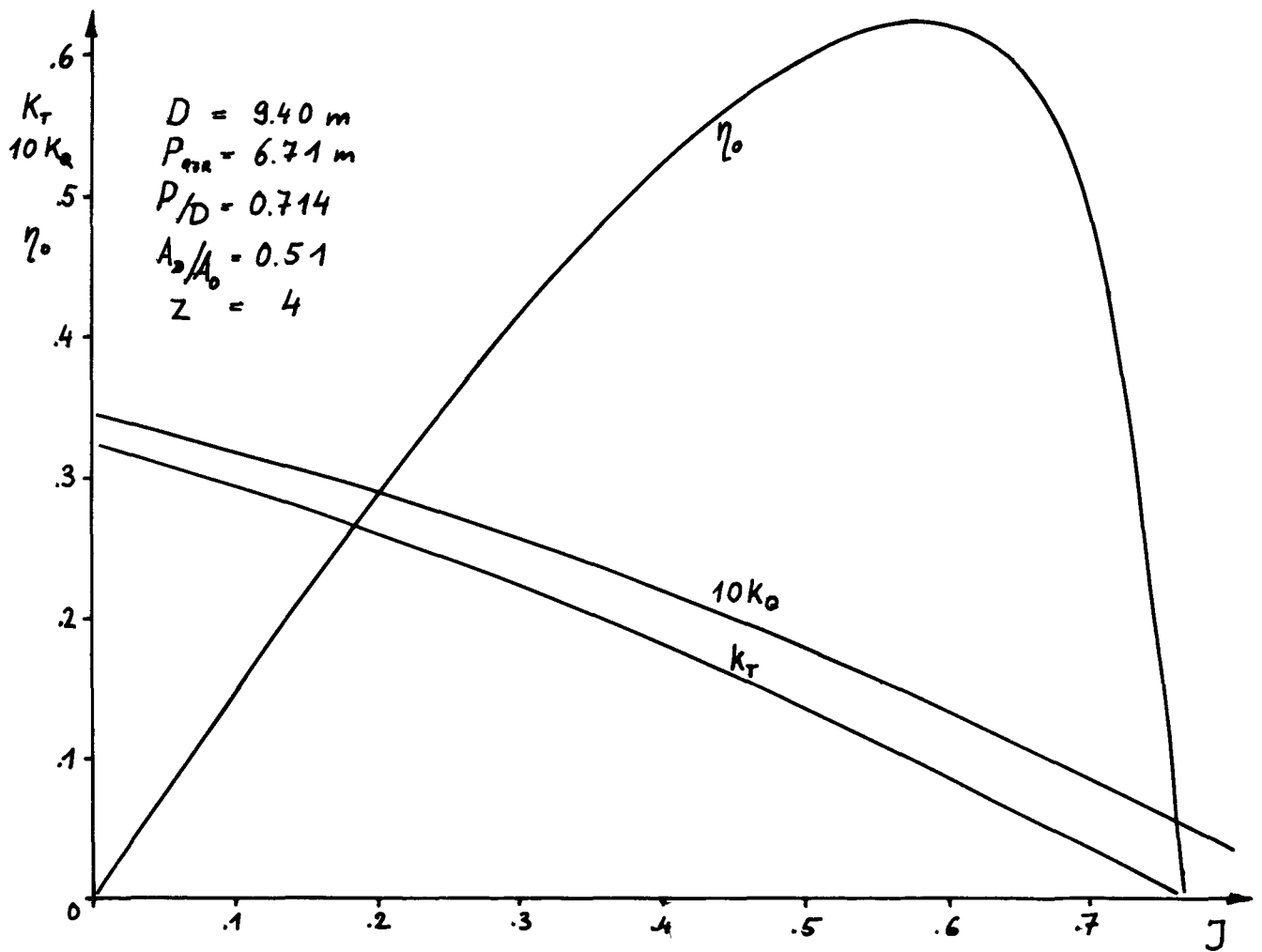


Abb. 1 Propellerfreifahrtprogramm

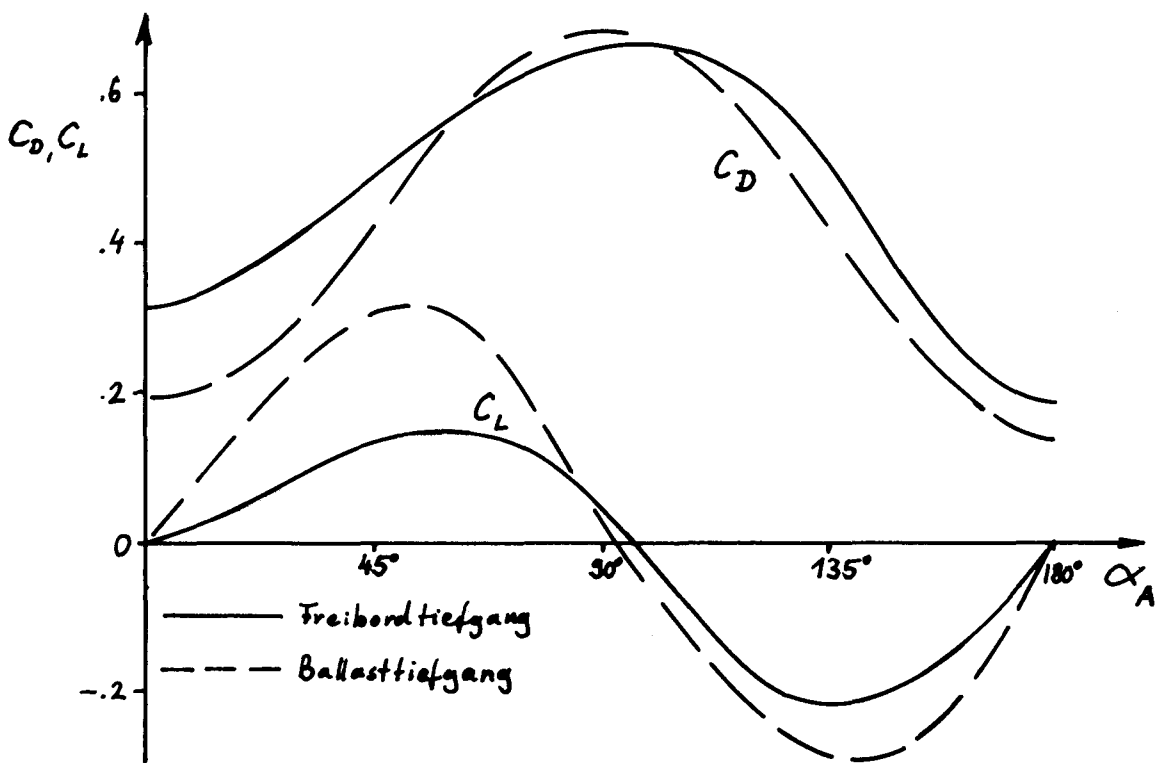


Abb. 2 Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte des Überwasserschiffes

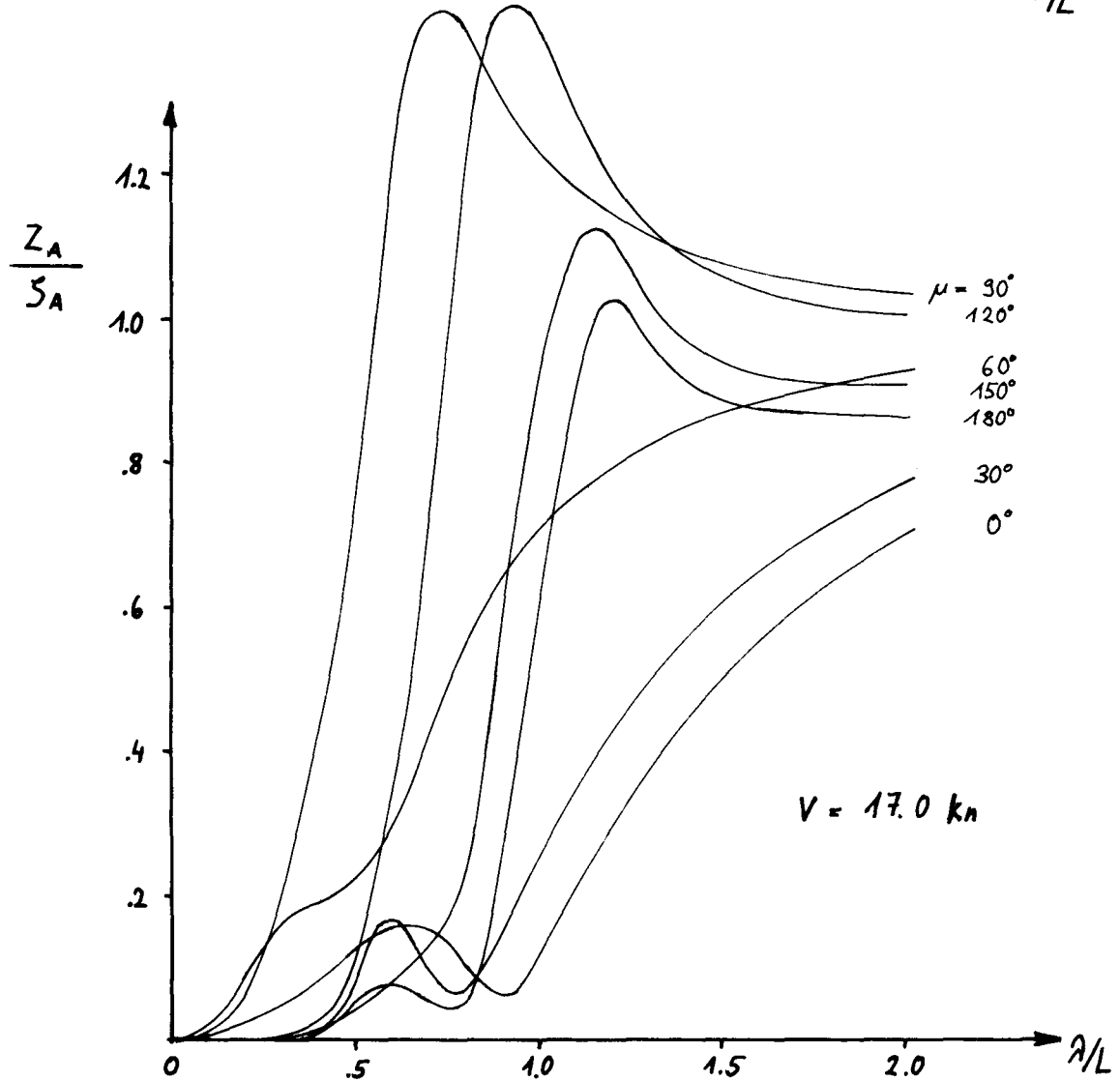
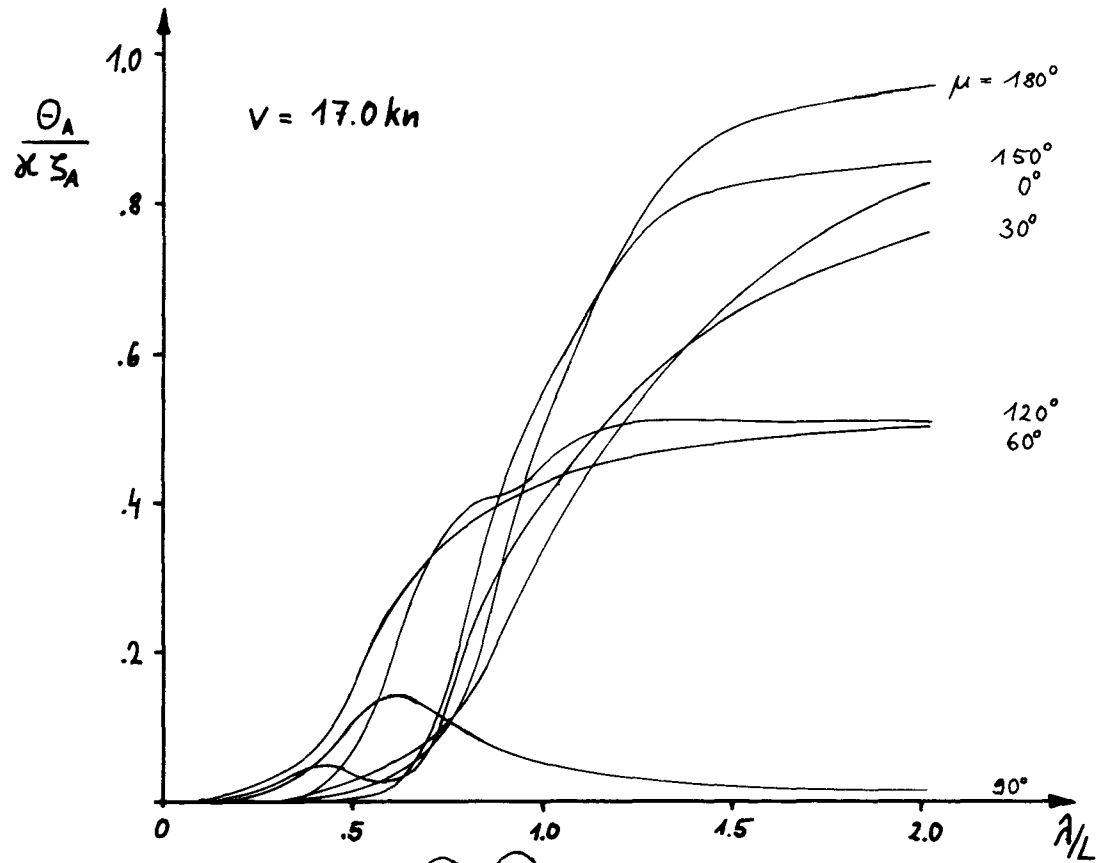


Abb. 3 Übertragungsfunktionen der Stampf- und Tauchbewegung auf Freibord-Tiefgang

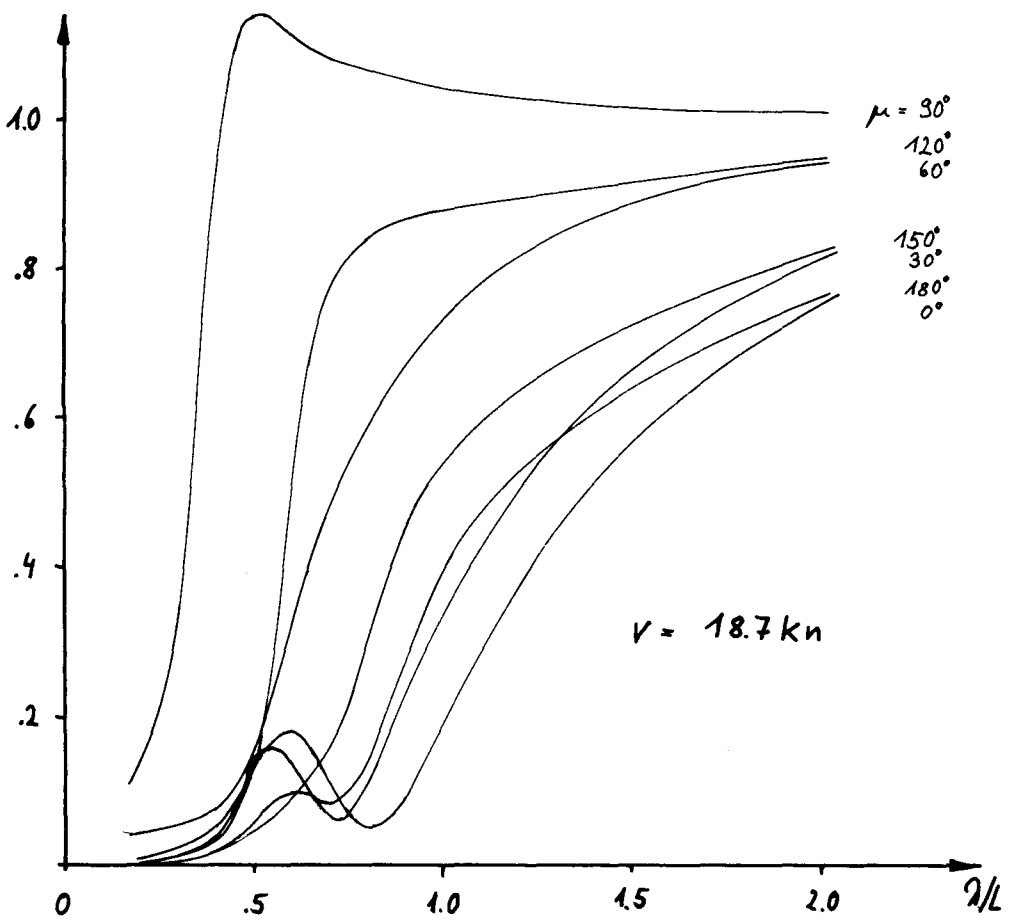
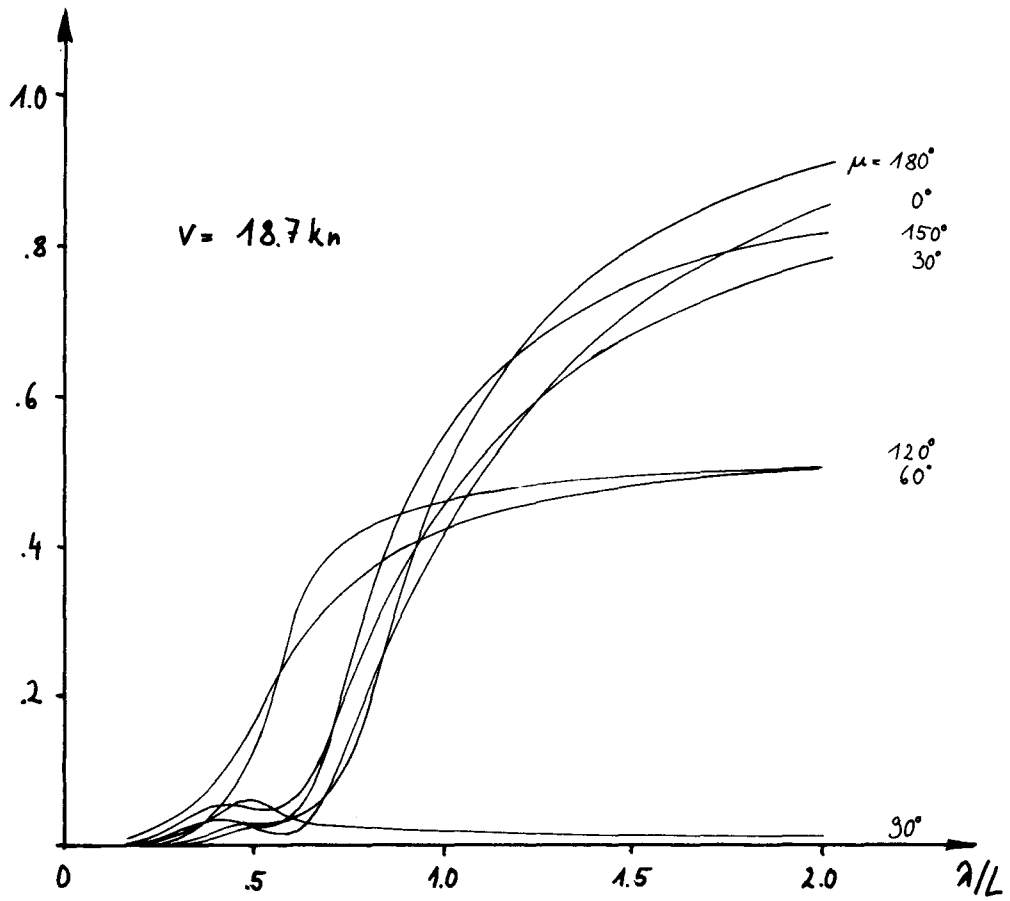


Abb 4 Übertragungsfunktionen der Stampf- und Tauchbewegung auf Ballast-Tiefgang

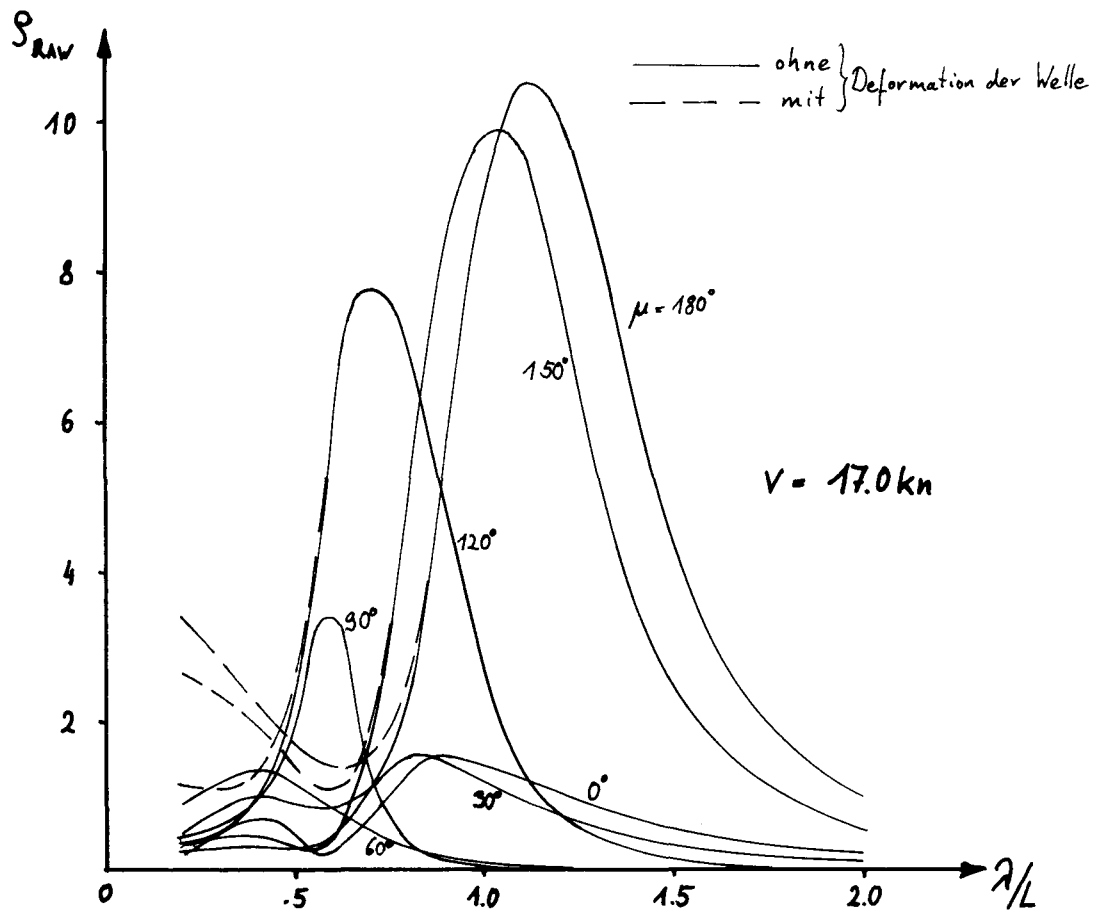


Abb. 5 Übertragungsfunktionen für die Widerstandserhöhung auf Freibord-Tiefgang

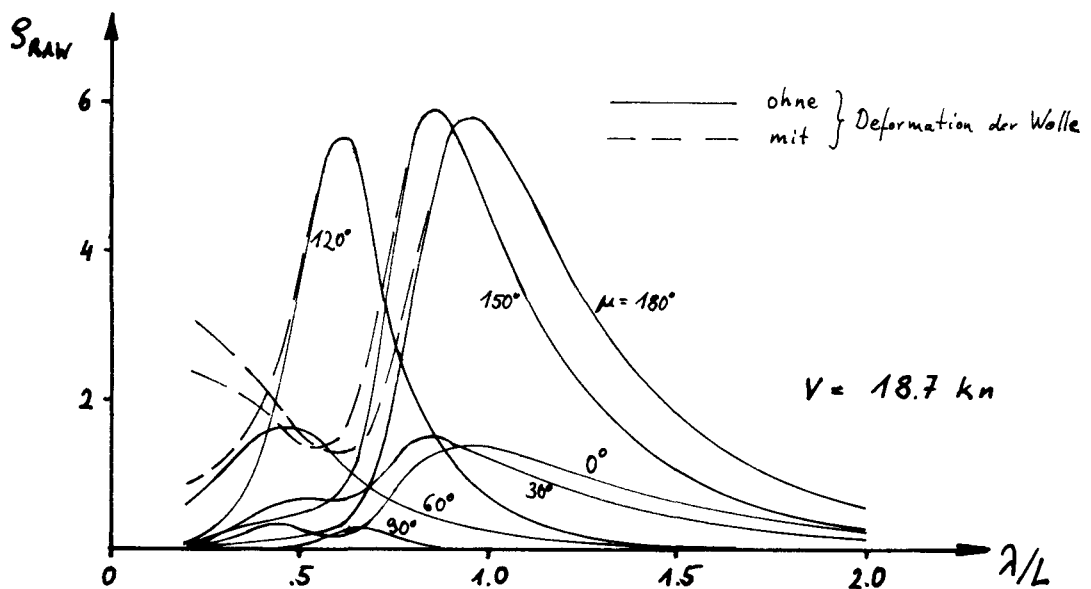


Abb. 6 Übertragungsfunktionen für die Widerstandserhöhung auf Ballast-Tiefgang

<u>Schiffsdaten</u>	$L_{pp} = 329.00 \text{ m}$	$B = 51.80 \text{ m}$
	$T_{cm} = 19.95 \text{ m}$	$H = 25.60 \text{ m}$
	$P_D = 31550 \text{ PS}$	$n = 80 \text{ U/min}$

### Sommer freibord - Tiefgang

Schiff Nr.	Windstärke	Seegang	$\tilde{\xi}_w [\text{m}]$	$\tilde{T} [\text{s}]$
1	1-2	—	—	—
2	6-7	rauh	3.0	7.5
3	5	mäßig, zunehmend rauh	2.8	7.2
4	5-6	mäßig	2.0	7.0
5	5-6	mäßig	2.0	7.0
6	6-4	rauh + Schwell	4.5	14.0
7	6	mäßig	2.0	7.0

### Ballast - Tiefgang

Schiff Nr.	Windstärke	Seegang	$\tilde{\xi}_w [\text{m}]$	$\tilde{T} [\text{s}]$
1	1-2	—	—	—
3	6	sehr rauh	4.2	8.0
6	3 bis 7-8	rauh + Schwell	5.0	14.0
8	4-5	schwach	1.6	6.5
9	5	mäßig	2.25	7.0
10	5-6 bis 7-8	mäßig, zunehmend rauh	2.2	7.0
11	6	sehr rauh	4.2	8.0

Tab. 1 Seegangszustand und Windstärke bei den Probe fahrten

Freibord-Tiefgang

Schiff Nr.	$T_m$ [m]	$\Delta T$ [m]	$\Delta$ [Mp]	Meßwerte		Korrigierte Werte			
				$v$ [kn]	$n$ [U/min]	$P_0$ [PS]	$v$ [kn]	$n$ [U/min]	$P_0$ [PS]
1	19.05	.66	277000	16.27	81.1	32333	-	-	-
2	20.05	.29	292760	15.69	81.5	32370	16.50	81.8	32045
3	20.06	.04	292950	15.34	82.6	32058	15.78	82.0	30850
4	19.96	0	291600	15.73	80.4	32705	16.55	81.0	32693
5	19.96	0	291600	15.86	80.3	32630	16.73	81.5	32612
6	19.96	0	291600	15.72	79.4	32903	16.82	80.2	32893
7	19.10	.20	277200	15.91	80.5	31625	16.36	80.9	31617

Ballast-Tiefgang

Schiff Nr.	$T_m$ [m]	$\Delta T$ [m]	$\Delta$ [Mp]	Meßwerte		Korrigierte Werte			
				$v$ [kn]	$n$ [U/min]	$P_0$ [PS]	$v$ [kn]	$n$ [U/min]	$P_0$ [PS]
1	10.24	1.17	141900	17.64	80.7	31973	-	-	-
3	8.79	4.94	118130	15.40	81.5	32590	15.34	81.7	32875
6	10.97	0	153400	15.81	78.3	32585	17.01	79.1	32587
8	9.53	2.87	131250	17.38	81.5	32388	17.16	81.4	32393
9	9.60	2.93	131365	17.22	82.6	32365	17.16	81.5	31517
10	10.25	1.26	141715	16.75	80.3	32063	17.49	80.8	32048
11	10.28	1.38	142200	16.00	79.8	32133	17.21	80.7	32115

Tab. 2 Tiefgang, Trimm, Verdrängung und Mittelwerte für Leistung, Drehzahl und Geschwindigkeit bei voller Leistung

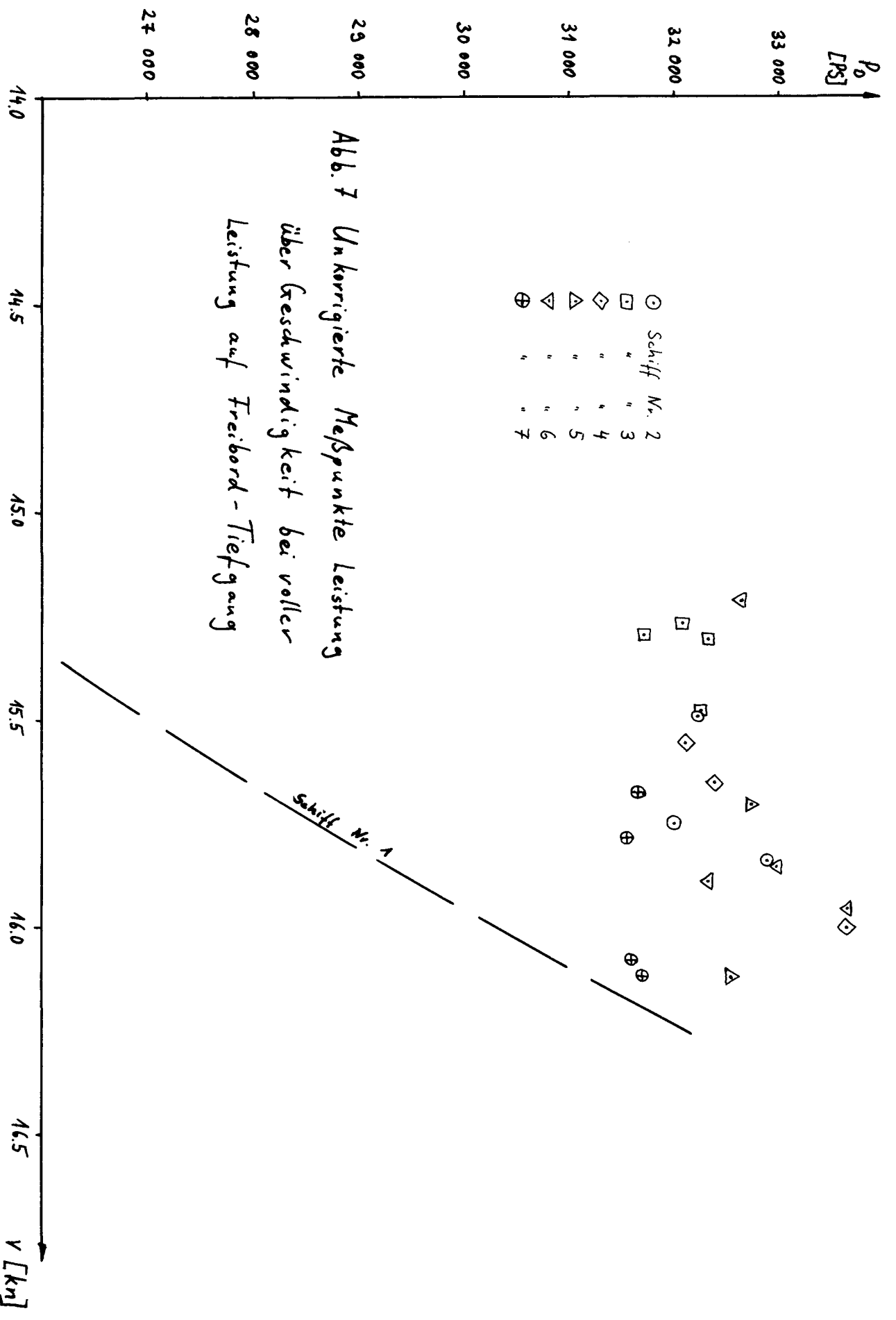
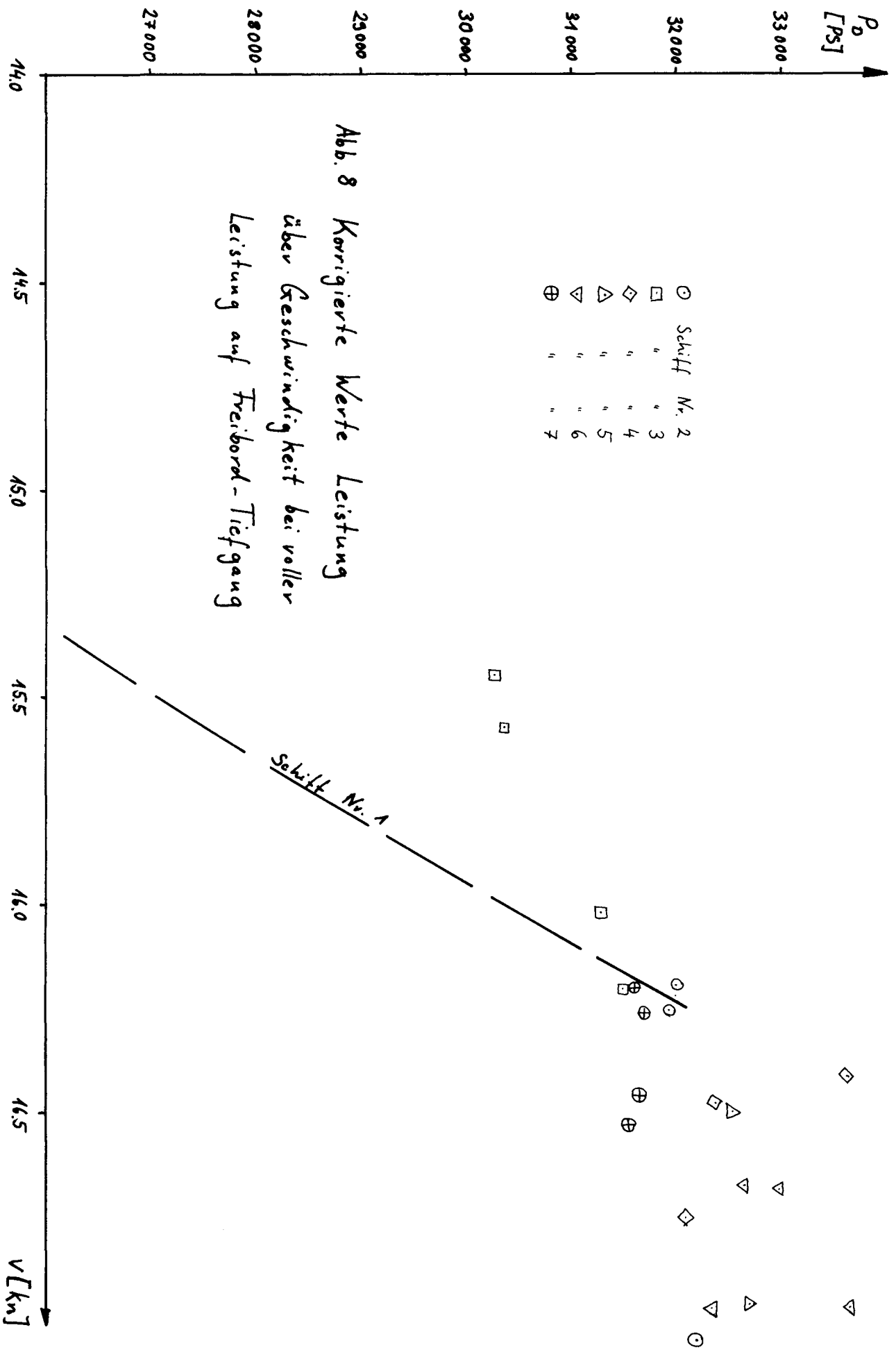


Abb. 7 Unkorrigierte Meßpunkte Leistung  
 über Geschwindigkeit bei voller  
 Leistung auf Freibord-Tiefgang



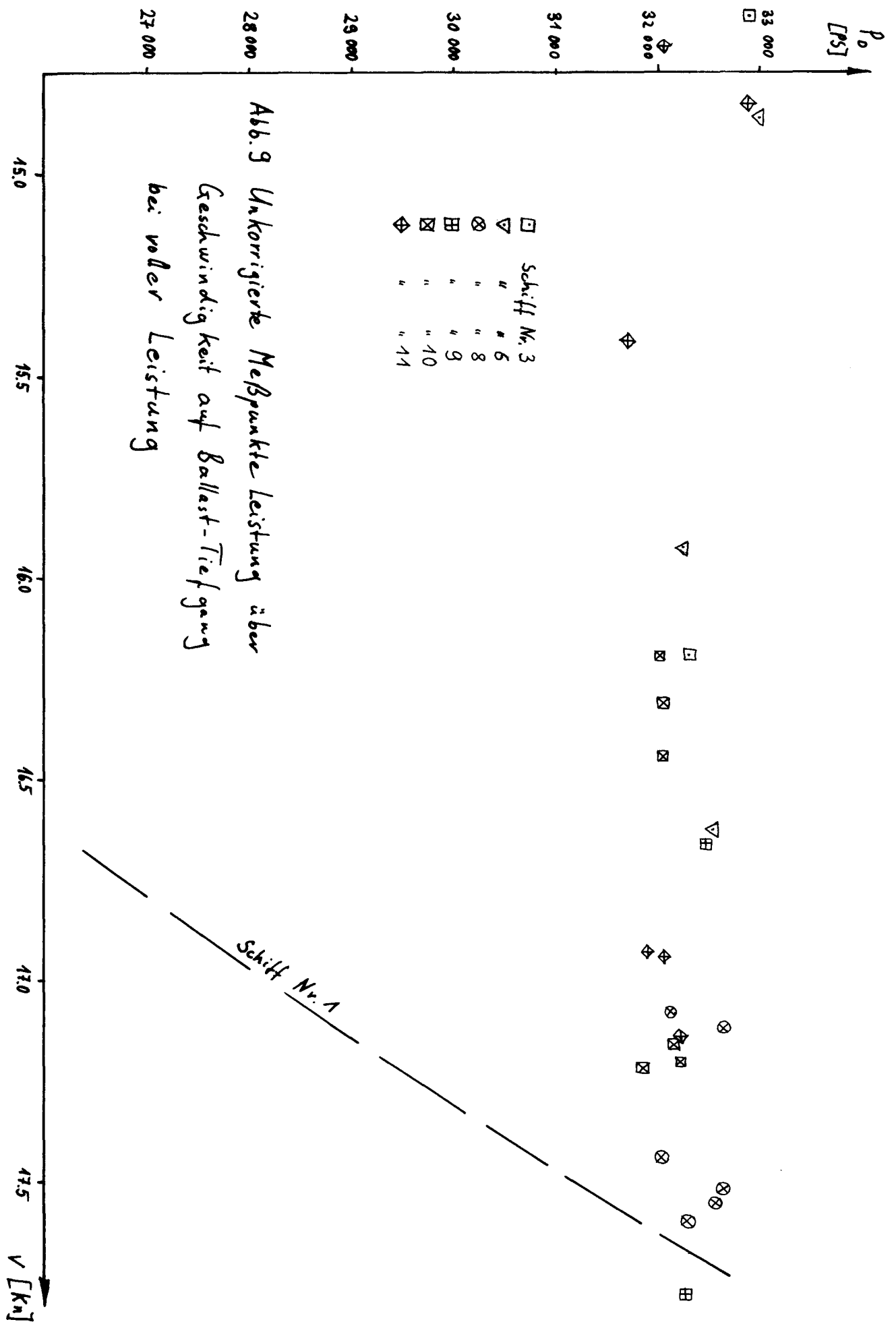


Abb. 9 Unkorrigierte Meßpunkte Leistung über  
 Geschwindigkeit auf Ballast-Tiefgang  
 bei voller Leistung

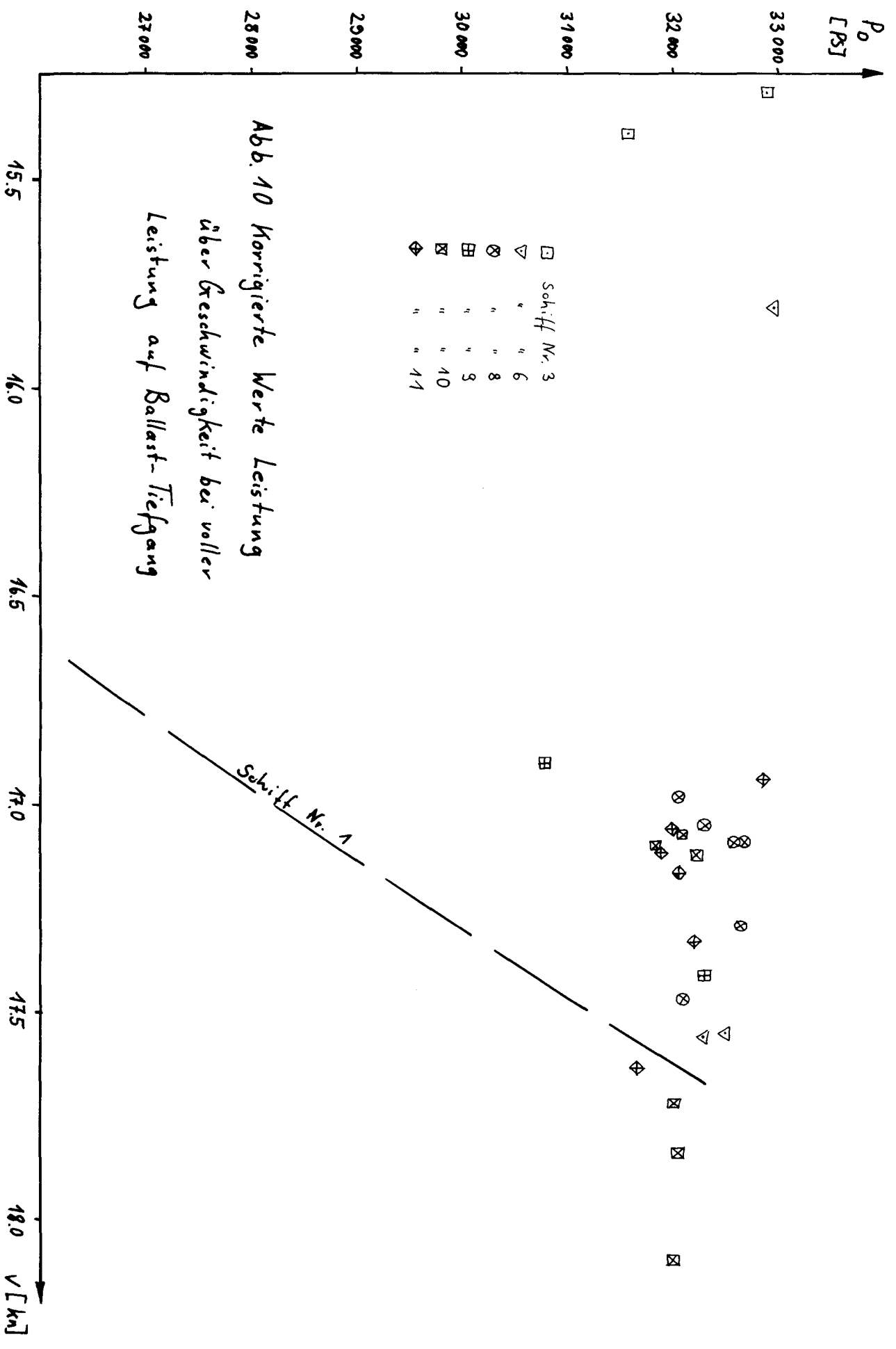


Abb. 10 Korrigierte Werte Leistung  
 über Geschwindigkeit bei voller  
 Leistung auf Ballast-Tiefgang

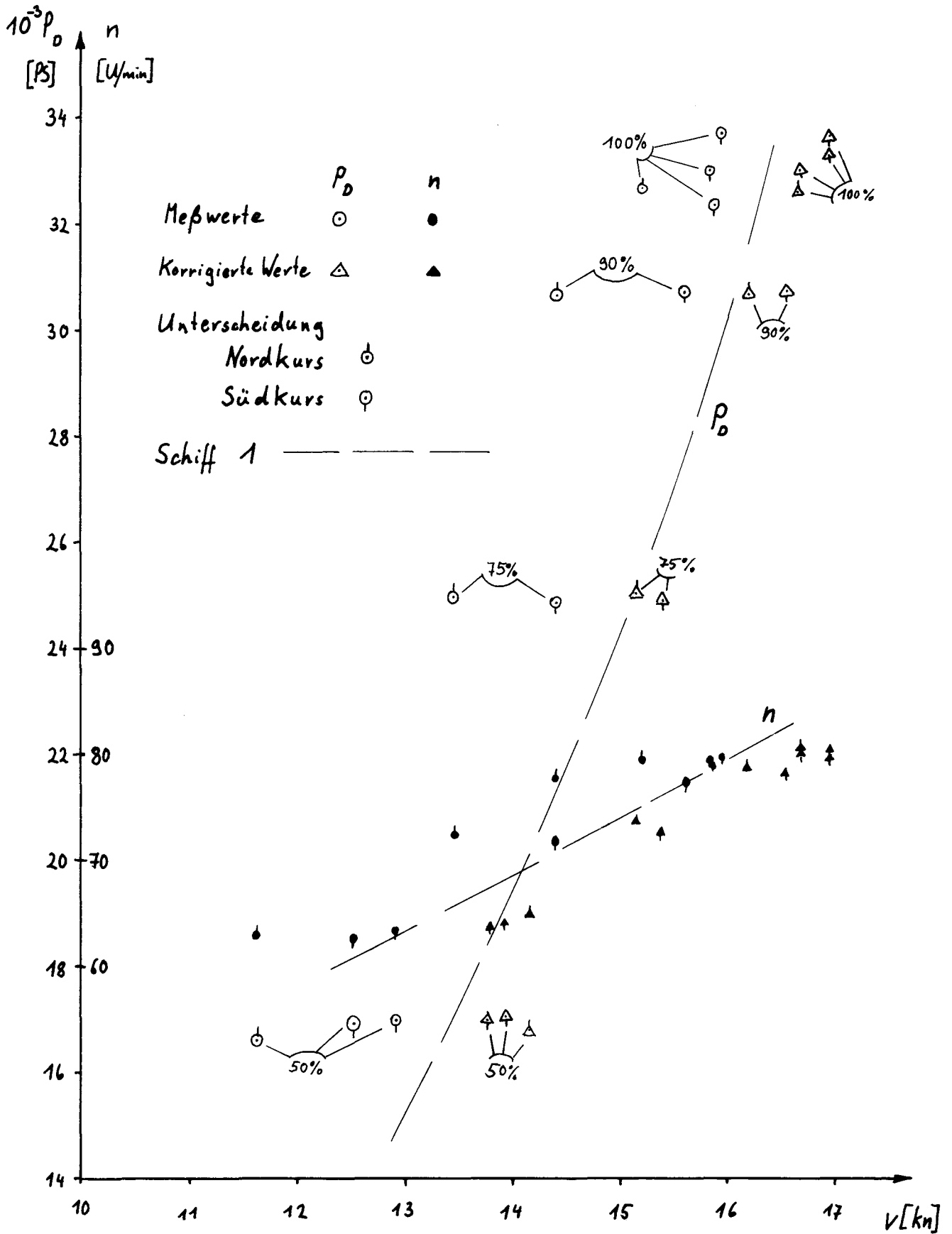


Abb. 11 Ergebnisse für Schiff 6 auf Freibord-Tiefgang

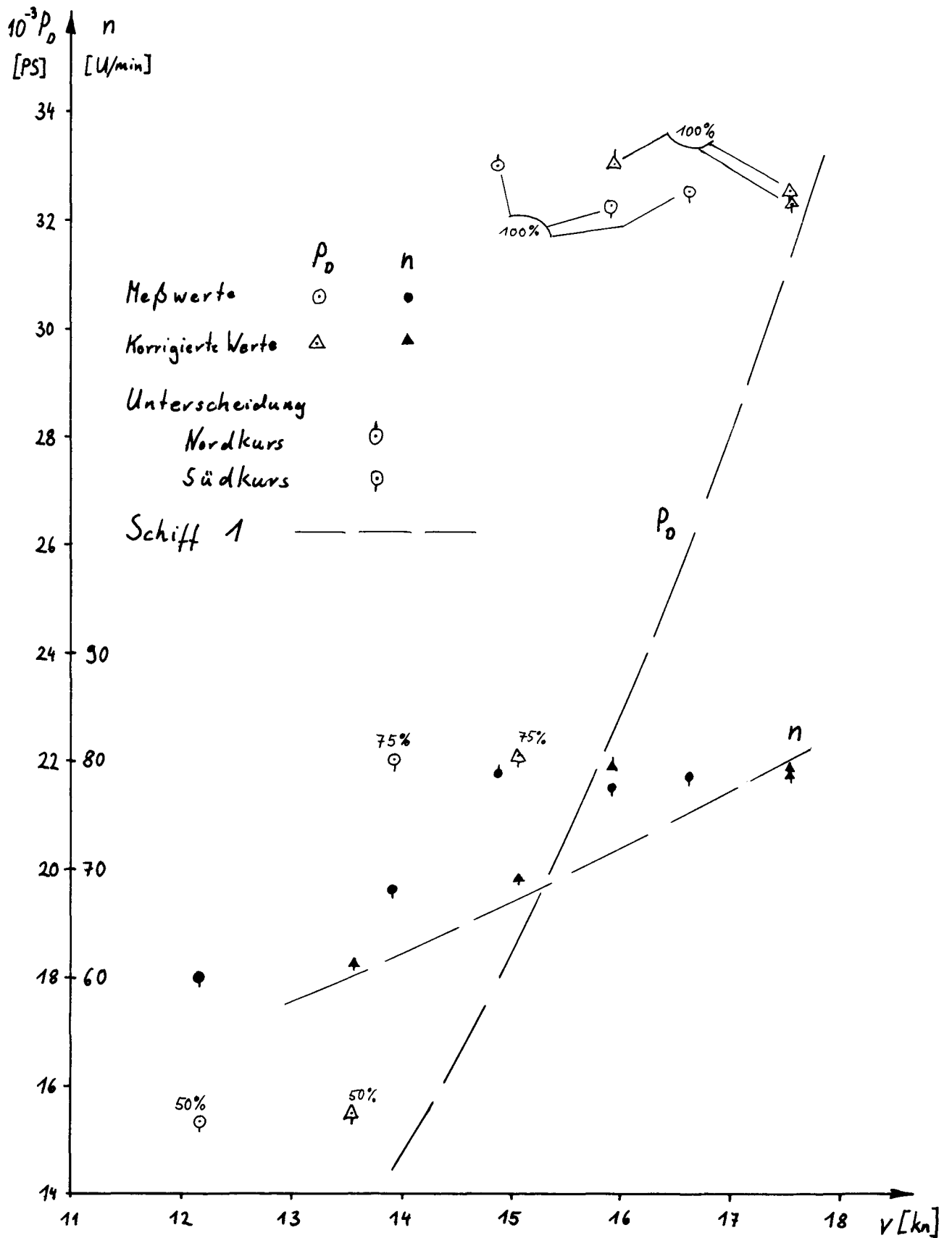


Abb. 12 Ergebnisse für Schiff 6 auf Ballast-Tiefgang